



Université Mohamed khider –Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et d'Hydraulique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Filière : **Hydraulique**
Spécialité : **Hydraulique urbaine**

Réf :

Présenté et soutenu par :
ALLOUANI Ahmed Amine
02 Juin 2025

La production d'eau dans la région de Tébessa par condensation de l'humidité atmosphérique, en utilisant un module Peltier

Jury :

Dr. CHERHABIL Sonia	MCA	Université de Biskra	Président
Mr. ABED Mourad	MAA	Université de Biskra	Examineur
Dr. ZOUITA Nadjoua	MCB	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2024/2025

Dédicaces

Ce travail est dédié à mes chers parents, piliers inébranlables de mon existence, recevez cette œuvre en hommage à votre amour infini et à votre dévouement sans failles, garants de mon succès et de mon épanouissement.

À ma très chère grand-mère, qui m'a constamment encouragé à persévérer, à travailler avec ardeur, à me garder du péché et à faire preuve de justice.

Ma très chère sœur Riheme, ta présence constante réchauffe mes jours comme un soleil fidèle ; puisse la vie t'offrir une avalanche de joies, un océan de réussite et tout le bonheur que ton cœur peut contenir.

Mon chère frère Mohammed Riadh, qui complice de mes rires et rempart de mes joies, aucun mot ne saurait contenir l'immensité de respect que je te porte, vaste comme un ciel étoilé.

À vous, Noureddine, Ilyes et Salim, mes fidèles compagnons de chaque instant, et à mes chers amis—Dr. Aymen, Hamza, Chames, Abd Errahmen, Hachem, Nabil, Bachar, Mouadh, Fouad, Issam, Islam, Oussama, Rachide, Nadjib, Karime et Mounir—étoiles bienveillantes de mon quotidien : votre présence inébranlable et votre soutien indéfectible sont la toile sur laquelle se dessine ma réussite et mon bonheur.

À toi Dr. Zouita Nadjoua, je dédie ces lignes en reconnaissance de ton enseignement précieux et de ton dévouement sans faille.

Mes professeurs, pour leur enseignement précieux et leurs conseils avisés, ce travail est le fruit de vos efforts combinés.

À tous mes chers camarades de ce parcours académique, je tiens à exprimer un profond témoignage de reconnaissance. Merci pour les instants précieux partagés, et le soutien indéfectible qui ont illuminé cette étape déterminante de mon existence. Espérant que Dieu veuille bien nous accorder une santé florissante et une sérénité intérieure durable.

À notre super petit Smurf, Moanis, qui est toujours plein d'énergie et super sympa, j'espère que ce petit hommage te fera plaisir.

Cette recherche est le fruit de tous ces moments partagés et de l'amour que vous m'avez tous témoigné.

Remerciement

À l'issue de ce travail, je tiens à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à Madame Zouita Nadjoua, docteur à l'université de Biskra, qui a dirigé mes recherches avec un professionnalisme et une rigueur exemplaire. Votre encadrement attentif, vos conseils précieux et votre soutien inébranlable ont été des piliers essentiels dans la réalisation de ce même. Je vous suis infiniment reconnaissant pour la confiance que vous m'avez témoignée tout au long de ce parcours exigeant.

Je remercie, Monsieur Nadjm-Eddine, chef de service à la station météorologique, pour son humilité, ses éclairages pertinents et son encouragement constant, qui ont enrichi cette démarche scientifique.

Je formule des remerciements respectueux à personnel administratif du la direction des ressources en eaux Tébessa, pour leur contribution, directe ou indirecte, à la réussite de ce projet.

Un remerciement sincère à Monsieur Amine, ingénieur au laboratoire du département d'hydraulique de l'université de Biskra, pour son aide technique et sa disponibilité.

J'adresse également une reconnaissance profonde aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer ce mémoire, ainsi que pour leurs remarques constructives qui ont contribué à sa finalisation.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à l'ensemble des enseignants du département d'Hydraulique de l'Université Mohamed Khider de Biskra, pour leur expertise pédagogique, leur rigueur intellectuelle et leurs encouragements précieux tout au long de ce parcours.

Je tiens particulièrement à remercier Monsieur Guettela Ismail, dont le dévouement et les efforts constants ont permis l'amélioration et le développement de notre département.

Je formule des remerciements respectueux à personnel administratif du département de génie civil et hydraulique de l'université de Biskra, pour leur contribution, directe ou indirecte, à la réussite de ce projet.

Je tiens particulièrement à remercier à GUEDDOUH Kaouther, pour votre aide. Espérant que Dieu illumine votre chemin de bonheur et joie.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail. À chacun d'entre vous, je dis sincèrement « merci », pour votre soutien, vos encouragements ou votre expertise, qui ont rendu cette étape possible.

SOMMAIRE

SOMMAIRE	
LISTE DES TABLEAUX.....	
Introduction générale	
Chapitre I : Présentation de la zone d'étude	1
I.1. Introduction	2
I.2. Présentation géographique	2
I.3. Etude climatique.....	3
I.3.1. Les précipitations	3
I.3.2. La température.....	5
I.3.3. Le Vent.....	5
I.3.4. L'Humidité.....	6
I.3.5. La Neige	7
I.3.6. Synthèse climatique.....	7
• Diagramme ombro-thermique de Gaussen.....	7
• Le Climagramme pluviothermique d'Emberger.....	8
I.4. Aperçue géologique	10
I.5. Aperçues hydrologique et hydrogéologique	11
I.6. Ressources en eau de la wilaya de Tébessa	12
I.6.1. Ressources en eaux de surface	13
I.6.2. Ressources en eaux souterrain	16
I.6.3. Ressources en eaux non conventionnelles	17
I. Conclusion.....	18
Chapitre II: Le cycle hydrologique et la production d'eau à partir l'humidité de l'air	19
III. Introduction.....	21
II.2. Le cycle hydrologique	22

II.3. Les composantes du cycle hydrologique.....	23
II.3.1. L'évapotranspiration.....	23
II.3.2. La condensation.....	23
II.3.3. Les précipitations	24
II.3.4. Le ruissellement.....	24
II.3.5. L'infiltration	24
II.3.6. La circulation souterraine	25
II.3.7. Le point rosée	25
II.4. La rosée, source d'eau potable	26
II.4.1. La formation de rosée	26
II.4.2. Les condenseurs de rosée.....	26
II.5. La formation du brouillard	28
II.5.1. Brouillard de rayonnement	28
II.5.2. Brouillard d'advection	28
II.5.3. Brouillard d'évaporation	29
II.5.4. Brouillard de mélange.....	29
II.6. Conclusion.....	30
Chapitre III : Les différents procédés de production d'eau à partir de l'humidité de l'air	31
III.1. Introduction	32
III.2. Les techniques de la récupération de l'eau atmosphérique.....	33
III.2.1. La récupération des eaux de l'aire en utilisant les vents.....	33
III.2.2. Production d'eau avec brouillard.....	34
III.2.3. Production d'eau avec des structures naturelles.....	36
III.2.4. Production d'eau avec condensation souterraine	37
III.2.5. Production d'eau avec un film polymère	38
III.2.6. Production d'eau avec générateur d'eau à air atmosphérique	40
III.2.7. Production d'eau à partir de l'humidité et l'énergie solaire.....	42
III.3. La thermoélectricité	43
III.3.1. Définition de la thermoélectricité.....	43

III.3.2. Les Phénomène de thermoélectriques	43
• Effet du Seebeck	43
• Effet du Thomson.....	44
• Effet du Peltier	45
III.4. Le rôle du module thermoélectrique à effet Peltier pour la production d'eau de l'aire...	46
III.4.1. Les avantage et les inconvénients	47
III.5. Conclusion.....	49
Chapitre IV : Expérimentation des prototypes de la production de l'eau atmosphérique.....	50
IV.1. Introduction	51
IV.2. Méthodologie de travail	52
III.2.1. Prototype n°1.....	52
IV.2.2. Prototype n°2.....	53
IV.3. Liste de matériel	54
IV.4. Liste de produits	58
IV.5. Résultats et discussion.....	59
VI.5.1. Les résultats de Janvier, Février	59
VI.5.2. Les résultats de Mars et Avril.....	61
VI.5.3. La comparaison entre (mars, avril) et (janvier, février)	63
IV.5.4. La comparaison entre les résultats de prototype 1 et prototype 2.....	63
• Prototype 1.....	64
• Prototype 2.....	65
IV.6. Les résultats des analyses physico-chimique de l'eau récupéré de l'air	66
IV.7. Conclusion	69
Conclusion Générale.....	71

LISTE DES FIGURE

Figure I.1 : Carte du découpage administratif de la wilaya de Tébessa	2
Figure I.2 : Situation de la région de Tébessa sur le climagramme (Benarfa, 2005)	3
Figure I.3 : Précipitation moyenne annuelle des précipitations 1965- 1995 (Bouchagoura.2019).	4
Figure I.4 : Diagramme Ombro-thermique de la région de Tébessa (climat data).....	8
Figure I.5 : Climagramme D'EMBERGER de la région de Tébessa (Boumachrouk, 2020)	10
Figure I.6 : Carte Géologique de la région de Tébessa (Edité en 1948)	11
Figure I.7 : Carte de relief de la région de Tébessa. (Boumachrouk, 2020).	12
Figure I.8 : Réseau hydrographique des plaines de la région d'étude.	14
Figure I.9 : la source en eau « YOKOUS » Tébessa	15
Figure I.10 : station d'épuration (Ain Zerroug) Tébessa (Google map)	17
Figure II. 1 : schéma du cycle hydrologique (https://www.projetecolo.com/).	23
Figure II. 2 : Formation de la rosée dans la nature.....	26
Figure II. 3 : Diagramme de l'air humide. (Lekouch, 2010)	27
Figure II.4 : la de formation de brouillard (la chaine météo).....	28
Figure III.1 : Le fonctionnement de l'éolienne (WMS de Eole Water®).....	33
Figure III.2: Eoel water turbine	34
Figure III.3: Des capteurs de brouillard pour produire de l'eau	35
Figure III.4 : Les capteur de brouillard au Maroc.....	35
Figure III.5 : les plantes de Tillandsia et Broméliacées	36
Figure III.6 : condensation du brouillard sur les feuilles d'arbre (Google image, 2025)	36
Figure III.7 : schéma du distillateur solaire	37
Figure III.8 : Mini éolienne WaterSeer.....	38
Figure III.9 : coupe transversale et schéma de formation de Scaffold polymère à motif nid d'abeilles pour la condensation d'eau.....	39
Figure III.10: Fabrication and characterization of SHPF.....	40
Figure III.11 : schéma de générateur d'eau d'air atmosphérique	40
Figure III.12 : Le générateur AWG	41
Figure III.13 : Le panneau Source® de la technologie Zéro Mass Water	42
Figure III.14 : Schéma de principe de l'effet Seebeck	43
Figure III.15 : Principe de l'effet THOMSON.....	44
Figure III.16 : Principe de l'effet Peltier	45
Figure III.17 : Schémas des générateurs utilisant les modules Peltier.....	47

Figure III.18 : les différents types de module Peltier.....	48
Figure IV.1 : Prototypé n° 1 (ZOUITA.N 2024).....	52
Figure IV.2 : Les différents dissipateurs thermiques utilisés sur le module Peltier	53
Figure IV.3 : Mini thermomètre et hygromètre LCD de température et humidité.....	54
Figure IV.4 : Alimentations à découpage 220v AC 12V DC 16.5 A.....	54
Figure IV.5 : Module refroidissement thermoélectrique à effet Peltier TEC1-12706 12V 6A.....	55
Figure IV.6 : Bloc de refroidissement en aluminium 40mm.....	55
Figure IV.7 : Ventilateur 12V 0,15A.	55
Figure IV.8 : Tube Cuivre 8mm en forme de ressort.	56
Figure IV.9 : une seringue simple.	56
Figure IV.10 : un bac.....	56
Figure IV.11 : un dissipateur thermique.....	57
Figure IV.12 : Pompe à eau DC 6-12V.....	57
Figure IV.13 : L'appareil de Ph mètre et de conductimètre	58
Figure IV.14 : seringue pate thermique.....	58
Figure IV.15 : liquide refroidisseur	59
Figure IV.16 : Graphe résultats du mois janvier et février.....	60
Figure IV.17 : Graphe résultats du mois mars et avril.....	63
Figure IV.18 : Graphe résultats du prototype 1.....	64
Figure IV.19 : Graphe résultats du prototype 2.....	65
Figure IV.20 : Graphe résultats des analyses (janvier, février)	67
Figure IV.21 : Graphe résultats des analyses (mars et avril).....	68

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Précipitations mensuelles moyennes pour la période à Tébessa (1991-2021).....	4
Tableau I.2: Température mensuelle minimale, moyenne, maximale (°C) à Tébessa, (1991-2021) (climat data)	5
Tableau I.3 : Intensité du vent (m/s). (Guerrad, 2018).....	6
Tableau I.4 : L'humidité relative moyenne en pourcentage à Tébessa dans la période (1991-2021) (climat data)	6
Tableau I.5 : Données du diagramme ombro-thermique de Gaussen de Tébessa (1991-2021).	7
Tableau I.6 : Données du climagramme D'EMBERGER de Tébessa (1991-2021).....	9
Tableau I.7 : les plus important sources naturelles connue (D.R.E 2025)	15
Tableau I.8 : Production d'eaux usées à différents horizons (ONA Tébessa).....	17
Tableau IV.1: les résultats des mois janvier et février.	59
Tableau IV.2 : les résultats des moi Mars et Avril.....	61
Tableau IV.3 : les résultats de prototype 1.....	64
Tableau IV.4 : les résultats de prototype 2.....	65
Tableau IV.5 : les résultats des analyses de (janvier et février).....	66
Tableau IV.6 : les résultats des analyses de (mars et avril)	67

Résumé

La région de Tébessa, caractérisée par un climat semi-aride et une rareté des ressources en eau, nécessite des solutions innovantes pour répondre aux défis liés à l'accès à l'eau potable. Cette étude examine la possibilité de produire de l'eau par condensation de l'humidité atmosphérique en utilisant un module thermoélectrique à effet Peltier, une technologie peu énergivore adaptée aux conditions locales.

Les travaux expérimentaux, menés entre janvier et avril 2025, ont porté sur deux prototypes conçus pour optimiser la récupération de l'humidité ambiante. L'efficacité du module dépend principalement de la température ambiante, de l'humidité relative et de la capacité à maintenir une surface froide permettant la condensation en utilisant un ventilateur pour la dissipation de la chaleur.

Les analyses physico-chimiques de l'eau récupérée révèlent un pH presque neutre à légèrement acide ainsi qu'une faible conductivité électrique, ce qui est conforme aux normes de potabilité pour la majorité des échantillons analysés.

Cette recherche met en évidence le potentiel de la condensation pour la récupération de l'eau atmosphérique comme source d'eau complémentaire dans les zones arides et semi-arides. Elle recommande également des ajustements technologiques, comme l'intégration d'énergies renouvelables (solaire ou éolienne), pour garantir la durabilité du système et son adaptation aux contraintes climatiques locales.

ملخص

تحتاج منطقة تبسة، التي تتميز بمناخ شبه جاف ونُدرة الموارد المائية، إلى حلول مبتكرة لمواجهة التحديات المرتبطة بالحصول على مياه الشرب. تبحث هذه الدراسة في إمكانية إنتاج المياه عن طريق تكثيف الرطوبة الجوية باستخدام وحدة كهروحرارية ذات تأثير بلتير، وهي تقنية منخفضة الطاقة تتناسب مع الظروف المحلية.

وشمل العمل التجريبي، الذي تم تنفيذه بين جانفي وأفريل 2025، نمودجين أوليين مصممين لتحسين استعادة الرطوبة المحيطة. وتعتمد كفاءة الوحدة بشكل أساسي على درجة الحرارة المحيطة والرطوبة النسبية والقدرة على الحفاظ على سطح بارد للسماح بالتكثيف. وكشفت التحاليل الفيزيائية والكيميائية للمياه المسترجعة عن درجة حموضة شبه محايدة إلى حمضية قليلاً وموصلية كهربائية منخفضة، والتي تتوافق مع معايير مياه الشرب لمعظم العينات التي تم تحليلها.

يسلط هذا البحث الضوء على إمكانات التكثيف لاستعادة المياه الجوية كمصدر تكميلي للمياه في المناطق القاحلة وشبه القاحلة. كما أنه يوصي بإجراء تعديلات تكنولوجية، مثل دمج الطاقات المتجددة (الطاقة الشمسية أو الرياح)، لضمان استدامة النظام وتكييفه مع القيود المناخية المحلية.

Summary

The region of Tébessa, characterized by a semi-arid climate and a scarcity of water resources, requires innovative solutions to meet the challenges associated with access to drinking water. This study examines the possibility of producing water by condensing atmospheric humidity using a Peltier-effect thermoelectric module, a low-energy technology suited to local conditions.

The experimental work, carried out between January and April 2025, involved two prototypes designed to optimize the recovery of ambient humidity. The efficiency of the module depends mainly on the ambient temperature, relative humidity and the ability to maintain a cold surface to allow condensation.

Physical-chemical analyses of the recovered water revealed a near-neutral to slightly acidic pH and low electrical conductivity, which complied with drinking water standards for most of the samples analyzed.

This research highlights the potential of condensation to recover atmospheric water as a complementary source of water in arid and semi-arid zones. It also recommends technological adjustments, such as the integration of renewable energies (solar or wind), to guarantee the sustainability of the system and its adaptation to local climatic constraints.

Introduction générale

Introduction générale :

L'Algérie se situe, à l'instar des 17 pays Africains touchés par le stress hydrique, dans la catégorie des pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques, soit en dessous du seuil théorique de rareté fixé par la Banque Mondiale à 1000 m³ par habitant et par an. Si en 1962, la disponibilité en eau théorique par habitant et par an était de 1500 m³, elle n'était plus que de 720 m³ en 1990, 680 m³ en 1995, 630 m³ en 1998, 500 m³ elle ne sera que de 430 m³ en 2020 La disponibilité en eau potable en Algérie en m³/Habitant/An dépassera légèrement le seuil des 400 m³/ha (norme OMS).(PNUD.2009)

La wilaya de Tébessa, caractérisée par un climat à faible pluviométrie d'environ 300 mm/an marqué par des périodes estivales quasi-sèches, illustre parfaitement cette problématique. Dans ce contexte, l'exploitation de l'humidité atmosphérique par condensation propose une approche innovante et complémentaire aux méthodes d'approvisionnement traditionnelles.

L'eau existe sous de multiples formes : eau de source, eau de mer, de rivière, eau de pluie, brouillard ou rosée. Les réserves globales d'eau douce sont évaluées à 35 millions de km³ (soit 2,5 % de la quantité globale d'eau disponible sur terre = 1 400 millions de km³) : il s'agit des glaciers et neiges (24 millions de km³), des eaux souterraines (10,5 millions de km³), notamment des puits artésiens, des rivières et lacs (0,1 million de km³). On y inclut aussi les précipitations atmosphériques environ (13 000 km³) (Beysens et Milimouk, 2000 ; Muselli, 2006b. in Owen clus.2007)

Une ressource alternative est à chercher tout simplement dans l'air où nous possédons de très grandes réserves d'eau que nous ne maîtrisons pas. Notre atmosphère contient 12 900 km³ d'eau douce qui est composée de 98 % d'eau vapeur et de 2 % d'eau condensée (nuages), un chiffre comparable aux ressources en eau liquide renouvelables sur les terres habitées (12 500 km³). (Owen clu.2007)

L'eau atmosphérique, sous forme de vapeur, de rosée ou de brouillard, s'intègre au cycle hydrologique planétaire. Elle représente ainsi un réservoir renouvelable potentiellement exploitable, même dans les zones arides. Parmi les technologies émergentes, les modules thermoélectriques à effet Peltier permettent d'abaisser localement la température d'une surface pour atteindre ou dépasser le point de rosée. Ce processus induit la condensation de la vapeur d'eau. Le rendement de cette

condensation est fonction de paramètres physiques (Température, humidité relative) et des propriétés thermo-physiques du module à effet Peltier (conductivité thermique, puissance électrique).

Dans le cadre de l'étude, une analyse climatologique et hydrologique a été conduite. Cette analyse a impliqué la collecte et l'exploitation des données météorologiques enregistrées à Tébessa entre 1991 et 2021. En outre, des calculs ont été effectués pour générer des diagrammes ombro-thermiques de Gaussen et des climagrammes d'Emberger pour caractériser les périodes propices à la condensation.

Dans le cadre de l'expérimentation en module électrothermique à effet Peltier, 2 prototype sont a été conçu en 2024 par Zouita et ont été mis en place dans des conditions contrôlées, incluent la variation de l'humidité, de la température ambiante et du point de rosée. Des mesures de débit d'eau condensée et de consommation électrique ont été réalisées. Ces mesures permettent d'établir les performances énergétiques et hydriques du prototype.

Problématique et question de recherche :

Dans le cas de la région semi-aride de Tébessa, il s'agit d'optimiser la production d'eau par condensation de l'humidité atmosphérique. Pour cela, un module thermoélectrique à effet Peltier est utilisé. En se basant sur les relevés météorologiques (température, humidité relative, point de rosée) collectés à la station de Tébessa entre 1991 et 2021, ainsi que les résultats expérimentaux obtenus à partir des essais du prototype Peltier.

Par ailleurs, des recherches exhaustives, en particulier des études bibliographiques, se sont focalisées sur l'examen des méthodes de collecte d'eau atmosphérique. Ces recherches ont porté sur des phénomènes tels que la condensation de la rosée, le brouillard ou l'emploi de générateurs d'eau atmosphérique AWG. Parallèlement, des travaux de recherche ont été menés sur les propriétés des matériaux thermoélectriques et sur l'optimisation des bilans énergétiques des systèmes existants.

Notre étude se concentre sur la production d'eau dans la région de Tébessa par condensation de l'humidité atmosphérique, en utilisant un module Peltier. La recherche présentée dans cette thèse se compose de 04 chapitres.

- Présentation géographie, géologie, hydrologie et hydrogéologie, de la wilaya de Tébessa.

- Le cycle hydrologique et la production d'eau à partir de l'humidité de l'air.

-L'analyse des différents procédés de production d'eau par l'humidité de l'air est nécessaire pour comprendre les enjeux et les défis de la gestion des ressources hydriques.

-Le dernier chapitre, comporte la partie expérimentale qui s'étale de 25 janvier 2025 jusqu'au 5 avril de la même année où nous avons expérimenté 2 prototypes

Chapitre I :

Présentation de la zone d'étude

I.1. Introduction

L'étude de l'environnement naturel de Tébessa est une étape très importante vers l'identification des technologies qui nous permettront d'obtenir des résultats significatifs dans le domaine de la condensation de l'eau atmosphérique.

La wilaya de Tébessa, située dans le nord-est de l'Algérie, revêt une importance géographique et hydrique significative. Cette région est caractérisée par un climat semi-aride, ce qui a des répercussions notables sur ses ressources hydriques, en particulier le système aquifère de Tébessa, qui représente la principale source d'approvisionnement en eau de la région. Ce système aquifère revêt une importance cruciale en raison des défis majeurs auxquels il est confronté. Ces défis comprennent le stress hydrique, l'urbanisation accélérée et la croissance démographique, qui exercent une pression accrue sur la demande en eau et ont un impact négatif sur sa qualité (Chougar et al, 2023).

I.2. Présentation géographique

La wilaya de Tébessa Géographiquement située entre 34 ° 15'N et 36 ° 00'N de latitude et 7 ° 15'E et 8 ° 30' E de longitude, et s'élève à 900 m d'altitude et partage avec la République tunisienne la bande frontalière à une distance de 297 km. Elle est bordée au nord par la wilaya de Souk Ahras, au sud par la wilaya d'El-Oued, à l'est par la République tunisienne, et à l'ouest par Khenchela et Oum El Bouaghi, avec une aire section 13,878 km² (Boumachrouk, 2020).

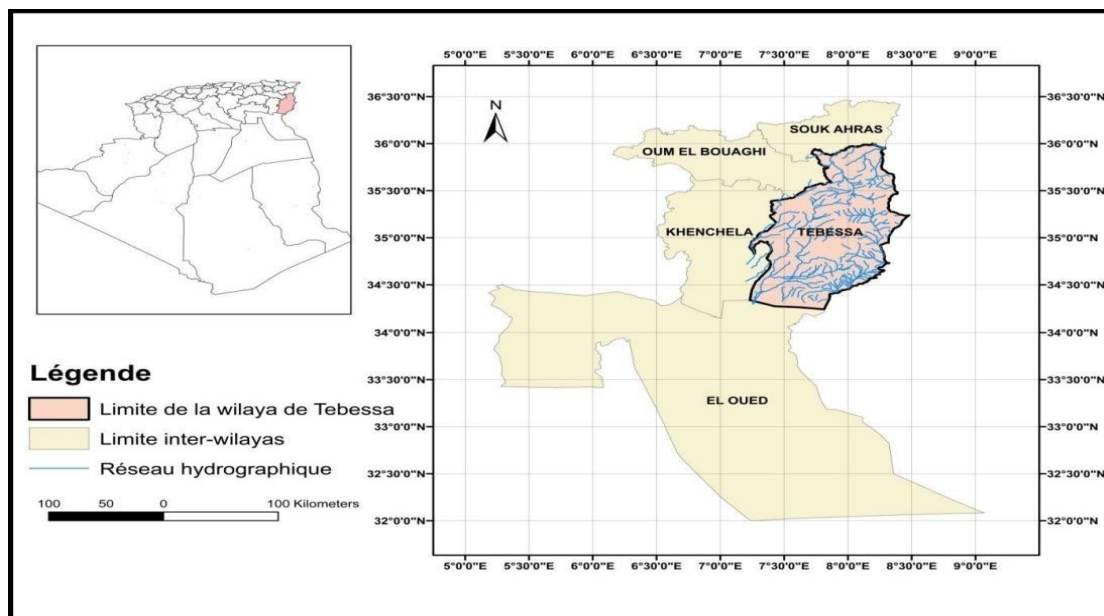


Figure I.1: Carte du découpage administratif de la wilaya de Tébessa (Boumachrouk, 2020.)

I.3. Etude climatique :

À Tébessa, dans le nord-est de l'Algérie, il fait froid en hiver et chaud et sec en été. La température moyenne annuelle est de 15,3 °C, avec des variations entre 5,6 °C en janvier et 25,1 °C en juillet. Il pleut plus au nord qu'au sud en octobre-mai. De 350 mm par an au nord à moins de 150 mm par an au sud. Et il pleut le plus en mars (92,4 mm en 2019). Les vents, comme le Sirocco chaud et sec, modèrent le climat selon l'endroit. L'humidité moyenne de 59 % de l'air influence la végétation et la vie des orthoptères. (Benarfa, 2005).

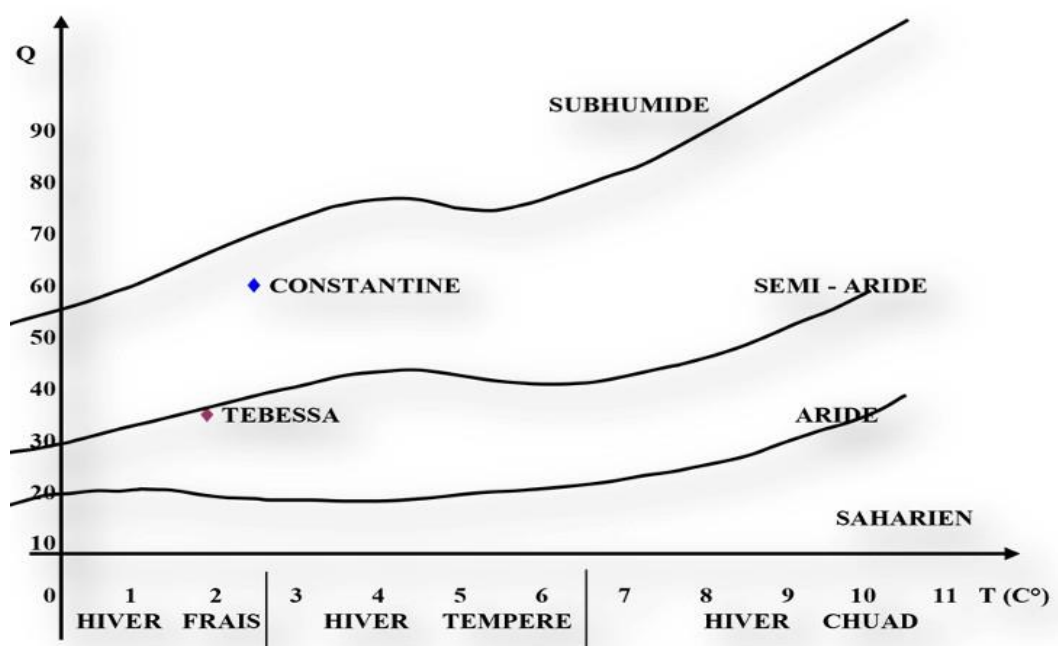


Figure I.2: Situation de la région de Tébessa sur le climagramme (Benarfa, 2005).

I.3.1. Les précipitations :

Les précipitations jouent un rôle essentiel car elles témoignent de la circulation des eaux de surface et les eaux souterraines. En outre, toute étude climatique exige une analyse approfondie des précipitations, car la pluie est un élément qui influence l'écoulement saisonnier et, par conséquent, le régime des cours d'eau et des nappes. Elles varient et changent d'une année à l'autre et d'une saison à l'autre. Ces mesures permettent d'évaluer la quantité d'eau tombée et surtout d'évaluer la quantité destinée aux écoulements (Gueddouh, 2024).

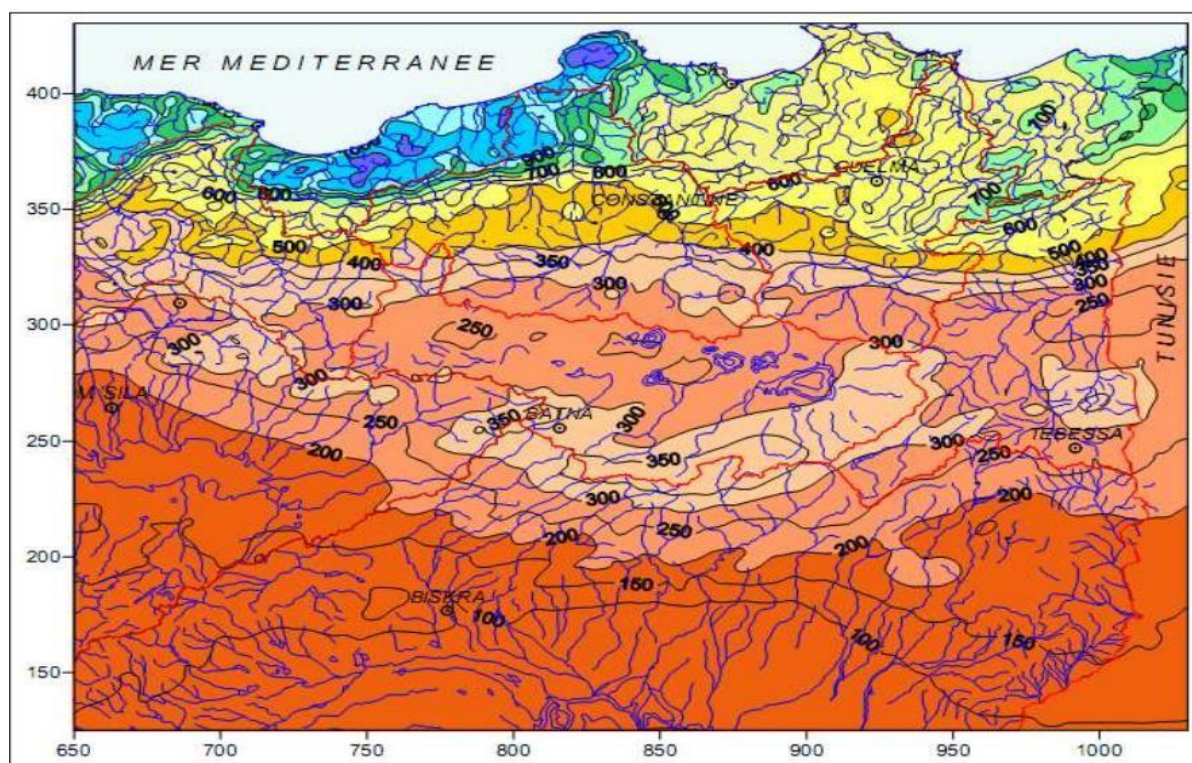
Les précipitations mensuelles moyennes enregistrées à Tébessa entre 1991 et 2021, sont présentés dans le tableau suivant :

Table I.1 : Précipitations mensuelles moyennes à Tébessa (1991-2021)

<https://fr.climate-data.org/afrique/algerie/tebessa/tebessa-3692/>

moi	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
P (mm)	25	17	32	37	30	18	13	25	38	27	27	20

Le régime pluviométrique de Tébessa (1991-2021) présente une forte saisonnalité typique des zones semi-arides, avec 309 mm annuels en moyenne, répartis selon une distribution bimodale un pic au printemps (37 mm en avril) et un autre en automne (38 mm en septembre). Durant la saison estivale, plus précisément de juin à août, les précipitations sont quasi inexistantes, avec un pic de 13 mm enregistré en juillet. Ces fluctuations sont la manifestation de conditions climatiques caractérisées par des orages printaniers et des perturbations automnales. La faible pluviométrie annuelle, associée à l'alternance de périodes humides et sèches, est un indicateur de l'existence d'un climat classé comme semi-aride (BSk selon le système de Köppen).

**Figure I.3:** Précipitation moyenne annuelle entre 1965-1995 (Bouchagoura.2019).

I.3.2. La température :

Les valeurs des températures mensuelles (maximales, minimales et moyennes) de la région d'étude présentent dans le tableau suivant :

Table I.2: Température mensuelle minimale, moyenne, maximale (°C) à Tébessa, (1991-2021) (climat data)

Moi	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
T _{moy} (°C)	5.1	5.6	9.2	13.1	17.3	22.4	26.2	25.3	20.5	16.2	9.9	6.1
T _{min} (°C)	1.4	1.9	3.4	6.6	10.3	14.7	18	17.8	14.4	10.8	5.3	1.9
T _{max} (°C)	10.5	11.3	15.6	19.9	24.5	30	34.1	33	27.5	22.6	15.5	11.3

T° moy: Température moyenne mensuelle.

T° min : Température minimale mensuelle moyenne.

T° max : Température maximale mensuelle moyenne.

Le climat de la wilaya de Tébessa, selon les données de 1991 à 2021, présente des saisons bien distinctes avec de forts contrastes thermiques. L'été est chaud, culminant en juillet avec des moyennes de 26,2°C et des maximales dépassant 34°C. L'hiver est plus doux, avec des minimales proches de 1,5°C et des moyennes autour de 5 à 6°C. Les transitions entre saisons sont progressives, avec des températures croissantes au printemps et décroissantes en automne. Les amplitudes thermiques sont particulièrement marquées en été, soulignant un climat continental modéré caractérisé par des étés chauds, des hivers doux et une nette différenciation saisonnière.

I.3.3. Le Vent :

Selon les relevés effectués par la station météorologique de Tébessa, le régime des vents présente une nette alternance saisonnière. En effet, de novembre à avril, les flux dominants soufflent du secteur Ouest-Nord-Ouest, contribuant significativement aux précipitations. De mai à juillet, le Sirocco, venu du Sud, provoque une évaporation intense et fait chuter sensiblement l'humidité. En outre, la représentation graphique des moyennes mensuelles de la vitesse du vent, calculées sur la période 1980-2015 et exprimées en mètres par seconde, met en évidence les fluctuations d'intensité tout au long de l'année (Guerrad, 2018).

Table I.3 : Intensité du vent (m/s). (Guerrad, 2018)

moi	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Vent (m/s)	2.76	3.06	3.04	3.25	2.9	2.79	2.78	2.50	2.32	2.2	2.34	2.49

Le Tableau montre les vitesses de vent à Tébessa pour 2018 met en évidence des fluctuations saisonnières modérées, allant de 2,20 m/s en octobre à un pic à 3,25 m/s en avril. Les vents sont plus soutenus au printemps (mars à 3,04 m/s, avril à 3,25 m/s) et connaissent une légère recrudescence en hiver (février à 3,06 m/s), tandis que l'automne (septembre–novembre) et l'été (juillet–août) enregistrent les valeurs les plus basses (2,20–2,50 m/s). Cette répartition concorde avec le régime climatique local : les rafales printanières coïncident avec les perturbations pluvieuses d'avril (37 mm), et la faiblesse estivale, malgré l'aridité (humidité ≤ 33 %, précipitations ≤ 25 mm), limite l'érosion éolienne. L'augmentation hivernale pourrait résulter de systèmes dépressionnaires ou de forts gradients thermiques.

I.3.4. L'Humidité :

Ce paramètre correspond à la tension de vapeur réelle observée, rapportée à la tension de vapeur saturante, à la même température. (Djebari, 2011). La région de Tébessa est une zone semi-aride, Située dans la zone des hauts plateaux. Selon climat data, l'humidité relative moyenne de l'air durant l'année (1991 à 2021) est rapportée dans le tableau :

Table I.4: L'humidité relative moyenne en pourcentage à Tébessa dans la période (1991-2021) (Climat data)

moi	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Humidité (%)	70%	61%	50%	44%	39%	32%	28%	33%	47%	52%	65%	70%

Le cycle d'humidité relative à Tébessa (1991–2021) montre un profil semi-aride bien marqué les hivers (janvier et décembre) sont les plus humides (≈ 70 %), tandis que l'été atteint un creux à 28 % en juillet, coïncidant avec les pics de température et le

minimum de pluies. Le printemps voit l'humidité chuter progressivement depuis 50 % en mars jusqu'au cœur de l'été, puis elle remonte à l'automne (47 % en septembre, 52 % en octobre) avec la reprise des pluies. Une légère hausse en août (33 %) peut résulter de rosées ou de quelques averses. Ces variations, en cohérence avec le bilan thermique et pluviométrique, confirment le climat BSk (selon la classification de Köppen, est un climat semi-aride froid, aussi appelé climat de steppe froide), où la sécheresse estivale renforce l'aridité, alors que l'humidité hivernale implique une gestion de l'eau et des pratiques agricoles adaptées aux forts contrastes saisonniers.

I.3.5. La Neige :

Dans les zones montagneuses la couche neigeuse agit comme un isolant thermique : sous un mètre d'épaisseur, la température du sol se maintient à $-0,6^{\circ}\text{C}$. Les sommets de la bordure sud du sous bassin de Tébesa sont enneigés en ligne droite (est-ouest) depuis le djebel Bouroumane (1 545 m) jusqu'au djebel Meteguinaro (1 712 m). La surface du sous bassin susceptible d'être enneigée est relativement faible, mais elle joue un rôle important car elle se situe sur des affleurements calcaires. Cela constitue un apport assez important à la nappe souterraine.

Cette région se situe dans la zone d'enneigement moyen au sol, avec une durée de 5 à 10 jours par an. (Seltzer, 1946)

I.3.6. Synthèse climatique :

- **Diagramme ombro-thermique de Gaussen :**

Il permet de déterminer les périodes humides ou sèches, en se basant sur le total pluviométrique (moyenne en millimètres), et la température moyenne mensuelle (en $^{\circ}\text{C}$). (Boumachrouk, 2020)

Table I.5 : Données du diagramme ombro-thermique de Gaussen de Tébesa (1991-2021).

moi	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
P (mm)	25	17	32	37	30	18	13	25	38	27	27	20
T ($^{\circ}\text{C}$)	5.1	5.6	9.2	13.1	17.3	22.4	26.2	25.3	20.5	16.2	9.9	6.1

L'analyse des données météorologiques révèle une transition saisonnière caractérisée par un passage d'un hiver frais, avec des températures moyennes allant de 5 à 6°C et des précipitations de 17 à 25 mm entre décembre et février, à un printemps

offrant des températures modérées (9 à 17 °C) et des précipitations plus abondantes (30 à 37 mm), suivis d'un été chaud (25 à 26 °C en juillet-août) et particulièrement sec (13 à 25 mm). Cette période est ensuite suivie d'un automne où la chaleur décroît (20 °C en septembre à 10 °C en novembre), tandis que les précipitations redeviennent fortes (jusqu'à 38 mm en septembre). Ce profil, caractérisé par un été marqué par une sécheresse et des températures élevées, ainsi que par des précipitations abondantes au printemps et surtout en septembre, évoque un climat tempéré à influence méditerranéenne, caractérisé par quatre saisons bien distinctes.

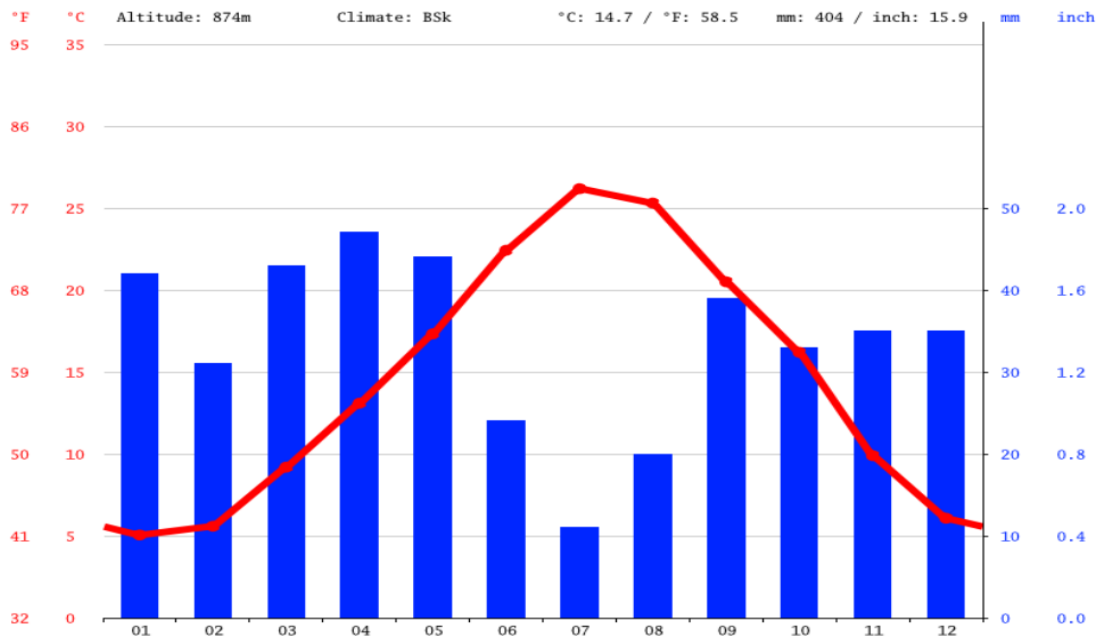


Figure I.4: Diagramme Ombro-thermique de la région de Tébessa (climat data).

- **Le Climagramme pluviothermique d'Emberger :**

Cette climagramme est un outil de cartographie climatique qui permet de déterminer l'étage bioclimatique d'une station donnée. Cette approche méthodique s'inscrit dans le cadre des travaux fondateurs de la théorie des vitesses de Emberger en 1955 (Derradji, 2023), représentée dans la relation suivante :

$$Q2 = \frac{2000 \times P}{(M^2 - m^2)} \cdot$$

Avec :

Q : quotient ombro-thermique d'Emberger

P : La précipitation moyenne annuelle en (mm).

M : La température maximum du mois le plus chaud en degré kelvin (°K).

m : La température minimum du mois le plus froid en degré kelvin (°K).

NOTE: $T (^{\circ}\text{K}) = T (^{\circ}\text{C}) + 273,15$

Table I.6 : Données du climagramme D'EMBERGER de Tébessa (1991-2021).

station	P(mm)	T max (°K)	T min(°K)	Q2
Tébessa	374.74	307,25	274,55	45.87

La station de Tébessa (1991–2021) enregistre en moyenne 374,7 mm de précipitations annuelles réparties sur 45,9 jours de pluie, ce qui témoigne d'un climat semi-aride où les averses sont peu fréquentes mais parfois intenses. Les températures maximales journalières moyennes atteignent 307,25 K ($\approx 34,1^{\circ}\text{C}$), reflétant des étés très chauds, tandis que les températures minimales moyennes descendent à 274,55 K ($\approx 1,4^{\circ}\text{C}$), traduisant des nuits d'hiver fraîches à froides. Cette combinaison d'une pluviométrie modérée concentrée sur un nombre limité de jours et d'une amplitude thermique marquée est caractéristique d'un climat de type transition méditerranéen–continental.

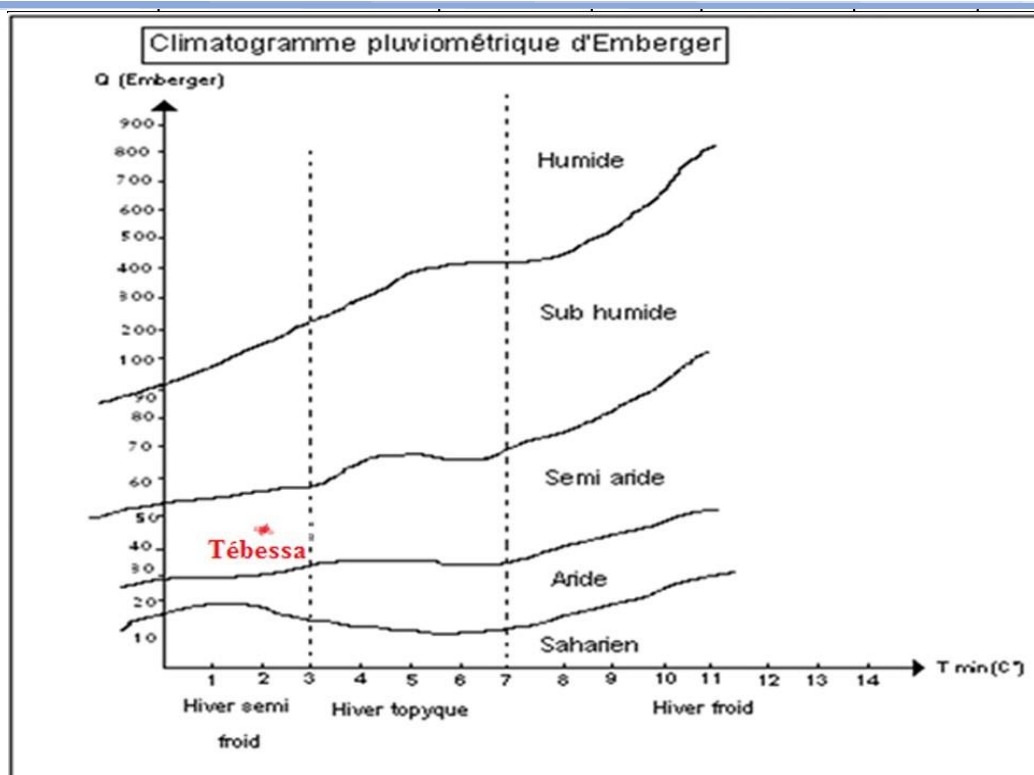


Figure I.5 : Climagramme D'EMBERGER de la région de Tébessa (Boumachrouk, 2020).

Le climagramme d'EMBERGER indique que la région de Tébessa appartient à l'étage bioclimatique semi-aride à Hiver semi-froid.

I.4. Aperçue géologique :

Les monts de Tébessa, dans l'Atlas saharien oriental, font suite aux monts Nemamcha. Cet ensemble a un seul nom, mais il est fait de différentes formes de roches. Il est entouré par le fossé tectonique Morsott-Tébessa. Quand on passe des hautes plaines du Mellègue aux monts de Tébessa, les plaines deviennent de plus en plus petites et les formes géographiques, comme les vallées du Dyr et de Bourabaia, se regroupent. Au sud, la chaîne de montagnes s'arrête soudainement avec le fossé d'effondrement de Meddoud – Aïn Chabro, qui coupe les montagnes sans être parfaitement symétrique. Les djebels Serdiess et Gourrigueur, qui ont des sommets parallèles, forment ensemble le haut synclinal du Djebel Serdiess.

Plus à l'est du Djebel Doukkane, le paysage devient plus varié et intéressant, surtout entre Tébessa et El Ma labiod, où une chaîne de montagnes s'étend d'ouest en est, puis vers le nord-est pour former la plaine de la Merdja. Dans cette zone, la chaîne de montagnes se divise en plusieurs petits massifs, comme les djebels Anoual, Azmor, Bouroumane et Djebissa.

Au nord, le fossé Chabro – Tébéssa – Bekkaria borde les massifs. Ce graben profond est caractérisé par une surface de remblais qui diminue progressivement de 900 mètres à Bekkaria à 770 mètres à Aïn Chabro (Hammamet). Il est rempli de cailloux, de sable, de marne et d'argile, sur plusieurs centaines de mètres (Benarfa, 2005).

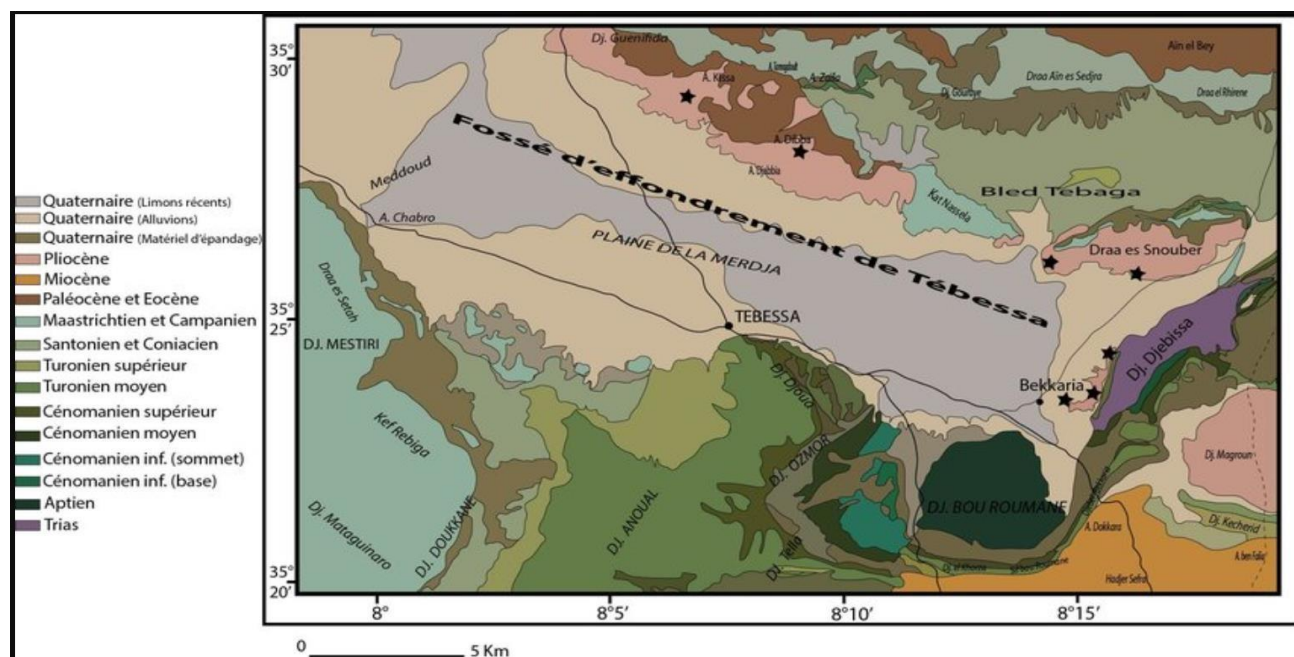


Figure I.6 : Carte Géologique de la région de Tébéssa (Degaichia. 2014)

I.5. Aperçues hydrologique et hydrogéologique :

La région d'étude qui se trouve au nord de la wilaya de Tébéssa est marquée par un réseau hydrographique bien développé avec de nombreux oueds, dont l'écoulement est temporaire. Ces oueds sont les suivants : oued Serdiess, oued Ksob, oued Boudiss, oued Bouakous et oued Chabro, ces deux derniers sont les plus importants oueds caractérisant la région. L'oued Bouakous rejoint l'oued Ksob qui se jette dans oued Méllégue, lequel s'inscrit dans le grand bassin de Medjerda. (Chikha, Debbar ,2017)

La plaine de Tébéssa est une partie de la wilaya de Tébéssa qui se caractérise par un bassin d'effondrement aux dépôts essentiellement continentaux, inséré dans la structure autochtone Nord-Aurésien (Aurès-Nememcha) et connecté à l'Atlas saharien. Cette dernière repose sur plusieurs formations sédimentaires. On observe tout d'abord un complexe diapirique triasique qui déforme les couches sus-jacentes au niveau du Djebel Djebissa. Puis, une vaste formation carbonatée crétacée, constituée de puissantes épaisseurs de calcaires marneux et de marnes visibles tout le long des bordures de la plaine. Enfin, un épais dépôt alluvionnaire mio-plio-quaternaire recouvre uniformément le fond de la plaine et s'accumule en discordance au pied des reliefs escarpés. (Hamaidia, Bekkai, 2019).

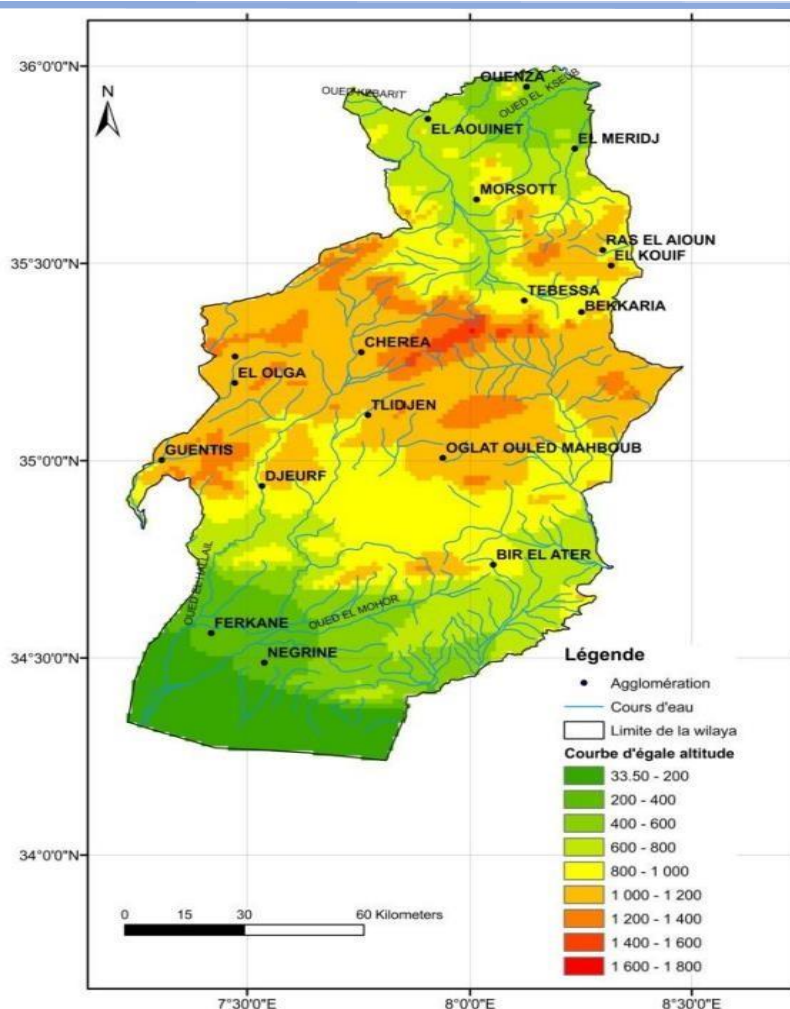


Figure I.7: Carte de relief de la région de Tébessa (Boumachrouk, 2020).

I.6. Ressources en eau de la wilaya de Tébessa :

Dans la plupart des cas, les ressources hydriques sont considérées comme l'un des principaux piliers sur lesquels s'appuie tout processus de développement économique et social. Les ressources en eau sont principalement constituées par les eaux souterraines, qui occupent une place prépondérante dans l'écosystème de cette région. Il convient de noter que les eaux superficielles sont étroitement corrélées aux précipitations atmosphériques, notamment au sein des bassins versants. (Boucetta, 2018)

Selon le (D.R.E) 2025, les ressources en eau utilisées dans la wilaya de Tébessa comprennent entre superficielles et souterraines :

- Les barrages : 02 barrages et 1 petite barrage.
- Les forages : 298 forages dans la zone de Tébessa.
- Les sources : 43 sources.

I.6.1. Ressources en eaux de surface :

D'après la direction des ressources en eau Tébessa (D.R.E) 2025, il y a deux grands barrages (barrage Saf-Saf et barrage Oueldjet- Mellegue)

Le barrage SAF-SAF, sur l'oued Saf-Saf dans la région de Tébessa, a été mis en service en 2017. Il peut stocker plus de 5 hm³ sur 19,5 hm³ de capacité initiale malgré une surface de 1 348 km². Tout est orienté vers l'AEP.

Le barrage Oueldjet Mellegue, mis en service officiellement en avril 2021 après réception définitive en 2017, et implanté à cheval sur les wilayas de Tébessa (22 %) et Souk-Ahras (78 %), à proximité de la commune d'Ouenza. Son bassin versant de 4 350 km² alimente un réservoir dont la capacité initiale et actuelle est de 160 hm³, avec un niveau normal de retenue fixé à 575,50 m NGA et un seuil minimal d'exploitation à 560,00 m NGA.

L'apport moyen interannuel s'élève à 67 hm³, dont près de 38,8 hm³/an peuvent être régularisés pour l'alimentation en eau potable et les usages industriels (AEP-IND).

La région de Tébessa est drainée par des nombreux oueds qui sont : oued Ezzitoune, oued Mizeb, oued Mraghdia, oued Chabro, oued Segui, oued El Bey, oued Ras El Ayoun, oued Elksob, mais les grands oueds sont :

-oued Zaarour: avec une longueur de 5,800 km, le cours d'eau collecte les eaux pluviales provenant des hauteurs environnantes, facilitant l'évacuation des excès d'eau vers l'oued El-Kébir.

-oued Nague: avec une longueur de 8,140 km, ce cours d'eau prend sa source dans les hauteurs du Djebel Doukan 1718 mètres et couvre environ 26,55 Km².

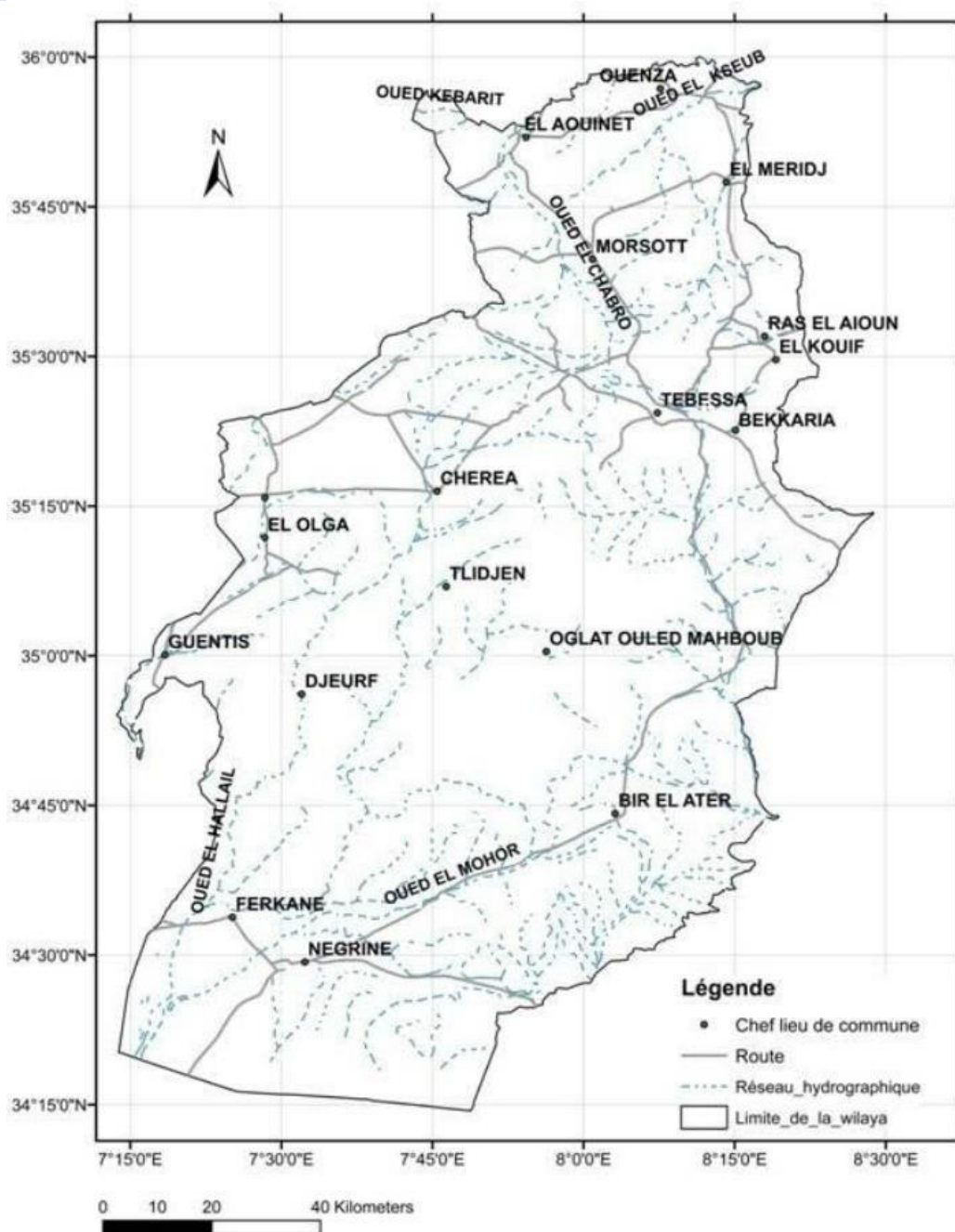
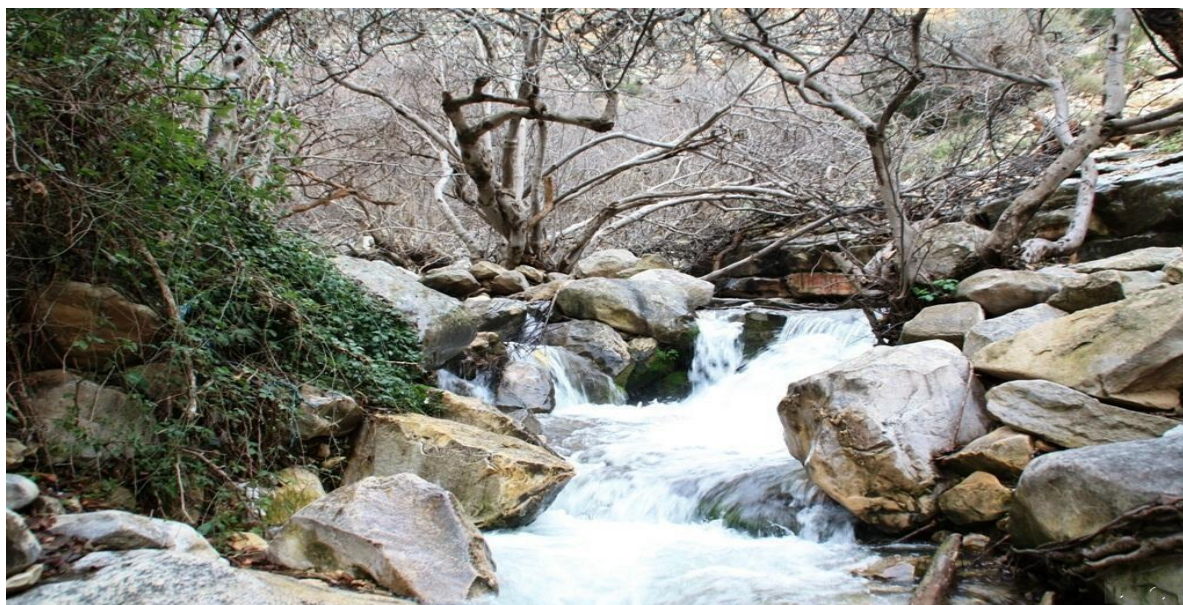


Figure I.8: Réseau hydrographique des plaines de la région d'étude.

La wilaya possède également de nombreuses sources naturelles, dont certaines sont répertoriées dans le tableau suivant :

Table I.7: les plus importantes sources naturelles de la wilaya de Tébessa (D.R.E 2025)

Nom du source	Débit estimé (l/s)
Ain Sari	0.6
Ain Ennba	0.51
Ain El Mizeb 01	0.88
Ain El Mizeb 02	0.71
Ain El Mizeb 03	0.62
Ain Tnoukla	1.5
El Khanga	01
Ain Chouhada	0.3
Ain Gaagaa	0.5
Ain Kamlal	02
Gastel	01
Bousamène	02
Ain El Karma	01
Ain Tamrouzite	03
Ain Fourissa	02
Ain Ghorab	0.125
Youkous	04

**Figure I.9:** la source en eau « YOUKOUS » Tébessa

I.6.2. Ressources en eaux souterrain :

Selon la (D.R.E) 2025, la wilaya de Tébessa se distingue par la présence de ressources en eau souterraines conséquentes, il convient de noter que ces unités aquifères sont représentées par des entités distinctes, on dénombre :

- Miocène (et variantes mixtes Miocène–Maastrichtien).
- Maastrichtien pur.
- Quaternaire (parfois associé au Maastrichtien).
- Éocène.
- Turonien.
- Cénomane.
- Calcaire, ainsi que quelques séries mixtes (Quaternaire + Éocène, Miocène + Éocène, etc.).

Dans le cadre de l'étude menée sur les ressources en eau de la région, il a été recensé 298 forages dans la Wilaya de Tébessa, on dénombre :

- 180 forages exploités (soit 61 % du total),
- 44 abandonnés (15 %),
- 18 non exploités (6 %),
- 25 à l'arrêt (8 %),
- 31 dont l'état n'est pas renseigné (10 %).

Le débit total des forages exploités seulement atteint 1756 m³/h.

En outre, une répartition des usages largement dominée peut-être observée où :

- L'alimentation en eau potable (AEP) est prépondérante, représentant environ 66 % des forages.
- Dans le contexte de l'exploitation agricole, l'industrie et l'irrigation représentent des activités qui occupent une part marginale. Il ressort de cette analyse que ces deux secteurs représentent respectivement 2,7 % et 1,7 %.
- Une analyse approfondie des données recueillies a révélé que près de 28 % des fiches examinées ne présentaient pas d'usage clairement renseigné.

I.6.3. Ressources en eaux non conventionnelles :

Dans le cas présent, l'étude menée sur la région a permis d'identifier la station d'épuration de Tébessa (Ain Zerroug) qui peut être la seule source d'eau non conventionnelle si on utilise ces eaux usées épurées pour l'irrigation ou même la recharge des nappes souterraines.

Cette infrastructure joue un rôle essentiel dans la gestion des eaux usées générées par les habitats de la ville de Tébessa, en contribuant à leur réutilisation et à leur valorisation (Tahar, 2024).

Une analyse approfondie des disponibilités en eaux épurées à divers stades de développement a été conduite, dont les résultats sont présentés dans le tableau ci-après :

Table I.8: Production d'eaux usées à différents horizons (ONA Tébessa).

horizon	2022	2025	2030
Rejets (m ³ /J)	6 009	38 188	48 000
Volumes annuels (m ³)	2 193 285	13 938 620	17 520 000
Production brute annuelle d'eaux usées (m ³)	1 864 292.25	11 847 827	14 892 000

L'analyse des données présentées dans ce tableau permet de mettre en évidence l'importance de la gestion des eaux usées. En effet, celles-ci sont réutilisées pour l'irrigation des terres agricoles situées à proximité. Cette initiative revêt une importance cruciale dans le cadre de la lutte contre la sécheresse et s'inscrit comme une solution d'adaptation au changement climatique.



Figure I.10 : station d'épuration (Ain Zerroug) Tébessa

Une autre station d'épuration (station biologique) ; a été conçue pour traiter les rejets de l'agglomération d'Oum Ali. Sa capacité de traitement est estimée à 120 m³ par jour. Le but de ce projet est de permettre la réutilisation locale des eaux traitées à des fins d'irrigation et de recharge des nappes phréatiques.

L'installation, localisée à proximité immédiate d'Oum Ali, est conçue pour traiter un volume d'environ 171 m³/j. Son exploitation s'inscrit dans une démarche de valorisation agricole des eaux épurées à Saf-Saf El Ouesra, en suivant des principes de l'agriculture biologique. (<https://www.horizons.dz/?p=51642&utm>).

I. Conclusion :

En conclusion, l'analyse de la zone naturelle de Tébessa révèle les caractéristiques d'une région avec un climat semi-aride continental caractérisé par de fortes amplitudes thermiques, une faible précipitation concentrée au printemps et à l'automne, ainsi qu'une humidité relative et un point de rosée conditionnés par ces mêmes cycles saisonniers. Dans le cadre de l'étude des phénomènes climatiques et de leur impact, il est essentiel de comprendre les interactions entre les vents et la circulation atmosphérique.

En effet, l'analyse des données météorologiques révèle une alternance entre des flux humides en provenance de l'ouest-nord-ouest, favorisant les précipitations durant la période hivernale et printanière, et des courants de sirocco, caractérisés par un assèchement de l'atmosphère durant la saison estivale.

Les ressources hydriques de la wilaya de Tébessa sont diversifiées mais restent insuffisantes pour une zone connue par les activités agricoles et industriels

La wilaya de Tébessa est devant un défi lié à la gestion de l'eau avec les ressources hydrique qu'elle possède ; on peut ajouter d'autres sources non conventionnelles en période humide ; la récupération de l'eau atmosphérique en choisissant le bon procédé approprié à la condition de cette zone. Les procédés de la production de l'eau par condensation de l'eau atmosphérique sont expliqués dans les prochains chapitres.

Chapitre II : Le cycle hydrologique et la production d'eau à partir l'humidité de l'air

III. Introduction :

L'eau est la substance la plus abondante à la surface de la Terre. Elle constitue le principal composant de tous les êtres vivants et joue un rôle fondamental dans le façonnement de la surface terrestre, la régulation du climat et la condition même de l'existence humaine. Depuis son apparition, il y a environ 3 à 4 milliards d'années, l'eau circule en un cycle perpétuel entre la Terre et l'atmosphère. Bien que son volume global soit demeuré relativement stable, elle subit des transformations constantes et se déplace continuellement entre l'atmosphère, la surface terrestre et le sous-sol. (Salehi et al., 2020)

Dans le cadre de cette étude, l'hydrologie, à savoir la science qui se consacre à l'étude de toutes les phases de l'eau sur notre planète, revêt une importance cruciale. Cette approche interdisciplinaire ne se limite pas à l'étude de la distribution, de la circulation et des propriétés physiques de l'eau, mais s'étend également à son interaction avec l'environnement et les êtres vivants, notamment les humains. L'hydrologie appliquée joue un rôle crucial dans la gestion des ressources hydriques, que ce soit pour l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation, la prévention des inondations, la production d'énergie hydroélectrique, ou encore la lutte contre l'érosion et la pollution.

À l'heure actuelle, la raréfaction de l'eau douce représente une menace significative à l'échelle mondiale, amplifiée par les activités humaines telles que la déforestation, l'urbanisation, l'agriculture intensive, la surexploitation des nappes phréatiques ou la pollution des milieux aquatiques. Dans le contexte des enjeux actuels, il apparaît impératif d'adopter des approches durables et d'explorer des technologies innovantes. Parmi ces solutions, certaines s'inspirent directement du cycle naturel de l'eau, comme les dispositifs permettant d'extraire de l'eau à partir de l'humidité de l'air ambiant. Ces innovations ouvrent de nouvelles perspectives pour faire face à la crise de l'eau. (Chow et al., 1988)

II.2. Le cycle hydrologique :

L'eau de la Terre est soumise à un cycle hydrologique dynamique. Ce dernier se caractérise par des processus d'évaporation, de sublimation, de transport atmosphérique et de dépôt par condensation ou congélation. Ces processus sont à l'origine de la conversion et de la redistribution constantes de l'eau salée et de l'eau douce à l'échelle planétaire. Chaque année, ce transport déplace approximativement 45 500 milliards de tonnes métriques (btm) d'eau. Néanmoins, le temps de séjour de cette dernière varie considérablement en fonction des réservoirs. En effet, il est d'environ 9 jours dans l'atmosphère, et de plusieurs milliers d'années dans les océans, les mers et les lacs souterrains. Une analyse approfondie des réserves d'eau douce non salée dans l'environnement révèle une répartition significative entre les différents habitats. En effet, 67,4 % de cette eau se trouve dans les lacs, 12,2 % dans les sols, 8,5 % dans les marécages, 1,6 % dans les rivières, **9,6 % dans la vapeur d'eau atmosphérique** et seulement 0,8 % dans les organismes vivants.

La pénurie d'eau dans certaines régions ne reflète donc pas un manque global, mais une répartition inégale des flux hydrologiques par rapport aux besoins locaux.

On estime le volume d'eau sur terre, à environ 1 400 millions de km³, 97 % étant constitué par l'eau salée des océans et des mers. L'eau douce, quant à elle, est en grande partie emprisonnée sous forme de glace dans les calottes glaciaires et les glaciers. On la trouve également dans les lacs, les cours d'eau et les nappes phréatiques. Enfin, l'eau est présente en très faible quantité, sous forme de vapeur d'eau, dans l'atmosphère et la biosphère (Robin et al, 2020).

Le cycle hydrologique, également connu sous le nom de cycle de l'eau, décrit le mouvement continu et cyclique de l'eau sur, dans et au-dessus de la surface de la Terre. Ce processus comprend plusieurs étapes interconnectées :

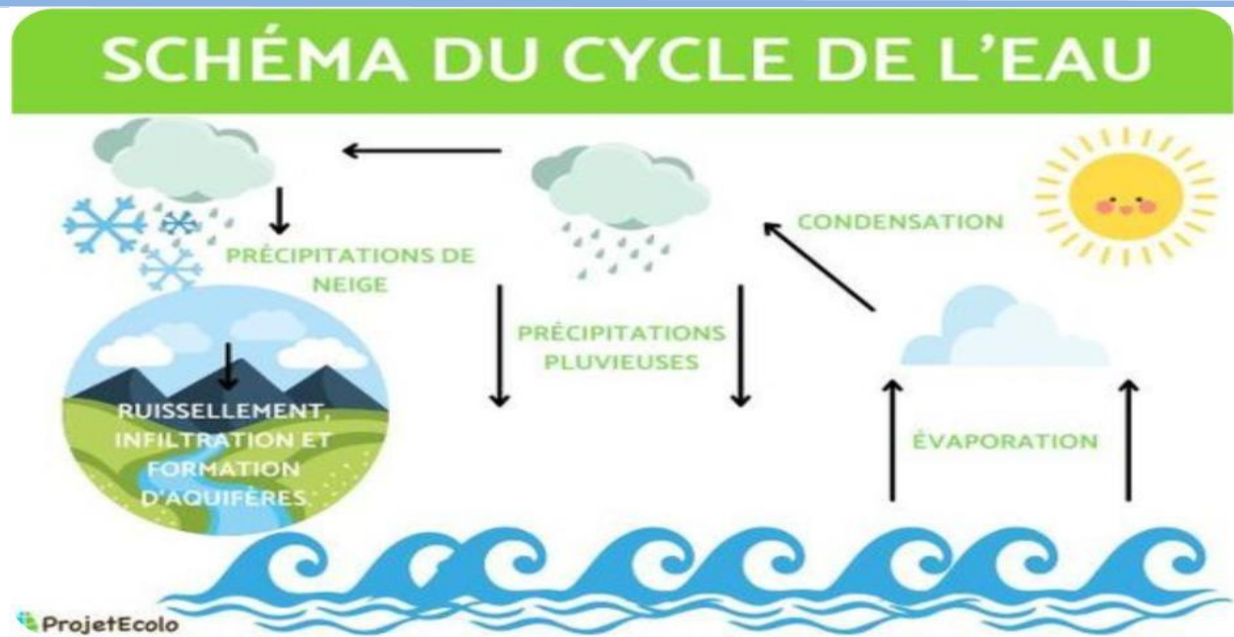


Figure II.1: schéma du cycle hydrologique (<https://www.projetecolo.com/>).

II.3. Les composantes du cycle hydrologique

II.3.1. L'évapotranspiration :

L'évapotranspiration est un terme essentiel à la compréhension du cycle hydrique. Ce phénomène, qui est à la fois physique et biologique, résulte de l'interaction de divers facteurs environnementaux, notamment l'humidité, la température, l'insolation et le couvert végétal. Ainsi, l'évaporation, qui est la phase de transfert de l'eau vers l'air en changeant de l'état liquide à l'état gazeux, et la transpiration, qui correspond à la perte d'eau par les plantes sous forme de vapeur, sont deux processus indissociables (Belloula, 2017).

II.3.2. La condensation :

Le processus de condensation est celui par lequel la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère passe de l'état gazeux à l'état liquide par effet de refroidissement. Il est responsable de la formation des nuages lorsque la vapeur d'eau ascendante vient rencontrer des masses d'air froid en altitude. Néanmoins, la condensation ne se produit pas uniquement à l'échelle de l'atmosphère, elle est également observable au sol. En pleine saison estival par temps clair, la rosée se présente sous forme de gouttelettes d'eau déposées sous forme de rosée sur le feuillage et du givre en hiver, qui résulte de la solidification directe de la vapeur d'eau en cristaux de glace ; c'est cette composante qui nous intéresse en la réalisant expérimentalement.

II.3.3. Les précipitations :

Dans le cadre de cette étude, il est essentiel de comprendre que l'ensemble des eaux qui subissent un processus de condensation au sein de l'atmosphère et qui se déposent ensuite sur la surface terrestre. Ainsi, les précipitations telles que la pluie, la neige, la grêle, ainsi que les phénomènes atmosphériques comme le brouillard ou la rosée, sont des exemples pertinents à prendre en compte dans le cadre de cette recherche. La pluie a une importance de premier ordre et c'est de la quantité d'eau atteignant le sol ou pluviosité que dépend normalement l'approvisionnement en eau des plantes. Cette quantité d'eau évaluée en millimètres, soit par mois, soit par année, s'appelle la tranche pluviométrique (Boudy, 1952).

II.3.4. Le ruissellement :

Le ruissellement c'est la séquence qui suit les précipitations, c'est-à-dire la circulation de l'eau en surface des sols, après précipitation. Le ruissellement arrose directement les mers ou océans, bouclant ainsi le cycle hydrologique. La terre émergée connaît des comportements variés, pour une fraction de l'eau tombée, sa part végétale qui est captée par les racines des végétaux, et l'autre fraction ruisselle ou pénètre sous la surface dans les roches perméables ou dans les nappes phréatiques. L'eau de surface va rejoindre à terme les cours d'eau, ruisseaux, rivières ou fleuves qui à leur tour rejoindront la mer ou l'océan, un nouveau cycle est ainsi lancé.

II.3.5. L'infiltration :

Définie comme le mouvement de l'eau à travers la surface du sol vers son profil, est essentielle pour recharger les réserves d'eau souterraine et fournir l'humidité nécessaire à la végétation. Bien que souvent confondus avec la percolation, qui désigne spécifiquement la circulation de l'eau au sein du sol, ces termes diffèrent : l'infiltration correspond à l'entrée de l'eau à la surface, tandis que la percolation décrit son déplacement en profondeur. Le taux d'infiltration, mesurant la quantité d'eau absorbée par unité de temps, est influencé par des facteurs tels que la texture du sol, sa couverture végétale, son humidité, sa température, ainsi que le type et l'intensité des précipitations). Lorsque l'intensité des pluies dépasse cette capacité, un ruissellement superficiel se produit, limitant l'absorption par le sol.

II.3.6. La circulation souterraine :

C'est-à-dire le cheminement de l'eau à travers les couches du sol et du sous-sol. Une partie de cette eau infiltrée va se déverser progressivement dans un cours d'eau à la surface, assurant ainsi le renouvellement des rivières, lacs et fleuves. En revanche, quand l'infiltration est importante et que l'eau est accumulée dans des formations géologiques perméables, elle forme une nappe phréatique. Cette réserve souterraine étant protégée des contaminations de surface, elle est en outre filtrée par les roches, ce qui en fait une ressource en eau de qualité. C'est pourquoi elle est exploitée pour toute une série d'usages, notamment pour la consommation humaine, mais aussi à des fins agricoles ou industrielles, au moyen de puits ou forages (Ministère de l'écologie, du développement durable et du l'Energie).

II.3.7. Le point rosé :

L'aéroport de Constantine est à 167 kilomètres de Tébessa, le climat réel à Tébessa peut donc varier un peu, basé sur les rapports météorologiques recueillis entre 1992 et 2021 (timeanddate.com) :

Table II.1 : Le point de rosée moyen mensuel entre 1991 et 2021 (timeanddate.com)

moi	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
P.R(°C)	2,8	3,3	5,0	7,2	10	11,7	12,8	13,3	13,3	10,6	6,7	4,4

Le point de rosée moyen mensuel à Tébessa (1992–2021) reflète clairement les variations saisonnières de l'humidité atmosphérique, avec des valeurs allant de 2,8°C en janvier à 13,3°C en août et septembre. En été, malgré des températures élevées et une faible humidité relative, le point de rosée reste modéré, tandis qu'à l'automne, la chaleur persistante et la reprise des pluies maintiennent des niveaux élevés. En hiver, les points de rosée bas traduisent un air froid saturé mais peu chargé en vapeur d'eau. Ces variations confirment le climat semi-aride de la région, où l'interaction entre température et humidité influence les phénomènes de condensation et peut avoir un impact sur les cultures et la gestion de l'eau.

(<https://www.timeanddate.com/weather/%402477461/climate>)

II.4. La rosée, source d'eau potable :

II.4.1. La formation de rosée :

Lorsque l'on aborde le modèle de production de rosée, nous avons vu que la description du phénomène de condensation sur une surface (buée) ne suffisait plus dès que les systèmes étudiés sortent de cas simples aux corrélations empiriques prédéfinies (surface verticale ou horizontale). Il faut rapidement tenir compte du fonctionnement thermodynamique du système dans son ensemble. La formation de rosée, voire de givre, concerne la condensation de vapeur d'eau atmosphérique en milieu extérieur. Pour un condenseur donné (végétal, canopée particulière ou condenseur artificiel de forme donnée), l'intensité de la condensation dépend des paramètres météorologiques observés sur le site : température ambiante T_a (en $^{\circ}\text{C}$), température de rosée T_d (en $^{\circ}\text{C}$ ou en fonction de l'humidité relative RH en %), couverture nuageuse N (octas) et vitesse du vent V (en ms^{-1}). (Nikolayev et al., 2001)



Figure II.2: Formation de la rosée dans la nature

II.4.2. Les condenseurs de rosée :

Quand il fait froid, l'air devient humide, quand il fait 20°C et qu'il y a 50 % d'humidité dans l'air, la température de rosée est de 10°C (voir la figure II.3). Au-dessus de ce seuil, l'eau en trop se transforme en liquide. La rosée se forme sur le condenseur quand sa température est plus basse que celle de l'air ambiant la nuit. La rosée apparaît quand il y a des conditions climatiques et géographiques favorables. Il faut juste que l'air soit un peu humide et que le ciel soit dégagé. Il y a beaucoup de pays chauds où l'eau est rare. Mais parfois, il y a beaucoup de vapeur d'eau dans l'air. Cela pourrait aider beaucoup de régions du monde à avoir assez d'eau potable. Même les pays chauds ont de l'eau dans leur atmosphère. Dans le Sahel, il ne pleut

presque jamais. Mais l'air est très humide à cause des vents de mousson (Beysens et al., 2000).

Les techniques de récupération de l'eau contenue dans l'air sous forme de vapeur se développent ainsi. Il suffit que la température d'un substrat descende en dessous de la température de rosée, c'est-à-dire le point où la vapeur d'eau est sursaturée et se transforme en eau liquide, comme expliqué plus haut (Lekouch, 2010).

Il existe deux grandes catégories de condenseurs de rosée :

Les massifs conçus pour atteindre une grande chaleur spécifique, ce qui permet de maintenir leur température la plus constante possible malgré l'apport de chaleur latente de condensation.

Les radiatifs sont légers et thermiquement isolés, de sorte que l'énergie de refroidissement radiatif ne sert idéalement qu'à compenser l'apport de chaleur latente.

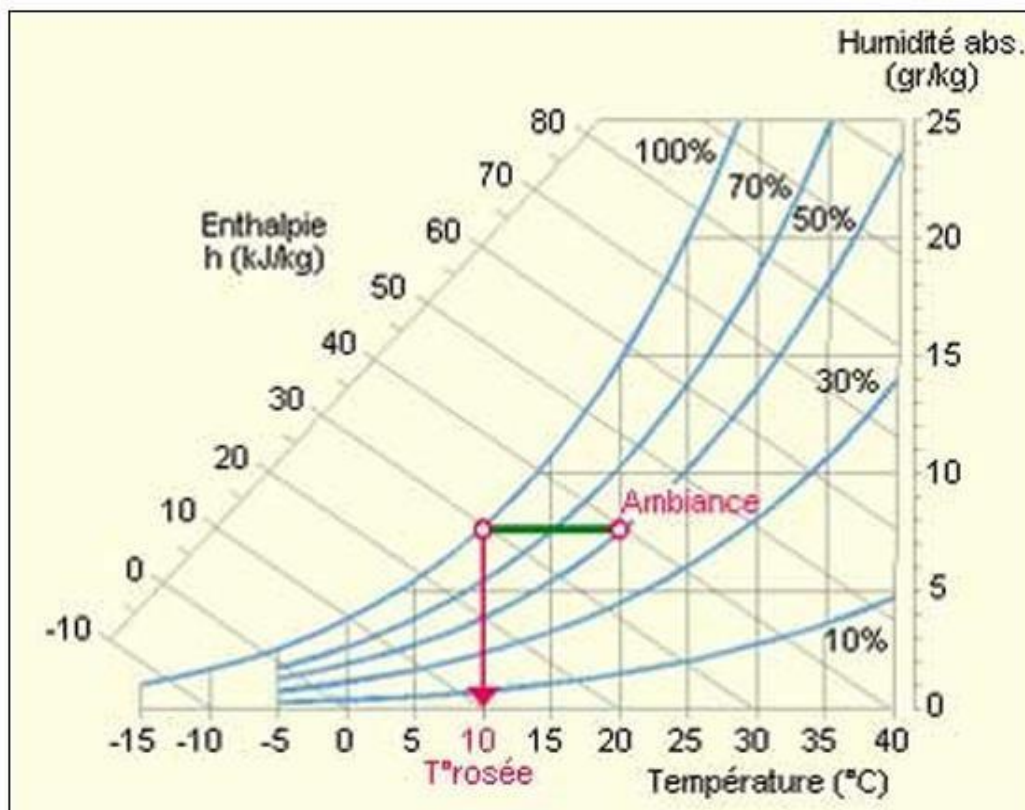


Figure II.3: Diagramme de l'air humide. (Lekouch, 2010).

II.5. La formation du brouillard :

Le brouillard, une nappe d'hydrométéores composée de microgouttelettes d'eau en suspension dans l'air, est souvent décrite comme un nuage bas dont la base touche le sol (Gioda et al., 1991, 1992). Il se classe en quatre catégories principales :



Figure II.4: la formation de brouillard (la chaîne météo)

<https://meteo42.jimdofree.com/le-saviez-vous/article-6-le-brouillard/>

II.5.1. Brouillard de rayonnement :

Généré par un refroidissement nocturne sous ciel clair et vent faible, il résulte du rayonnement thermique du sol, qui abaisse la température des basses couches atmosphériques. Cette diminution réduit la pression de saturation de l'air, provoquant la condensation de la vapeur d'eau en gouttelettes. Typique des zones continentales, il se dissipe généralement avec le réchauffement diurne.

II.5.2. Brouillard d'advection :

Il se forme lorsque de l'air chaud et humide glisse sur une surface froide (océan, sol gelé), entraînant un refroidissement par la base et une condensation partielle de l'humidité. Fréquent en milieu marin.

II.5.3. Brouillard d'évaporation :

Apparaît quand une masse d'air froid circule au-dessus d'une surface chaude et humide (étang, rivière). L'évaporation intense sature l'air, conduisant à la condensation et à la formation de brouillard.

II.5.4. Brouillard de mélange :

Résulte du brassage de deux masses d'air aux températures et humidités distinctes mais proches de la saturation, créant un air saturé.

La formation du brouillard suit trois phases : formation, développement et dissipation. Durant la maturation, le brouillard interagit avec son environnement via :

- Un refroidissement radiatif à son sommet.
- Une diffusion turbulente (mélange d'air).
- La sédimentation des gouttelettes (dépôt vers le sol).

La dissipation survient lorsque le réchauffement solaire interrompt le refroidissement au sommet ou lorsque le sol absorbe la chaleur, évaporant le brouillard par la base.

Ce phénomène, rare et localisé, nécessite des conditions climatiques spécifiques : zones côtières (brouillards maritimes) ou îles océaniques dominées par une mer de nuages). Dans les régions arides, l'eau du brouillard est exploitée via des systèmes de collecte mécanique des gouttelettes. Aux îles Canaries, par exemple, les Arbres Fontaines captent naturellement cette ressource, illustrant une symbiose entre écologie et utilisation humaine (Gioda et al., 1991, 1992).

II.6. Conclusion :

Le cycle hydrologique, qui se définit comme un processus continu et dynamique, est un élément crucial pour préserver l'équilibre environnemental et favoriser le développement humain. Il est essentiel de comprendre que le cycle de l'eau est un processus vital pour l'environnement et le développement humain. Il assure la redistribution de l'eau entre l'atmosphère, la surface terrestre et le sous-sol, garantissant ainsi l'accès aux ressources en eau douce. En effet, sans cette ressource, la vie telle qu'on la connaît aujourd'hui serait grandement compromise, et les activités socio-économiques subiraient de lourdes conséquences (Ward et Robinson, 2000). Les recherches en hydrologie appliquée ont permis d'approfondir les connaissances scientifiques en permettant une meilleure compréhension des processus physiques sous-jacents à l'évaporation, la précipitation, l'infiltration et le ruissellement. Ces avancées ont mené au développement d'outils de mesure et de gestion. Ces outils sont fiables. Ils sont essentiels pour la conception d'infrastructures hydrauliques. Ils sont également essentiels pour la gestion de la qualité et de la quantité de l'eau. Ils servent aussi à la prévention des risques naturels. Ces risques naturels comprennent les inondations et les sécheresses. (Chow et al., 1988 ; OMM, 2012).

Une connaissance approfondie de ce cycle s'avère indispensable pour anticiper et atténuer les enjeux futurs relatifs à la disponibilité et à la qualité de l'eau, mais également pour soutenir une gestion éclairée des ressources hydriques à l'échelle planétaire ; notamment pour une production de l'eau à partir de l'humidité de l'air qui devient une technique utilisée et se développe avec le temps pour le généraliser dans les pays qui souffrent de stress hydrique.

Chapitre III : Les différents procédés de production d'eau à partir de l'humidité de l'air

III.1. Introduction :

L'extraction d'eau à partir de la vapeur d'eau atmosphérique constitue une solution potentielle pour pallier les pénuries de ressources hydriques. Il est admis que l'atmosphère renferme plus de $(12,9 \times 10^{12})$ mètres cubes d'eau renouvelable. Cette estimation dépasse la quantité totale d'eau douce disponible dans les marais, les zones humides et les cours d'eau de la terre (Qadir et al 2014).

Depuis plusieurs décennies la production d'eau potable à partir de l'eau contenue dans le brouillard et les nuages a été à la source de projets de recherches. Ainsi, l'effet d'interception horizontale a été mis en évidence expérimentalement en 1956 (J.F. Nagel, 1956). Le Chili est un lieu où le brouillard est stable tout au long de l'année. Le premier projet expérimental moderne de ce procédé a lieu en 1989 au mont El Tofo au nord du Chili où les premiers filets à brouillard ont été installés, Il existe d'autre tentative pendant le siècle précédent. A partir des années 2000 il existe d'autre procédé et techniques passive par exemple : le Warka Tower conçue et expérimenté par ; Arturo Vittori architecte italien Tout commence en 2012 en Ethiopie sa tour de bambou est capable de capturer l'humidité de l'air (Gueddouh. 2024)

Dans ce chapitre nous allons présenter des généralités sur quelques procédées qui sont appliquées pour la récupération de l'eau atmosphérique soit de manière passive ou active car l'utilisation de l'énergie est un point déterminent du rendement de ces procédés de point de vue technique et économique.

III.2. Les techniques de la récupération de l'eau atmosphérique :

Dans le secteur de la production d'eau, il est essentiel de comprendre les différentes méthodes disponibles. L'extraction de l'eau du brouillard et l'utilisation de générateurs d'air-eau, qui impliquent divers cycles de processus tels que la compression de vapeur, la compression d'air, le refroidissement Peltier et le séchage, sont des exemples de technologies employées (Salehi et al, 2020).

III.2.1. La récupération des eaux de l'aire en utilisant les vents :

Le procédé est fondé sur la condensation de l'humidité atmosphérique, selon un principe qui s'apparente à celui d'un climatiseur. L'électricité générée par une éolienne est utilisée pour alimenter un système de refroidissement, induisant ainsi la condensation de la vapeur d'eau présente dans l'air. L'innovation réside dans l'exploitation de ce mécanisme pour la production d'eau potable, plutôt que pour un usage thermique conventionnel.

L'éolienne WMS (Water Making System) d'Eole Water® est composée de plusieurs éléments qui lui permettent de capter l'air ambiant, de le refroidir via des plaques thermiques, et de condenser l'humidité en eau. Celle-ci est ensuite stockée dans un réservoir. Conçue pour des régions caractérisées par une forte humidité et des vents constants, une unité WMS est capable de générer jusqu'à 1 000 litres d'eau par jour dans des conditions optimales. Le système, qui est autonome et ne produit aucun déchet, est alimenté exclusivement par l'énergie éolienne. Cette caractéristique garantit l'absence d'impact environnemental.

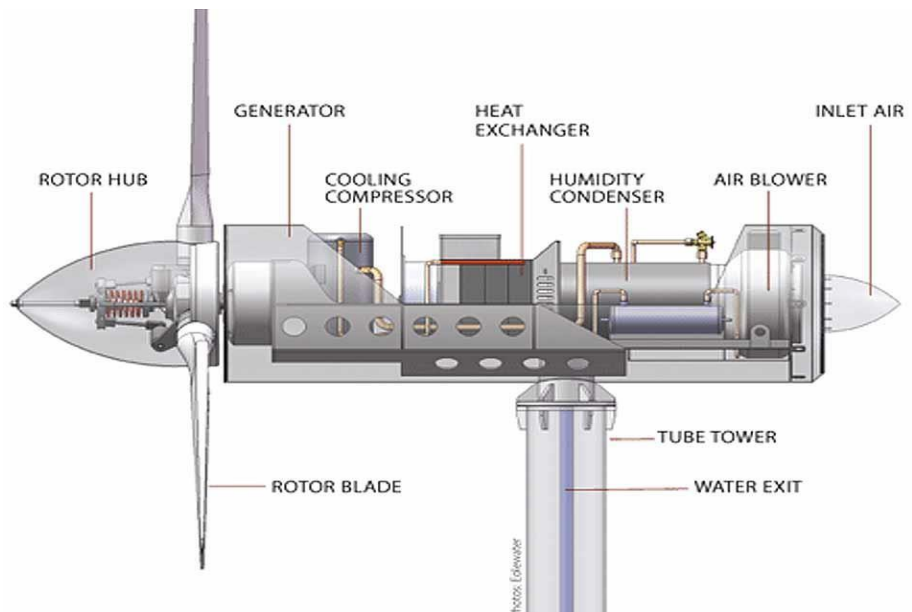


Figure III.1: Le fonctionnement de l'éolienne (WMS de Eole Water®)

Le vent est comme une rivière, il est important de noter que si un individu rejette dans l'air un pesticide ou tout autre substance chimique, cette dernière sera transportée par le vent sur des kilomètres.

Il est impossible de déterminer avec certitude la qualité de l'air à un emplacement donné, ce qui conduit à une gestion proactive de la situation.

En l'absence de garanties absolues concernant la pureté de l'eau extraite de l'air, la WMS est dotée d'un système de filtration avancé visant à éliminer toutes les impuretés. Dans le cadre de l'installation du système de production d'eau brute, les filtres sont positionnés à l'origine du processus de traitement. Cette eau brute, qui ne subit aucune modification, est comparable à celle extraite des puits, et ce, en raison de sa pureté initiale.

(http://www.wipo.int/wipo_magazine/fr/2010/04/article_0005.html)



Figure III.2: L'hydrolienne éole

III.2.2. Production d'eau avec brouillard :

La production d'eau à partir du brouillard repose sur une technique ingénieuse qui consiste à capter les gouttelettes d'eau en suspension dans l'air. On utilise principalement les méthodes suivantes :

Les filets capteurs de brouillard sont une méthode ingénieuse permettant de récupérer l'eau contenue dans l'air sous forme de brouillard. Cette technique est particulièrement utile dans les régions arides où les précipitations sont rares. Cette technique repose sur des filets en polypropylène tendus entre des poteaux verticaux, placés perpendiculairement aux vents dominants et c'est structuré se déclinent en une variété de formes et de dimensions, mais toutes

concourent à un objectif commun est-il accroître la surface de contact avec le brouillard et optimiser la capture des gouttelettes.

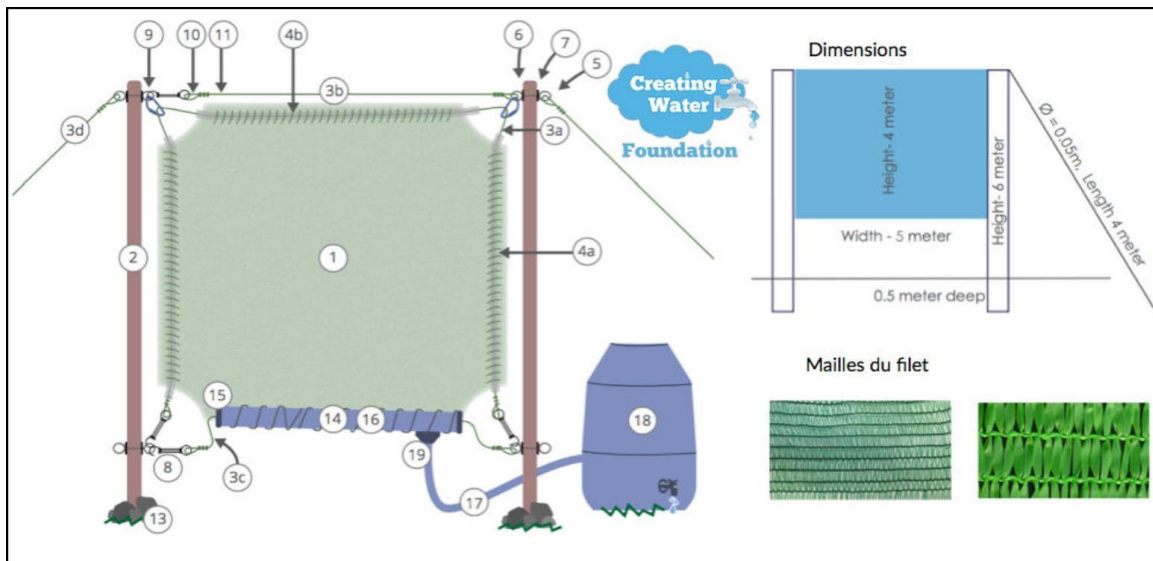


Figure III.3: Des capteurs de brouillard pour produire de l'eau

Lorsque le brouillard traverse ces filets, les gouttelettes d'eau se condensent sur les mailles et s'écoulent vers des gouttières qui les dirigent vers un réservoir de stockage. Ce procédé, redécouvert à la fin du XXe siècle, a été mis en œuvre avec succès dans plusieurs pays comme le Chili, le Népal et Oman, où il permet de fournir de l'eau potable aux populations locales. En moyenne, un filet peut produire entre 3 et 15 litres d'eau par mètre carré et par jour, voire jusqu'à 50 litres dans des conditions optimales. Bien que cette technologie soit simple à installer et à entretenir, elle nécessite des conditions climatiques spécifiques et une implication active des communautés locales pour assurer son efficacité et sa durabilité.

(<https://wikiwater.fr/e5-water-recovery-by-condensation>)

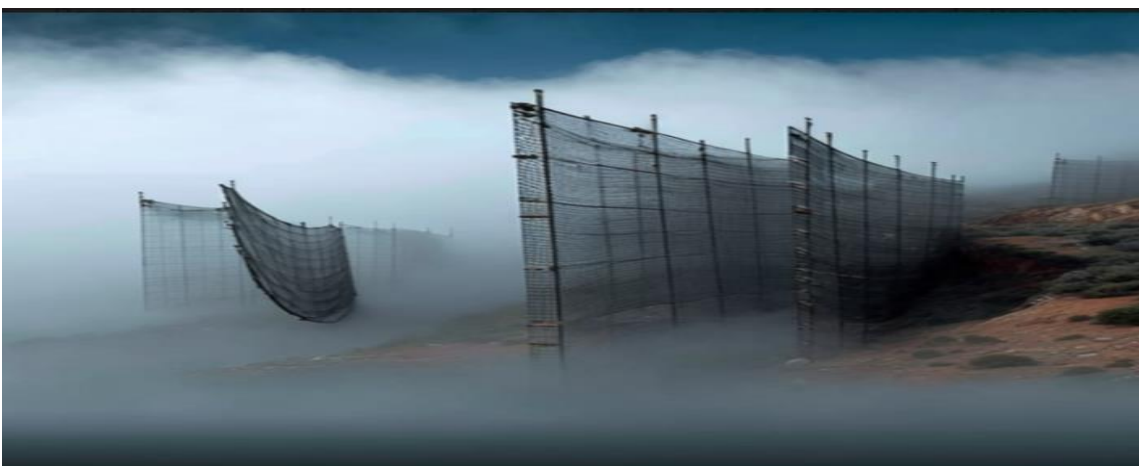


Figure III.4 : Les capteur de brouillard au Maroc (Lekouche. 2010)

III.2.3. Production d'eau avec des structures naturelles :

La condensation naturelle sur les feuilles d'arbres est un phénomène physique qui se produit lorsque la température de l'air ambiant, due à la dissipation thermique des surfaces foliaires, descend en dessous de son point de rosée. Ce refroidissement nocturne ou matinal des feuilles provoque la condensation de la vapeur d'eau en gouttelettes. Ce phénomène est amplifié par des conditions telles que les nuits claires, l'humidité élevée, et la structure des feuilles (cuticule cireuse ou poils réduisant la tension superficielle). Il joue un rôle écologique majeur en procurant une source d'eau pour les plantes désertiques, notamment les Tillandsia ou les Broméliacées, qui absorbent directement la rosée par l'intermédiaire de leurs feuilles, ou en contribuant à l'hydratation des écosystèmes arides et des sous-bois humides. Des recherches ont mis en évidence son rôle crucial dans l'équilibre hydrique des végétaux et la formation des micro-habitats.



Figure III.5 : les plantes de Tillandsia et Broméliacées

En outre, des publications spécialisées telles que Plant Physiologie fournissent des informations détaillées sur les processus physiologiques sous-jacents. Ce processus met en exergue l'adaptation des plantes aux contraintes environnementales et leur contribution aux cycles hydrologiques locaux (Taiz et al, 2015).



Figure III.5 : condensation du brouillard sur les feuilles d'arbre (Google image, 2025)

III.2.4. Production d'eau avec condensation souterraine :

Le principe général des méthodes de condensation utilisant le sol est le suivant : l'air humide est condensé en le transférant de la surface du sol vers des canalisations souterraines. Le sol étant plus frais que la surface, il agit comme un condenseur. L'eau ainsi obtenue peut-être utilisée pour l'eau potable et l'irrigation des terres agricoles. Les canalisations non perforées sont utilisées pour l'eau potable et sont équipées d'un point de collecte à leur extrémité, tandis que les canalisations perforées sont utilisées pour l'irrigation. L'eau douce produite pénètre directement dans le sol par les trous, comme pour l'irrigation goutte à goutte. Cela minimise la consommation d'eau et élimine les pertes par évaporation. (Lindblom et al) en 2006 utilisaient cette méthode et ont produit en moyenne 3,2 kg d'eau par m² et par jour à une température de 60 °C et une humidité relative de 70 %. À mesure que la température augmente au cours des mois, le rapport chaleur/humidité humide (RTH) diminue également en raison de l'augmentation de la température du sol. Cependant, la température plus élevée de l'air entrant peut transférer davantage d'humidité au sol, ce qui compense partiellement cette augmentation.

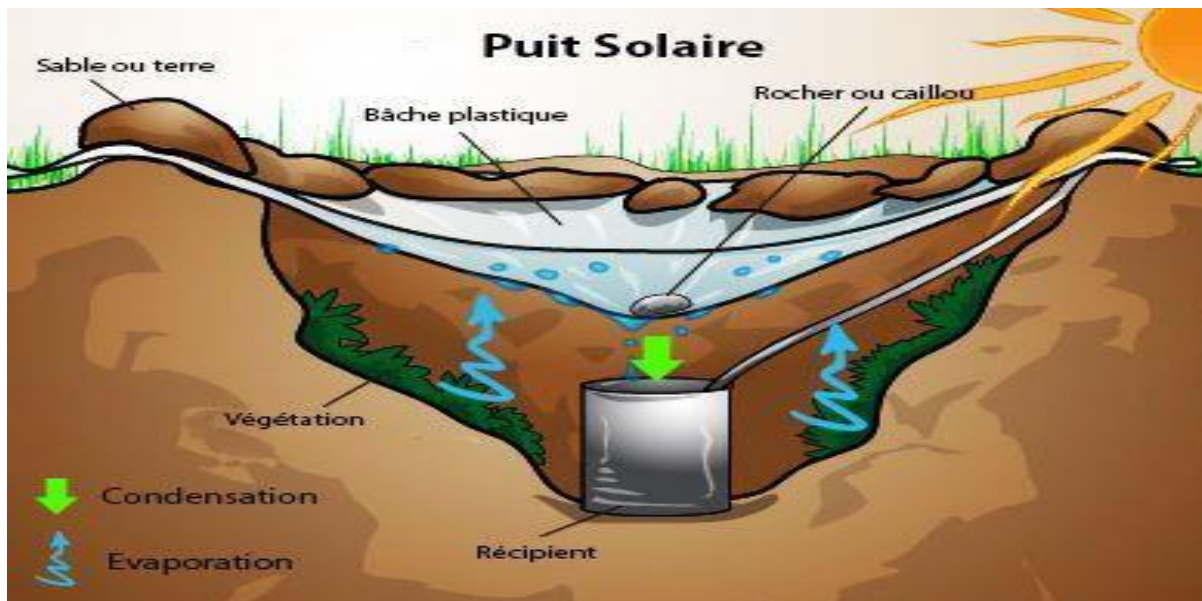


Figure III.6 : schéma du distillateur solaire

La mini-éolienne WaterSeer est un produit écologique mis au point par VICI-Labs en collaboration avec l'Université de Berkeley et la National (Peace Corps Association). Cette technologie utilise l'énergie cinétique du vent pour condenser l'humidité de l'air et produire de l'eau potable. Son fonctionnement repose sur un réservoir métallique enterré à une profondeur d'environ deux mètres. L'air, aspiré par la turbine, est refroidi par le sol, ce qui provoque la condensation de la vapeur d'eau. Par la suite, l'eau recueillie peut être pompée sans nécessiter de traitement chimique.(<https://www.netkulture.fr/article245/mini-eolienne-waterseer>)



Figure III.7 : Mini éolienne WaterSeer

III.2.5. Production d'eau avec un film polymère :

En 1989, un brevet britannique a été déposé pour un système de condensation de vapeur d'eau utilisant une surface refroidie par rayonnement infrarouge, avec des matériaux à forte émissivité et des protections contre l'apport de chaleur (Graham, 1989). Dans une étude publiée en 1994, T.M.J. Nilsson a développé un film polymère blanc à base de LDPE chargé en TiO_2 et BaSO_4 . Ce film présente une bonne émissivité IR, mais une faible résistance aux UV. Des expérimentations ont été menées en Suède et en Tanzanie afin de vérifier l'efficacité du dispositif dans la condensation de quantités restreintes de rosée. Des recherches ont été menées sur les films à base de polyoléfines destinés à des usages agricoles et industriels. Ces recherches ont permis de développer des formulations spécifiques visant à optimiser la transparence au visible et la gestion thermique. Il convient de noter que des matériaux similaires sont également employés dans le cadre du contrôle thermique des satellites. Toutefois, les contraintes spatiales imposent l'utilisation de technologies onéreuses, telles que les films métalliques et les peintures spéciales.

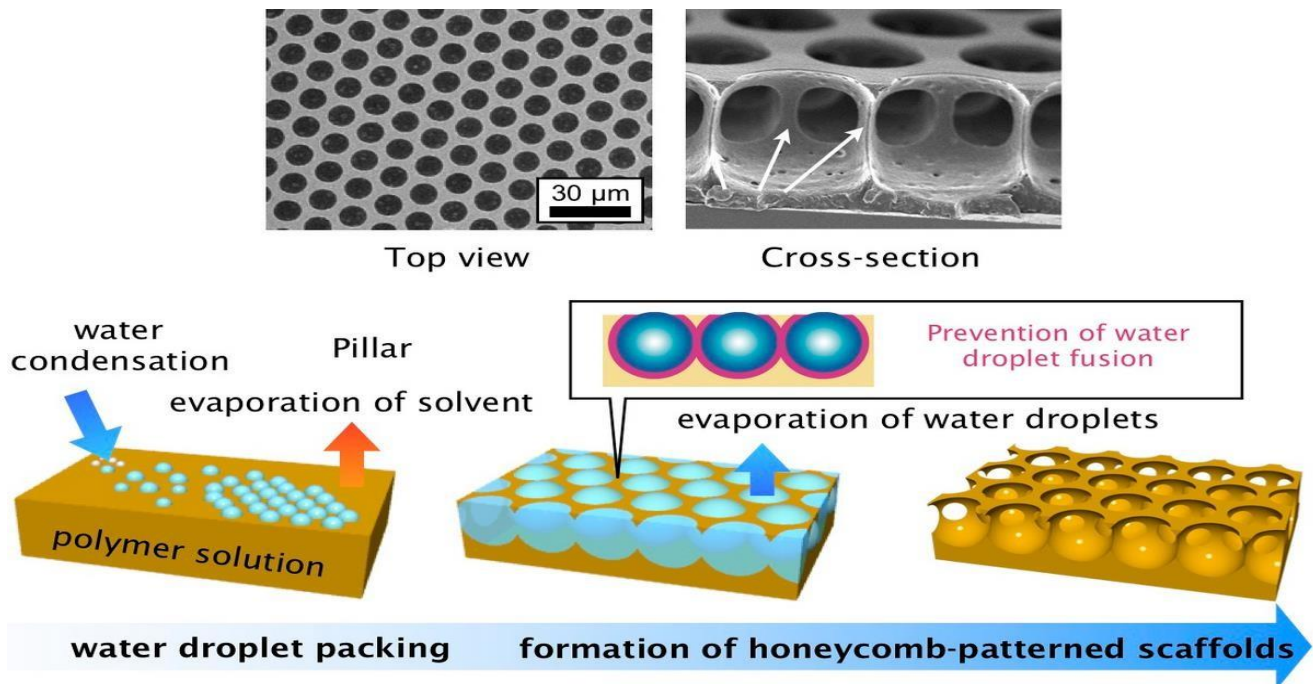


Figure III.8 : coupe transversale et schéma de formation de Scaffold polymère à motif nid d'abeilles pour la condensation d'eau

(<https://www.apnnews.com/>)

Selon Vargas en (2000), le développement se poursuit avec des films polyoléfinés optiquement sélectifs, déjà employés sous forme de bâches en serres pour optimiser la photosynthèse (transparence 0,4–0,8 µm) tout en limitant le refroidissement radiatif nocturne du sol grâce à des additifs qui augmentent l'absorption IR sans nuire à la transmission du visible (Pied, 1978). Les mélanges de particules minérales (aluminium, mica, carbonate de calcium, et kaolin) réfléchissent le rayonnement proche infrarouge pour réduire la surchauffe diurne et diffuser la lumière directe pour protéger les cultures (Keiser et al., 2002).

Enfin, les surfaces émissives sélectives suscitent un intérêt dans le cadre de l'ingénierie thermique spatiale, où le transport est exclusivement radiatif. Les satellites recourent à des films métalliques ou polymères (Tedlar, Mylar, Téflon) ainsi qu'à des peintures au silicone afin de réfléchir la lumière visible et de dissiper la chaleur infrarouge. Les contraintes mécaniques extrêmes, telles que les cycles thermiques et le rayonnement ultraviolet intense, requièrent l'utilisation de matériaux de pointe à haut coût, aussi bien pour les films que pour les revêtements colorés (Stuckey et Meshishnek, 2003) ;(Baturkin, 2005).

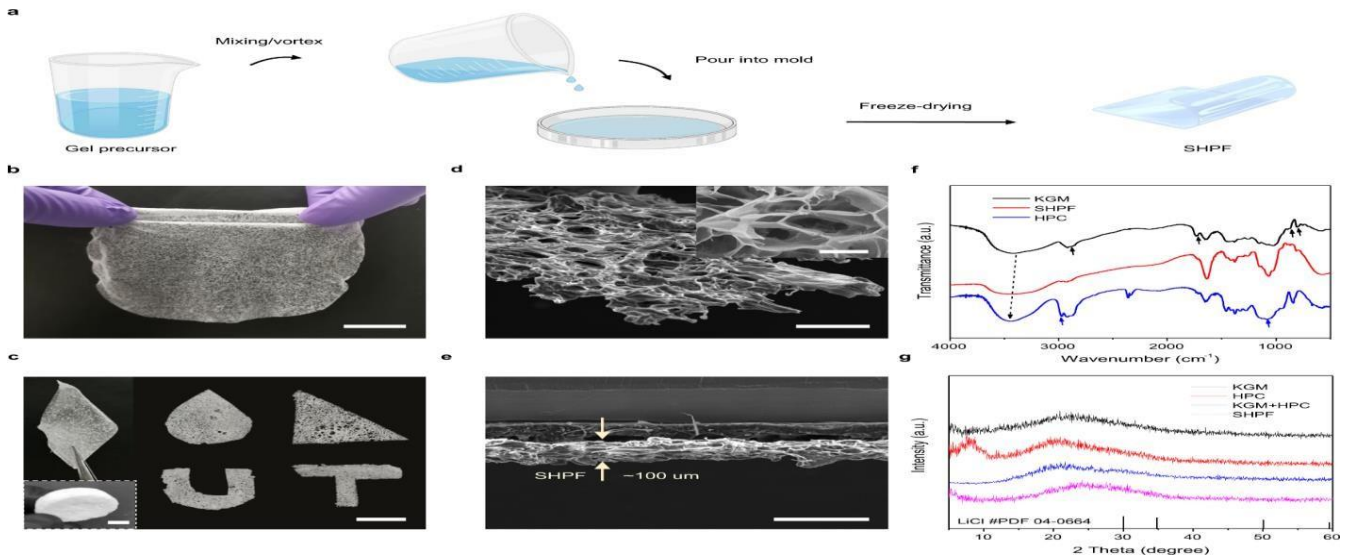


Figure III.9: Fabrication and characterization of SHPF.

(<https://www.nature.com/articles/s41467-022-30505-2>)

III.2.6. Production d'eau avec générateur d'eau à air atmosphérique :

Le système AWG (Atmospheric Water Generator) est une innovation qui permet de produire de l'eau potable à partir de l'humidité de l'air. Cette technologie exploite une ressource atmosphérique abondante et répartie mondialement. Initialement développé dans le secteur minier en tant que sous-produit du refroidissement de l'air dans les galeries, ce procédé a été inversé afin de faire de la production d'eau potable son objectif principal.

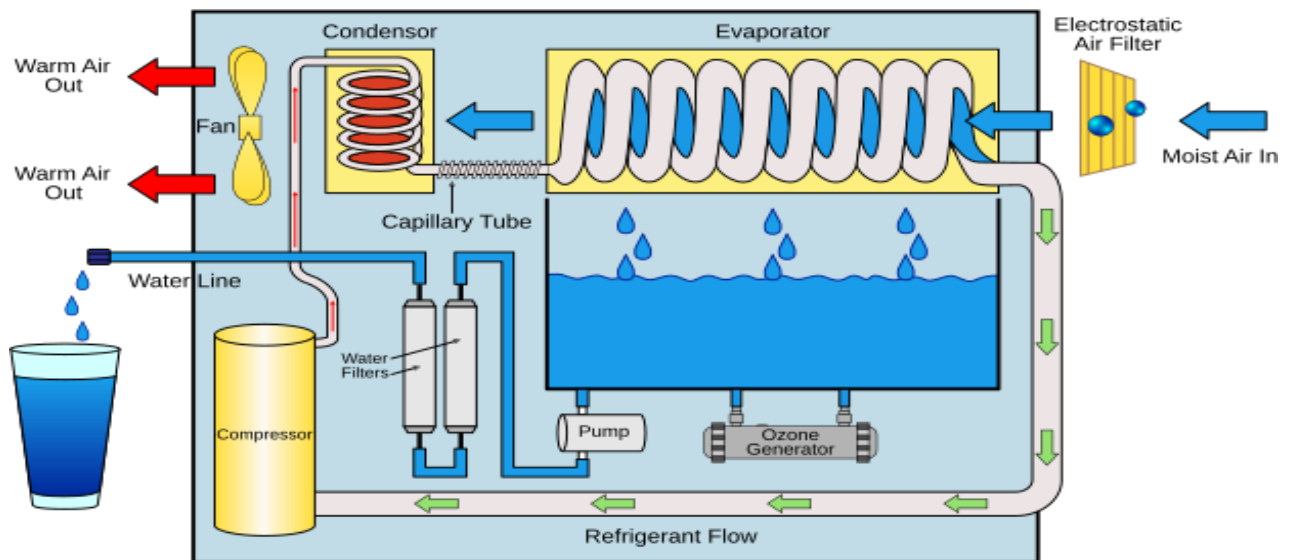


Figure III.10 : schéma de générateur d'eau d'air atmosphérique

Le processus technologique s'articule autour de l'aspiration de volumes d'air ambiants considérables, suivie d'un refroidissement jusqu'à la condensation. L'eau collectée est ensuite soumise à une filtration et à une minéralisation, garantissant ainsi une qualité conforme aux normes établies par l'Organisation mondiale de la santé. Dans des conditions climatiques favorables, caractérisées par un taux d'humidité élevé et des températures élevées, une unité de production peut atteindre un volume quotidien de 40 000 litres. Cette capacité permet de subvenir aux besoins en eau potable d'une population villageoise, sous réserve de disposer d'une source d'énergie abondante. En effet, le dispositif requiert une importante consommation électrique pour fonctionner de manière optimale. (AWG) se distingue par son autonomie vis-à-vis des ressources hydriques conventionnelles. Cette approche favorise une production locale, réduisant ainsi les dépenses liées au transport et les risques pour la santé associée à l'eau contaminée. En outre, l'air froid généré lors de ce processus peut être valorisé pour la climatisation des bâtiments, renforçant ainsi son efficacité énergétique et son impact environnemental positif. ([Atmospheric Water Generator by Paul O'Keeffe at Coroflot.com](#)).



Figure III.11 : Le générateur AWG

III.2.7. Production d'eau à partir de l'humidité et l'énergie solaire :

Zero Mass Water a conçu un dispositif innovant appelé Source®, un panneau capable de générer de l'eau potable à partir de l'humidité de l'air en utilisant exclusivement l'énergie solaire. L'objet de cette étude présente une similitude visuelle avec un panneau photovoltaïque classique. Cependant, une analyse plus approfondie révèle une distinction notable : l'objet est doté d'une bande centrale qui abrite une cellule photovoltaïque standard. Cette cellule a pour fonction d'alimenter les ventilateurs et le système de communication intégré. La surface restante est revêtue d'un matériau organométallique poreux, le MOF-801 (Metal Organic Framework), qui constitue le cœur technologique du système.

Le fonctionnement de Source® s'articule autour de deux phases. La première étape, qui se déroule de manière nocturne, implique l'absorption de l'humidité ambiante par le MOF-801, qui la stocke au sein de sa structure poreuse. Il convient de noter que, durant la journée, l'énergie solaire est à l'origine d'un processus de condensation et de recueil de l'humidité dans un réservoir de 30 litres. Ce dernier assure la minéralisation et la régulation du pH de l'eau, garantissant ainsi sa potabilité. Cette technologie se distingue par sa capacité à produire de l'eau potable dans des environnements caractérisés par une aridité extrême, avec un taux d'humidité pouvant atteindre 20 %, un seuil généralement inaccessible aux autres technologies atmosphériques. Cette performance est rendue possible par les propriétés uniques du MOF-801. (https://www.youtube.com/watch?v=S2Cq_TpNXoQ)



Figure III.12: Le panneau Source® de la technologie Zéro Mass Water

III.3. La thermoélectricité:

III.3.1. Définition de la thermoélectricité :

L'effet thermoélectrique, qui est un phénomène physique propre à certains matériaux, permet la conversion directe entre chaleur et électricité. Dans le cadre de l'étude des matériaux thermoélectriques, il est important de comprendre leur capacité à convertir la chaleur en électricité ou à transférer la chaleur par conduction thermique lorsqu'un courant électrique y est appliqué. Cette propriété est notamment utilisée dans les systèmes de réfrigération thermoélectriques, où elle joue un rôle essentiel.

III.3.2. Les Phénomène de thermoélectriques :

- **Effet du Seebeck :**

En 1821, le physicien allemand Thomas Seebeck fit la découverte expérimentale qu'une aiguille métallique présentait une déviation lorsqu'elle était placée entre deux conducteurs de nature différente, soumis à un gradient de température. Cette hypothèse a été initialement formulée pour expliquer l'origine du champ magnétique terrestre, en l'associant à la création d'un champ magnétique. Il faudra attendre un certain temps avant que la nature de cette déviation ne soit élucidée. Elle est alors attribuée à l'existence d'une différence de potentiel électrique aux jonctions des deux matériaux, lesquels sont exposés à des températures distinctes. L'effet Seebeck est un phénomène physique qui permet à un matériau thermoélectrique de convertir directement la chaleur en électricité. L'exemple le plus courant de son application est la mesure de température à l'aide d'un thermocouple.

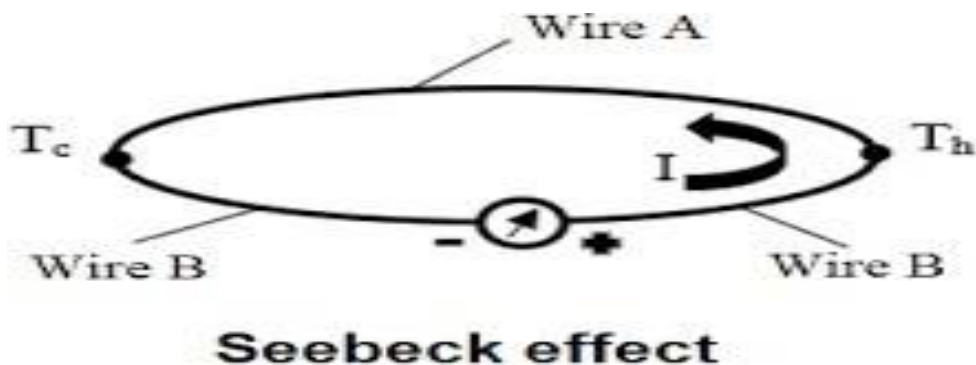


Figure III.13 : Schéma de principe de l'effet Seebeck

Lorsqu'il est question de deux fils conducteurs de nature différente, reliés à leurs extrémités et soumis à des températures distinctes, une différence de tension apparaît entre les jonctions chaude et froide. Cette différence induit alors la circulation d'un courant électrique entre ces deux jonctions. Pour une combinaison de matériaux donnée, cette tension est une fonction de la différence de température entre les deux extrémités. Ce phénomène constitue le principe de fonctionnement du thermocouple, un dispositif utilisé pour des mesures précises de température. Dans le cadre de cette expérience, une jonction est maintenue à une température de référence, telle qu'une température de bain de glace, tandis que l'autre extrémité est placée à l'endroit où la température doit être mesurée. (Ninic, 2009); (Linder, 1970).

- **Effet du Thomson :**

En 1851, le physicien William Thomson, plus tard connu sous le nom de Lord Kelvin, établit une corrélation entre les effets Seebeck et Peltier, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles recherches dans le domaine de la thermodynamique. Cette relation est mise en évidence par l'application conjointe d'un gradient de température et d'un courant électrique. À la différence des deux premières catégories, l'effet Thomson ne requiert pas la mise en contact de deux matériaux ; il se produit au sein d'un seul matériau. Plus précisément, il s'agit de la quantité de chaleur absorbée ou dégagée par unité de temps lors du passage d'un courant électrique à travers une zone d'un matériau soumis à une variation de température (Boudemagh, 2010).

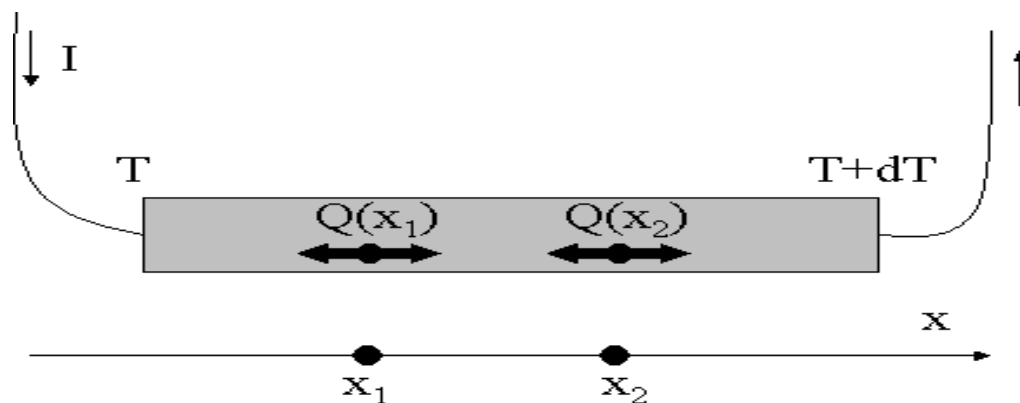


Figure III.14 : Principe de l'effet THOMSON.

- **Effet du Peltier :**

En 1834, le physicien français Jean Peltier fit la découverte du deuxième effet thermoélectrique. Lorsqu'un courant électrique traverse la jonction entre deux matériaux de nature différente (par exemple, un matériau de type n et un matériau de type p), une différence de température apparaît entre les extrémités. En effet, un matériau thermoélectrique est capable de produire du froid ou de la chaleur par l'intermédiaire de l'application d'un courant électrique. Cette propriété permet de concevoir des systèmes de réfrigération qui ne nécessitent pas l'utilisation de fluides frigorigènes, ouvrant ainsi la voie à des solutions plus durables et respectueuses de l'environnement (Richoux et al, 2008).

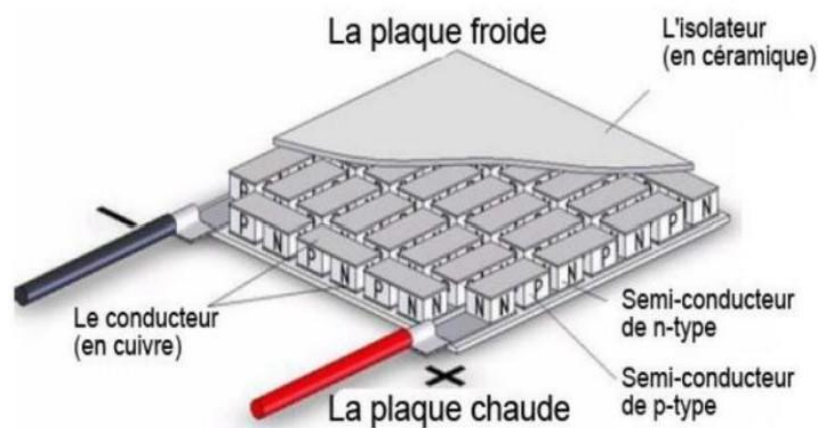


Figure III.15: Principe de l'effet Peltier (Rojoniaina. 2023)

Dans le cadre de cette étude, il est important de comprendre que, lorsque les porteurs de charge passent d'un niveau d'énergie faible à un niveau d'énergie plus élevé, ils doivent recevoir de l'énergie. Cette énergie provient du réseau cristallin avec lequel ils interagissent via des collisions. Pour illustrer ce phénomène, prenons l'exemple du passage d'un matériau de type p à un matériau de type n. Ainsi, le réseau cristallin cède de l'énergie aux porteurs, induisant un refroidissement de la jonction. Ce processus représente une manifestation de l'effet Peltier.

Par ailleurs, lorsque les porteurs de charge évoluent d'un niveau d'énergie élevé à un niveau plus bas, l'énergie excédentaire est transférée au réseau cristallin, induisant un échauffement de la jonction. Cette observation met en exergue que la disparité dans la nature des matériaux employés (représentés par a et b) ainsi que la direction du courant appliqué sont les facteurs déterminants engendrant un gradient thermique au sein du matériau.

Le couplage entre les effets thermiques et électriques permet l'émergence de deux

grandes applications :

Le processus de réfrigération est rendu possible par l'existence d'un flux de chaleur induit par l'application d'un courant électrique. Ce flux thermique assure la transmission de la chaleur d'un corps à refroidir vers une zone où elle est évacuée dans le milieu ambiant.

La génération électrique est un phénomène physique qui se produit lorsque l'application d'une source de chaleur externe induit une différence de température entre les extrémités d'un matériau. Cette variation génère une tension électrique, qui peut être convertie en courant par l'intermédiaire d'une résistance de charge.

(<https://pitch-technologies.fr/produits/laird-principe-module-peltier-agent-en-france/>)

III.4. Le rôle du module thermoélectrique à effet Peltier pour la production d'eau de l'air :

La production d'eau par effet Peltier constitue une approche novatrice pour condenser l'humidité présente dans l'air ambiant. Le procédé en question est fondé sur le refroidissement thermoélectrique, qui est une technique permettant de réduire la température d'une surface jusqu'à son point de rosée. Ce processus induit alors la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique.

Les dispositifs de petit format qui utilisent cette technologie sont conçus pour extraire l'eau de l'air humide. Les éléments en question se caractérisent par leur légèreté, leur solidité, leur fonctionnement sans pièces mécaniques mobiles et leur faible exigence en matière d'entretien (Pineda et Rezaniakolaei, 2017).

Dans le cadre de l'analyse du module Peltier, il est essentiel de comprendre le processus de circulation thermique qui s'établit entre deux matériaux de nature différente. Cette circulation thermique est la clé de voûte de la génération d'une surface froide, favorisant ainsi la condensation de l'humidité ambiante. En outre, cette circulation thermique contribue de manière significative à la régulation thermique du système.

Lors du contact entre l'air chaud et la surface refroidie, l'humidité contenue dans l'air se condense sous forme de gouttelettes d'eau, lesquelles peuvent alors être récoltées. Cette eau peut alors être utilisée pour diverses applications, notamment pour l'approvisionnement en eau potable, en particulier dans les régions où les ressources hydriques sont limitées.

La quantité d'eau extraite est fonction des conditions ambiantes, notamment de la température, du taux d'humidité et du point rosée. Cette observation suggère que cette

technologie possède un potentiel substantiel, à condition d'être optimisée. Il s'avère par conséquent impératif de poursuivre le développement de cette technologie afin d'accroître son efficacité, sa fiabilité et son rendement, en vue de la rendre viable à une échelle plus vaste pour faire face aux défis liés à l'accès à l'eau (Khamil, 2024).

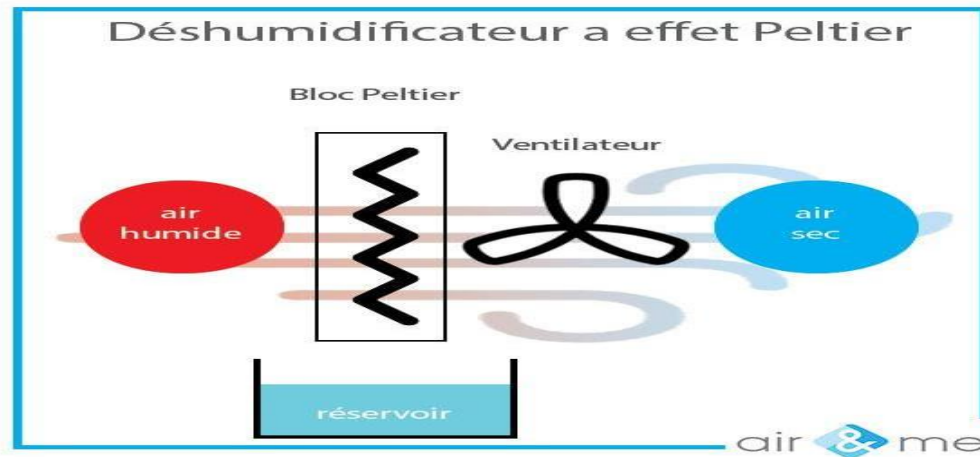


Figure III.16 : Schémas des générateurs utilisant les modules Peltier.

III.4.1. Les avantages et les inconvénients :

Les modules Peltier présentent de nombreux avantages. D'une part, ils ne comportent aucune pièce mobile, ce qui réduit considérablement la nécessité d'une maintenance régulière. D'autre part, ils affichent une durée de vie d'environ 100 000 heures en régime stationnaire, ce qui les rend particulièrement durables. Il convient de noter que ces appareils ne sont pas équipés de fluides frigorigènes nocifs pour l'environnement. Ils se caractérisent par leur compacité, leur légèreté et leur faible niveau sonore. De plus, ils démarrent instantanément et nécessitent un contrôle aisé. Leur fonctionnement réversible permet, en fonction de la direction du courant, de réguler la température, c'est-à-dire de la rafraîchir ou de l'augmenter. Leur robustesse leur permet également de résister à des environnements hostiles ou à des espaces trop exigus pour des solutions conventionnelles, quelle que soit leur orientation. Par ailleurs, leur alimentation s'effectue en courant continu.

Néanmoins, ces modules présentent certains inconvénients, notamment une puissance frigorifique relativement faible, un rendement limité (coefficient de performance d'environ 0,4) et l'apparition de condensation sur la face froide, qui peut nécessiter une gestion spécifique (Trouzite et Midegue, 2016).

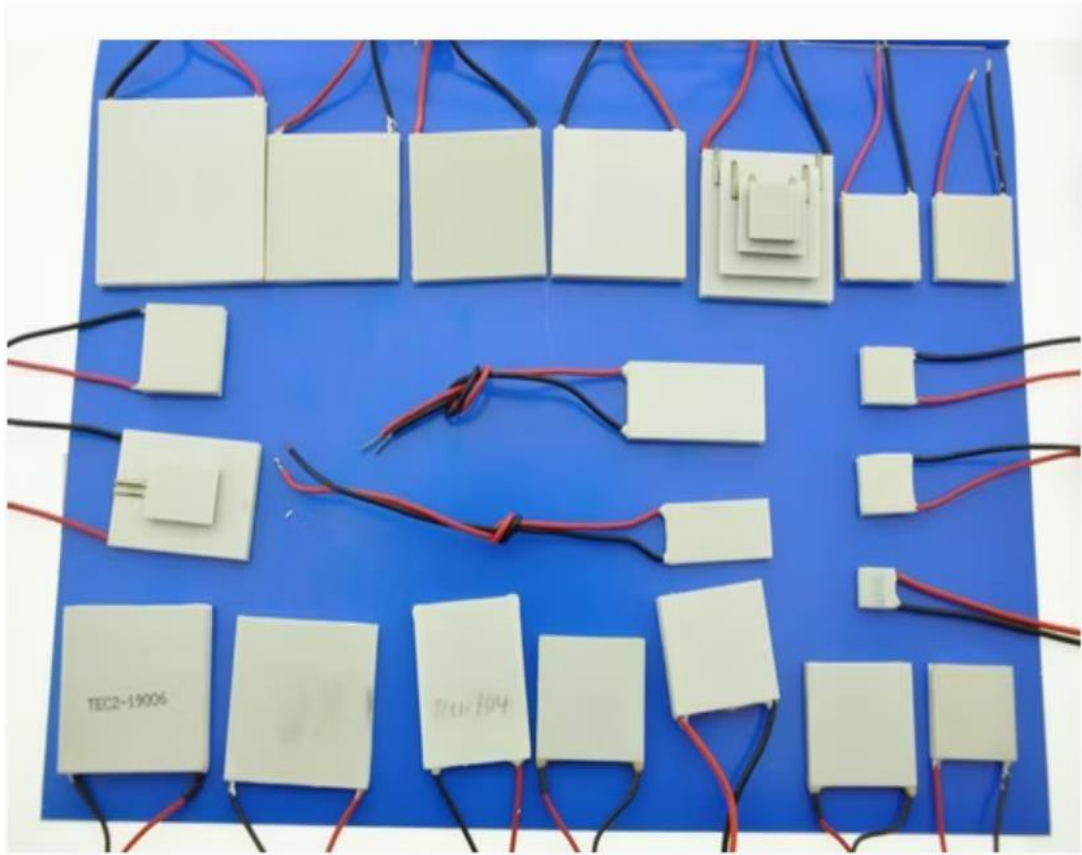


Figure III.17 : les différents types de module Peltier

(<https://dgcoolwhist.en.made-in-china.com/>)

III.5. Conclusion:

Dans le chapitre actuel, une analyse comparative des techniques de génération hydrique atmosphérique (GHA) est proposée. Cette analyse se concentre sur les différentes approches technologiques d'extraction de l'humidité atmosphérique. L'objectif est d'éclairer les paramètres opérationnels essentiels à la compréhension de ce domaine complexe. L'analyse des systèmes recensés révèle l'existence de deux catégories principales : les systèmes de condensation passive, qui tirent parti des variations diurnes de température pour capter l'humidité sans recourir à une source d'énergie externe, et les dispositifs actifs (généralement mécaniques par réfrigération ou thermodynamiques via l'effet Peltier), qui requièrent une source d'énergie pour accélérer le processus de condensation. Dans le cadre de l'étude des performances et de la pertinence des méthodes en question, il a été observé que celles-ci sont étroitement dépendantes des conditions climatiques, à savoir le taux d'humidité relative et le niveau de la température du milieu. En outre, les paramètres topographiques tels que l'altitude et l'exposition au vent semblent également avoir une influence significative.

Enfin, il a été constaté que le cadre géographique, incluant la proximité d'eaux de surface et les caractéristiques des milieux aériens, joue un rôle déterminant dans l'efficacité des méthodes. Une analyse systémique préalable de ces facteurs s'avère donc cruciale pour orienter le choix de la technologie optimale, en tenant compte non seulement de l'efficacité technique, mais aussi des ressources instrumentales et des coûts expérimentaux, afin d'assurer une optimisation technico-économique adaptée au contexte d'implantation.

Chapitre IV

Expérimentation des prototypes de la production de l'eau atmosphérique

IV.1. Introduction :

La production d'eau potable par condensation de l'humidité atmosphérique constitue une solution innovante face aux défis croissants posés par la raréfaction des ressources en eau douce. Dans ce contexte, l'utilisation de modules Peltier, qui sont des dispositifs thermoélectriques capables de générer un gradient thermique par effet Peltier, offre une approche prometteuse pour extraire l'eau contenue dans l'air ambiant. Ces modules, couramment utilisés dans des systèmes de refroidissement ou de contrôle thermique, se sont avérés particulièrement adaptés à la condensation, grâce à leur aptitude à générer une surface froide favorisant la liquéfaction de la vapeur d'eau.

Dans le cadre de cette étude, nous avons procédé à l'expérimentation d'un système de production d'eau basé sur un module Peltier. En utilisant deux prototypes qui sont inspirés du fonctionnement d'un générateur de l'eau atmosphérique (atmospheric water generator AWG) qui ont été expérimenté en 2024 dans le cadre d'une étude de mémoire master à Biskra (sud-est) et qui ont données des résultats prometteurs pour un climat aride. L'utilisation de ces prototypes à Tébessa (nord-est) ont donné des résultats plus satisfaisants et plus riche ; car en plus des quantités d'eau récupérés de l'air, des analyses de qualité faite sur plusieurs échantillons de l'eau atmosphérique.

Les résultats et la méthodologie des expériences qui s'étale de Janvier 2025 et Avril de la même Années sont présentées dans ce chapitre.

IV.2. Méthodologie de travail :

Dans le cadre de notre étude, nous avons procédé à la sélection de 2 prototypes ; qui ont comme base de refroidissement un module à effet Peltier. Sachant que leurs conception et expérimentations ont été effectués par Zouita en 2024, à l'université Mohamed Khider de Biskra, au département de génie civil et hydraulique.

III.2.1. Prototype n°1:

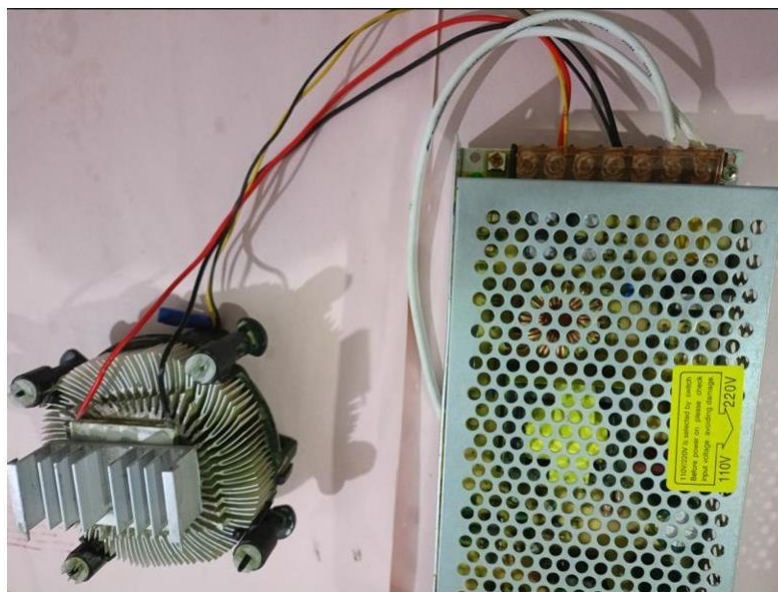


Figure IV.1 : Prototype n° 1 (Zouita.N 2024)

***Description et principe :**

Il s'agit d'un prototype élémentaire, qui ne comprend que le système suivant :

- Une alimentation à découpage (220V AC / 12V DC 16,5A)
- Un module thermoélectrique TEC1-12706 (12V, 6A, plage de température : -55°C à 138°C)
- Un dispositif de refroidissement actif comprenant : un dissipateur thermique surmonté d'un ventilateur 12V (fixé sur la face chaude du module Peltier pour évacuer la chaleur), un dissipateur de forme variable (monté sur la face froide du Peltier) pour assurer le refroidissement.
- En effet, son principe de fonctionnement repose sur la condensation de l'humidité ambiante qui se dépose sur la surface froide, permettant ainsi de récupérer l'eau collectée dans un récipient.
- à chaque fois il faut Appliquer de la pâte thermique pour chaque dissipateur thermique avec le Peltier pour avoir une bonne conductance entre ces parties.



Figure IV.2 : Les différents dissipateurs thermiques utilisés sur le module Peltier
(Zouita.2024).

IV.2.2. Prototype n°2 :

*Description et principe :

Ce prototype reproduit le fonctionnement d'un système frigorifique simplifié en faisant circuler, à l'aide d'une pompe, un liquide réfrigérant préalablement congelé à travers des tuyaux en PVC. Ce liquide est ensuite encore refroidi grâce à un module Peltier installé sous un water block. Il traverse ensuite un tube en cuivre dont la surface froide atteint le point de rosée, entraînant la condensation de la vapeur d'eau présente dans l'air ambiant sur les parois du tube. Les gouttelettes formées sont alors collectées dans un récipient en vue d'une réutilisation.

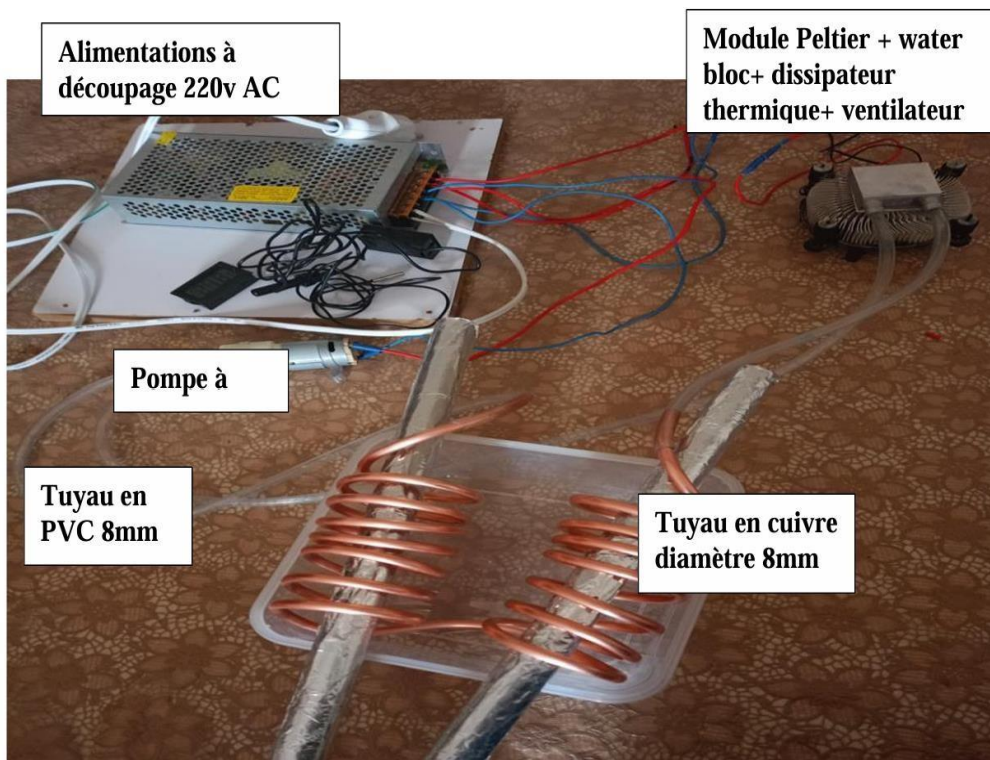


Figure IV.3 : Prototype n° 2 (Zouita.2024)

IV.3. Liste de matériel :

Le matériau utilisé pour les expériences qui génèrent l'eau atmosphérique est :

- Mini thermomètre et hygromètre LCD de température et humidité : afin d'effectuer des relevés exacts de l'humidité et de la température à l'intérieur d'un espace fermé.



Figure IV.4: Mini thermomètre et hygromètre LCD de température et humidité.

- Une alimentation à découpage (220V AC / 12V DC 16,5A).



Figure IV.4: Alimentations à découpage 220v AC 12V DC 16.5 A.

-Module refroidissement thermoélectrique à effet Peltier TEC1-12706/12V/6A ;($138^{\circ}\text{C}_{\text{max}}$; $-40^{\circ}\text{C}_{\text{min}}$).



Figure IV.5 : Module refroidissement thermoélectrique à effet Peltier TEC1-12706 12V 6A.

-Bloc de refroidissement en aluminium 40mm.



Figure IV.6 : Bloc de refroidissement en aluminium 40mm

-Ventilateur 12V 0,15A.



Figure IV.7 : Ventilateur 12V 0,15A.

- Tube Cuivre 8mm en forme de ressort : afin de permettre la circulation de l'eau froide à l'intérieur, il est nécessaire de provoquer le phénomène de condensation de l'eau.



Figure IV.8 : Tube Cuivre 8mm en forme de ressort.

- Une Seringue simple.



Figure IV.9 : une seringue simple.

- Un bac.



Figure IV.10 : un bac

-Un dissipateur thermique :

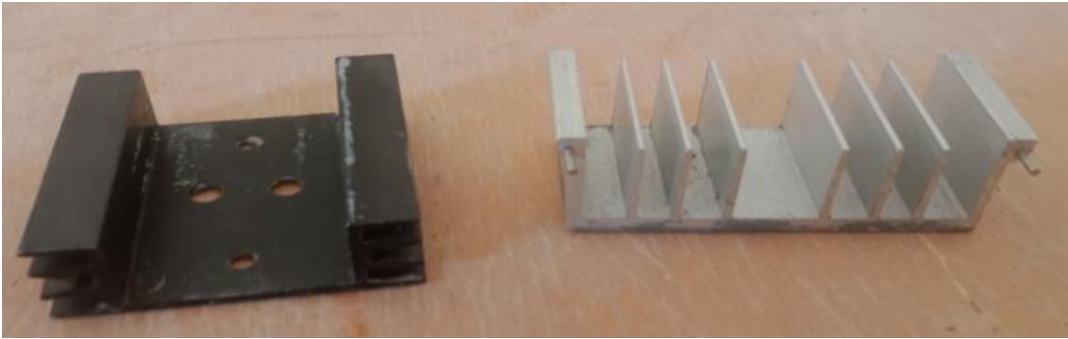


Figure IV.11 : Des dissipateur thermique.

- Pompe à eau CC 6-12V: La pompe à eau de courant continu 6-12 V joue un rôle essentiel dans la circulation du liquide de refroidissement du moteur. Pour prototype 2 :



Figure IV.12 : Pompe à eau CC 6-12V

- L'appareil de Ph mètre et de conductimètre : pour mesurer l'acidité de l'échantillon et la conductivité.



Figure IV.13 : L'appareil des analyses ; Ph mètre et conductimètre

(18/02/2025 Laboratoire traitement département hydraulique)

IV.4. Liste de produits :

- Seringue de pate thermique : La pâte thermique, est un matériau conducteur qui remplit deux fonctions : d'une part, elle assure une liaison entre le microprocesseur et son water block, et d'autre part, elle joue un rôle de l'appât. Le produit en question a la capacité de combler les espaces et les aspérités, favorisant ainsi le transfert de chaleur vers le dissipateur. Cette propriété contribue à l'optimisation des performances de refroidissement du système.



Figure IV.14 : seringue pate thermique

Le liquide de refroidissement : Le refroidissement a pour fonction principale d'assurer le maintien constant d'une température motrice, indépendamment de la saison. Grâce à ses propriétés antigel et à son point d'ébullition très élevé (supérieur à 100 °C), il prévient autant la surchauffe que le gel. Cette régulation thermique s'avère essentielle, car le moteur est susceptible de générer des excès de chaleur par le biais de réactions explosives continues qui risquent de l'endommager si elle n'est pas maîtrisée de manière efficace.



Figure IV.15 : liquide refroidisseur

IV.5. Résultats et discussion :

Les expériences ont été menées durant les mois de janvier, février, mars, avril, dans la région de Tébessa. Les résultats suivants ont été obtenus :

VI.5.1. Les résultats de Janvier, Février :

Dans le tableau suivant :

Table IV.1 : les résultats des mois janvier et février.

La date	Température(°c)	Humidité (%)	Point rosé	Volume(ml)
26/01/2025	19	61	0	3,1
27/01/2025	20	36	2	3
28/01/2025	16	39	3	6,9
29/01/2025	13	73	2	14
30/01/2025	15	45	-3	6,6
31/01/2025	16	58	-3	13,2
01/02/2025	10	85	4	30
02/02/2025	11	77	3	24,2
03/02/2025	10	77	3	30
04/02/2025	/	/	/	/
05/02/2025	Interruption de l'expérience causé par mauvais fonctionnement du module à effet Peltier			
06/02/2025				
07/02/2025				
08/02/2025	/	/	/	/
09/02/2025	/	/	/	/
10/02/2025	13	70	1	20
11/02/2025	17	63	1	23

L'activation de l'appareil a été réalisée selon un protocole temporel optimisé, visant à maximiser les conditions environnementales favorables à la condensation. Les périodes d'opération sélectionnées (de 00h00 à 07h00 et de 19h00 à 23h30) ont été déterminées sur la base d'une analyse préalable des variations entre le jour et la nuit des paramètres climatiques.

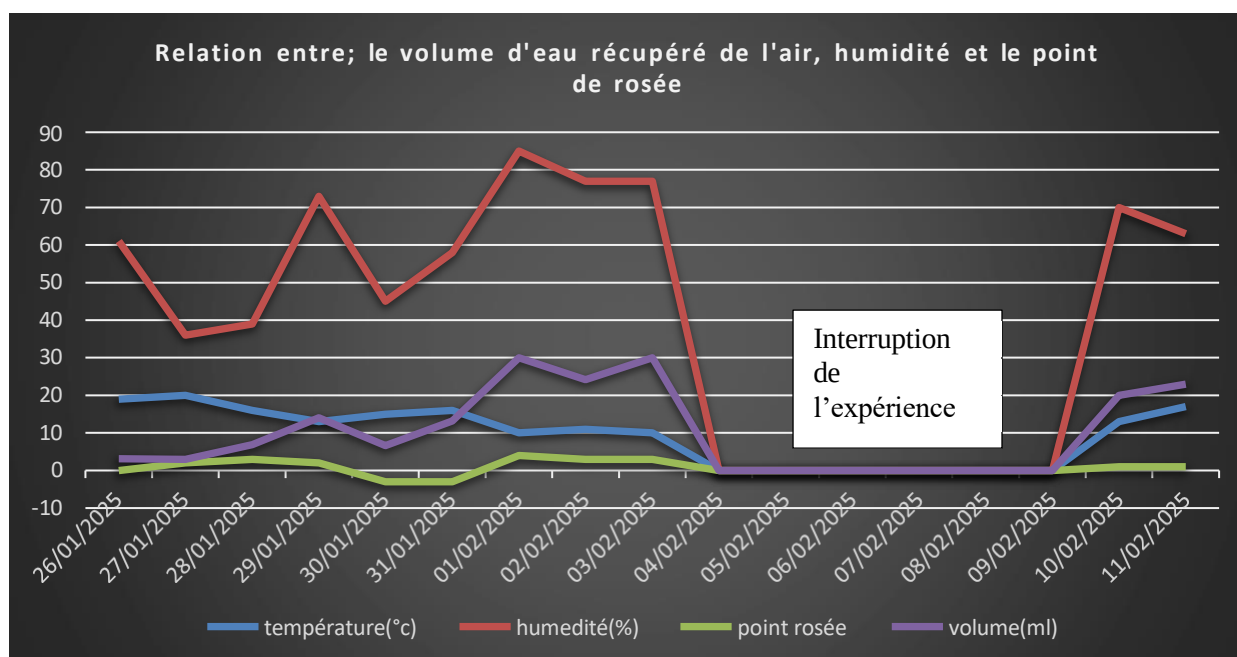


Figure IV.16 : Graphe résultats du mois janvier et février

L'incident technique survenu du 4 au 9 février 2025 a provoqué une interruption totale des données. Cette interruption a eu pour conséquence de limiter l'analyse des conditions météorologiques et de production pendant la période concernée.

***Corrélations entre paramètres météorologiques et production :**

-Humidité relative :

Les analyses menées ont révélé que les jours les plus productifs correspondent à des valeurs d'humidité élevées, avec un seuil minimal de 60 %. Les données recueillies montrent que le 31 janvier, l'humidité était de 58 %, et que la quantité de liquide recueillie s'élevait à 13,2 ml. Le 1er février, l'humidité atteignait 85 %, et la quantité de liquide enregistrée était de 30 ml, ce qui correspond au record du mois.

Cependant, les jours où l'humidité était inférieure à 40 % ont produit des volumes extrêmement réduits, comme en témoigne l'exemple du 27 janvier, où l'humidité était de 36 % et le volume de 3 ml.

-Température ambiante :

Une température modérée, dont la plage s'étend de 10 à 15 degrés Celsius, semble favoriser l'amélioration de la production. Pour illustrer cette observation, considérons les données expérimentales suivantes : le 1er février, la température est de 10 degrés Celsius et le volume de solution est de 30 ml ; le 10 février, la température est de 13 degrés Celsius et le volume de solution

est de 20 ml. Cependant, à une température de 20 °C, le 27 janvier, la production est demeurée faible, avec seulement 3 ml, ce qui corrobore l'hypothèse selon laquelle les températures élevées ont un impact négatif sur l'efficacité du module Peltier.

-Point de rosée :

Les meilleures performances ont été observées lorsque le point de rosée était proche de la température ambiante (par exemple : 01/02 point de rosée 4°C contre température 10°C). Cependant, un point de rosée négatif, tel que celui observé le 30 janvier à -3 °C, a engendré une limitation de la production à 6,6 mL. Cette diminution est attribuable à la formation de glace sur le module.

VI.5.2. Les résultats de Mars et Avril :

Dans le tableau suivant :

Table IV.2 : les résultats des moi Mars et Avril.

La date	Température(°c)	Humidité (%)	Point rosé	Volume(ml)
02/03/2025	18,8	45	-2	/
03/03/2025	16,6	63	6	/
04/03/2025	18,5	53	5	24
05/03/2025	16,4	62	4	30
06/03/2025	16,6	65	5	29
07/03/2025	17,3	67	6	36
08/03/2025	16,5	50	4	25
09/03/2025	21	35	-1	19
10/03/2025	20	36	3	18
11/03/2025	21	37	0	15
12/03/2025	20	38	1	12
13/03/2025	19	34	0	9
14/03/2025	20	32	-4	9
15/03/2025	20	48	5	15
16/03/2025	18	45	-3	14
17/03/2025	17	30	-4	6
18/03/2025	18	31	4	7
19/03/2025	19	47	6	16
20/03/2025	20	46	3	13
21/03/2025	19	48	4	16
22/03/2025	20	45	4	12
23/03/2025	19	46	5	14
24/03/2025	20	48	5	16
25/03/2025	18	51	5	20
26/03/2025	16	49	3	4
27/03/2025	17	45	2	9
28/03/2025	16	45	1	17
29/03/2025	16	44	3	6
30/03/2025	14	56	4	22
31/03/2025	14	55	3	17
01/04/2025	15	48	2	15
02/04/2025	16	49	3	15
03/04/2025	18	47	3	16
04/04/2025	20	40	2	10
05/04/2025	19	56	2	19

L'activation de l'appareil a été réalisée selon un protocole temporel optimisé, visant à maximiser les conditions environnementales favorables à la condensation. Les périodes d'opération sélectionnées (de 00h00 à 07h00 et de 19h00 à 23h30) ont été déterminées sur la base

d'une analyse préalable des variations entre nuit et jours, des paramètres climatiques. Au cours de ces périodes définies, les informations recueillies révèlent une association notable entre :

*** Corrélations entre les paramètres météorologiques et la production d'eau :**

- Humidité relative :

Il a été observé que les jours caractérisés par un taux d'humidité supérieur à 60 % ont tendance à générer des précipitation plus abondantes (par exemple, le 7 mars, avec un taux d'humidité de 67 %, 36 millimètres de précipitations ont été enregistrés ; le 30 mars, avec un taux d'humidité de 56 %, 22 millimètres de précipitations ont été observés). Cependant, les jours où l'humidité était faible (inférieure à 40 %) ont produit des volumes réduits (par exemple, le 9 mars : 35 % et 19 mL). Cette observation valide l'hypothèse selon laquelle l'humidité atmosphérique joue un rôle déterminant dans le processus de condensation de l'eau.

-Température ambiante :

Des observations récentes semblent indiquer une amélioration de la production (par exemple, le 7 mars, avec une température de 17,3 °C et un volume de 36 ml). Cependant, lorsque la température excède 20°C, le rendement subit une diminution, même en présence d'une humidité modérée (par exemple, le 21/03 à 20°C, avec 48% d'humidité et un volume de 16 ml). Cette observation peut être attribuée à l'effet des températures plus élevées sur l'air, qui entraîne une diminution de l'humidité de saturation. Cette réduction de l'humidité atmosphérique conduit à une baisse de la capacité de condensation de la vapeur d'eau.

-Point de rosée :

La mesure de la température de rosée est un paramètre essentiel pour la compréhension des conditions climatiques. Les jours où le point de rosée était proche de la température ambiante (par exemple, le 7 mars, avec un point de rosée de 6 °C contre une température de 17,3 °C) ont démontré une efficacité supérieure. Cependant, lorsque la température est descendue en dessous de 0 °C (par exemple le 14 mars à -4 °C), la production a chuté à 9 mL. Cette diminution est probablement attribuable à la formation de glace sur le module Peltier, ce qui a entraîné une limitation de la condensation.

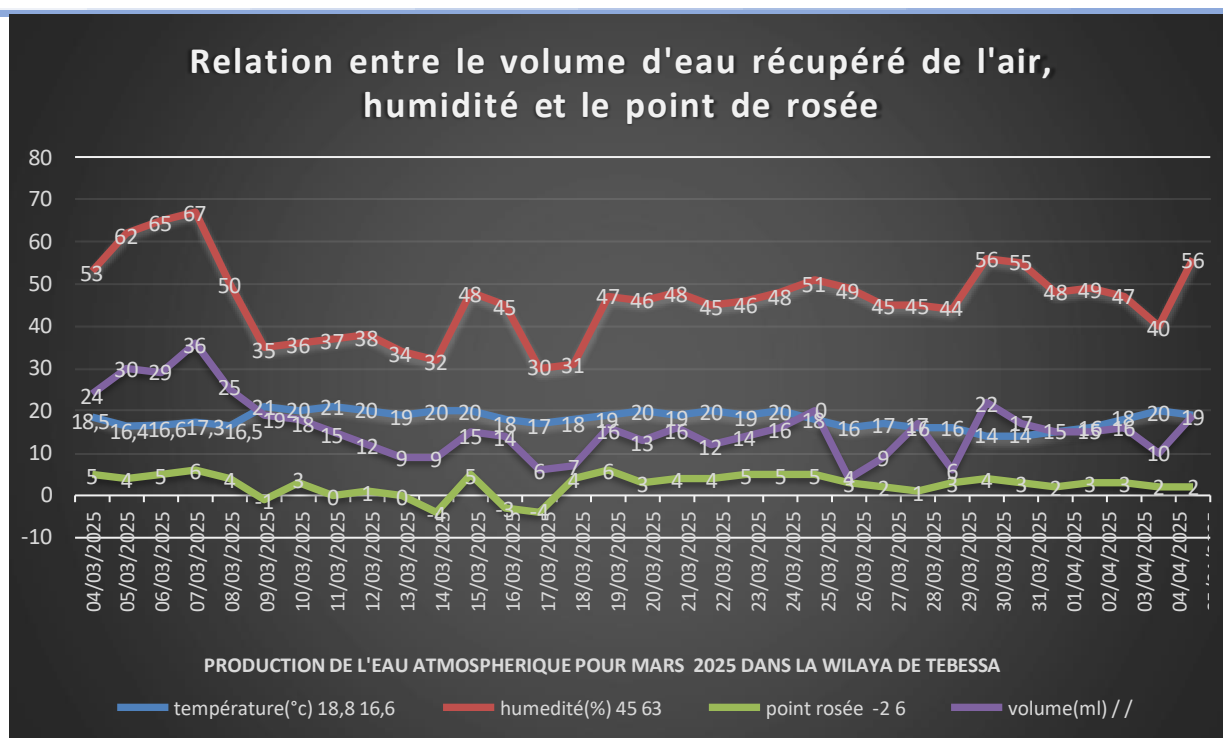


Figure IV.17 : Graphe résultats du mois mars et avril.

VI.5.3. La comparaison entre (mars, avril) et (janvier, février) :

En effet, une comparaison des résultats obtenus au cours des mois de mars et avril avec ceux des mois de janvier et février met en évidence une augmentation significative de la production, qui s'élève à 30 ml en moyenne, en comparaison avec un maximum de 36 ml enregistré en mars. Cette performance hivernale trouve son explication dans des facteurs climatiques spécifiques. En effet, l'analyse des données météorologiques révèle que le taux d'humidité moyen a connu une augmentation significative, passant de 50 % en mars à environ 60 % durant la saison hivernale. Parallèlement, les conditions de rosée se sont avérées plus propices, contribuant ainsi à l'optimisation des processus de végétation. En outre, les corrélations entre l'humidité, la température et la production se révèlent cohérentes d'une période à l'autre, validant l'efficacité du module Peltier dans des conditions climatiques diversifiées. En outre, il a été observé que la durée d'exposition du module à l'air ambiant semble exercer une influence sur les résultats, notamment durant les périodes de pointe de production, telles que celles induites par des déversements de 30 ml en l'espace de 10 heures.

IV.5.4. La comparaison entre les résultats de prototype 1 et prototype 2 :

- **Prototype 1 :**

Table IV.3 : les résultats de prototype 1.

la date	la durée	température(°c)	humidité (%)	point rosée	volume(ml)	prototype
02/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	18,8	45	-2	/	pro 1
03/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	16,6	63	6	/	pro 1
04/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	18,5	53	5	24	pro 1
05/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	16,4	62	4	30	pro 1
06/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	16,6	65	5	29	pro 1
07/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	17,3	67	6	36	pro 1
08/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	16,5	50	4	25	pro 1
09/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	21	35	-1	19	pro 1
10/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	20	36	3	18	pro 1
11/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	21	37	0	15	pro 1
12/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	20	38	1	12	pro 1
13/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	19	34	0	9	pro 1
14/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	20	32	-4	9	pro 1
15/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	20	48	5	15	pro 1
16/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	18	45	-3	14	pro 1
17/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	17	30	-4	6	pro 1
18/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	18	31	4	7	pro 1
19/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	19	47	6	16	pro 1
20/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	20	46	3	13	pro 1
21/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	19	48	4	16	pro 1
22/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	20	45	4	12	pro 1
23/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	19	46	5	14	pro 1
24/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	20	48	5	16	pro 1
25/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	18	51	5	20	pro 1

Le tableau fourni contient des données collectées sur une période allant du (02/03/2025) au (25/03/2025), avec des mesures effectuées chaque jour pendant la même plage horaire : de (19:00 à 7:00).

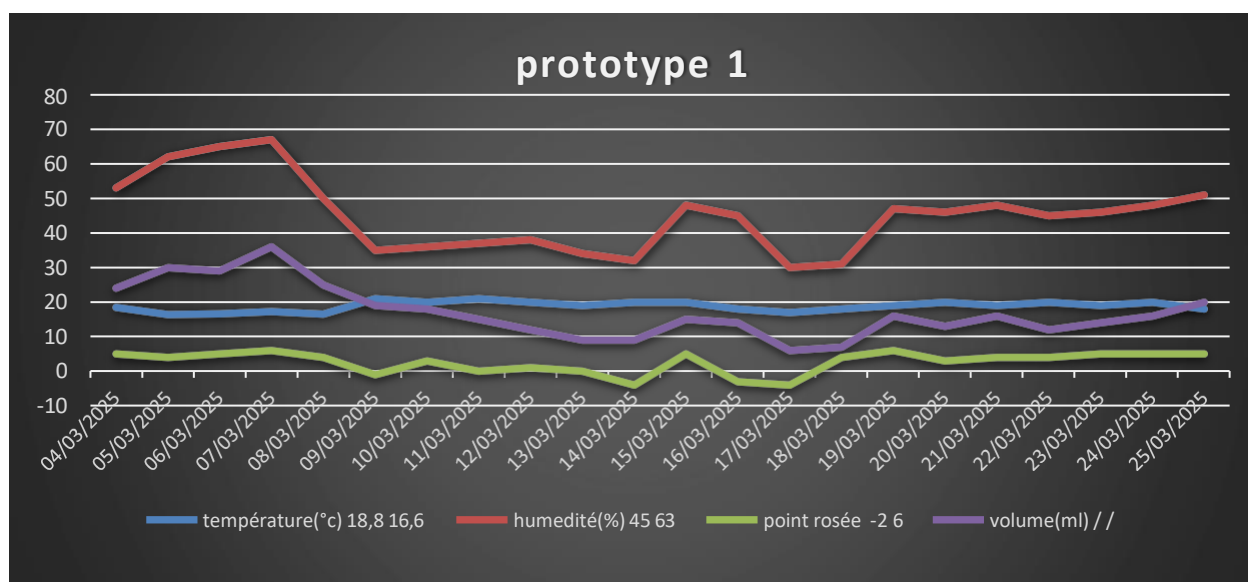


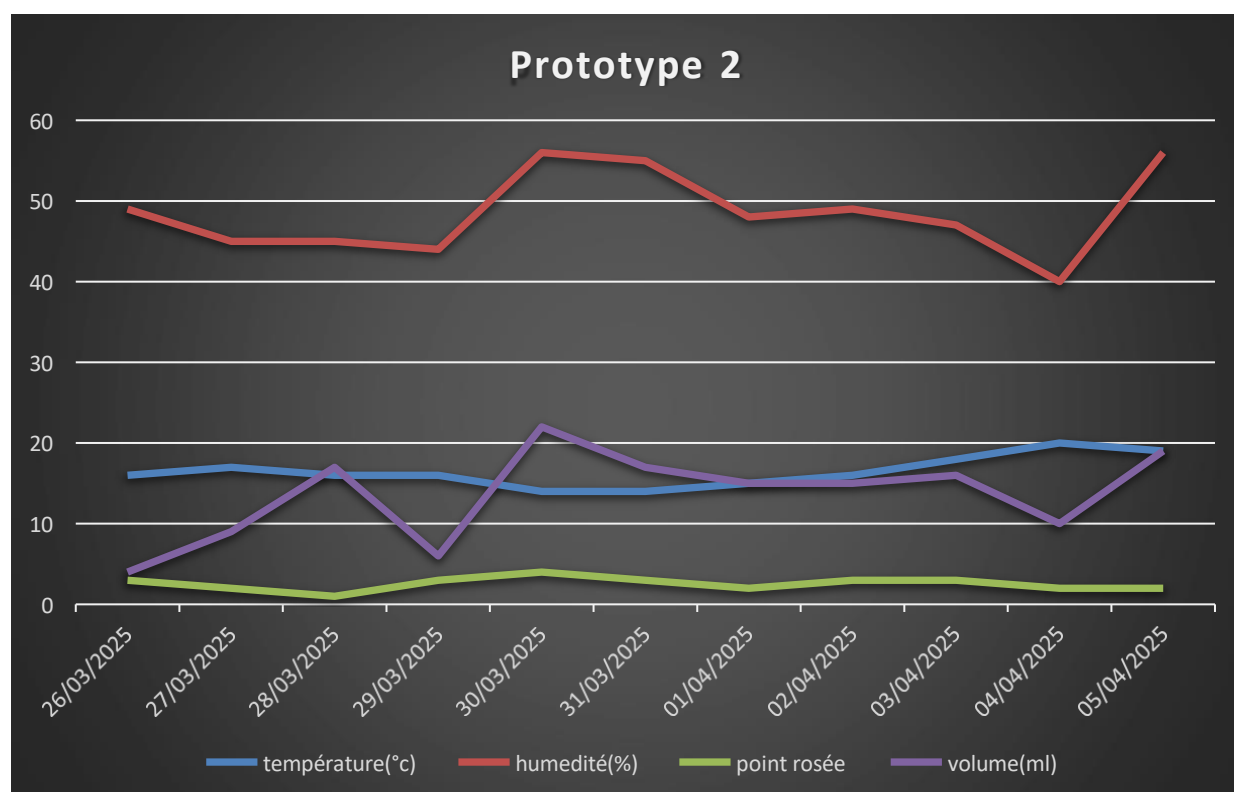
Figure IV.18 : Graphe résultats du prototype 1

- **Prototype 2 :**

Table IV.4: les résultats de prototype 2

la date	la durée	température(°c)	humidité(%)	point rosée	volume(ml)	prototype
26/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	16	49	3	4	pro 2
27/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	17	45	2	9	pro 2
28/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	16	45	1	17	pro 2
29/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	16	44	3	6	pro 2
30/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	14	56	4	22	pro 2
31/03/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	14	55	3	17	pro 2
01/04/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	15	48	2	15	pro 2
02/04/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	16	49	3	15	pro 2
03/04/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	18	47	3	16	pro 2
04/04/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	20	40	2	10	pro 2
05/04/2025	(19:00/00:00)(00:00/7:00)	19	56	2	19	pro 2

Le tableau fourni contient des données collectées sur une période allant du (26/03/2025) au (05/04/2025), avec des mesures effectuées chaque jour pendant la même plage horaire : de 19:00 à 7:00.

**Figure IV.19 :** Graphe résultats du prototype 2

La comparaison entre (prototype 1) et (prototype 2) révèle que l'analyse comparative des résultats obtenus avec le prototype 1 (données recueillies du 2 mars au 25 mars 2025) et le prototype 2

(données recueillies du 26 mars au 5 avril 2025) met en évidence des disparités notables en termes d'efficacité de production d'eau par condensation atmosphérique. Le prototype 1 a été conçu pour atteindre des volumes plus élevés (6 à 36 ml/jour, moyenne $\sim 15\text{--}20$ ml), notamment lors de journées caractérisées par une humidité élevée (67 %) et un point de rosée bas (jusqu'à -4 °C). Ces résultats suggèrent une meilleure adaptation du prototype aux conditions météorologiques variables (températures de $16,4$ à 21 °C). Cependant, le prototype 2 produit des quantités inférieures (4 à 19 ml/jour, moyenne $\sim 10\text{--}15$ ml), malgré des températures légèrement plus basses (14 à 20 °C) et une humidité similaire (40–56 %), mais avec des points de rosée systématiquement positifs (1 à 5 °C), limitant la condensation. Cette divergence indique que la dissipation thermique du froid se produit à la fois le long et autour des tuyaux en plastique, ce processus induit une augmentation de la température qui, à son tour, affecte le point de rosée et l'humidité de la surface. Bien que le prototype 2 présente une production plus régulière, son rendement reste inférieur. En revanche, le prototype 1, bien que plus performant, montre une certaine instabilité, comme l'illustre la chute significative du volume de 36 millilitres à 6 millilitres en l'espace de quelques jours.

IV.6. Les résultats des analyses physico-chimique de l'eau récupéré de l'air :

IV.6.1. Les résultats des analyses de (janvier et février) Le tableau présente les valeurs de pH et de conductivité électrique pour 05 échantillons.

L'analyse des échantillons révèle que leur pH est légèrement acide, avec des valeurs comprises entre 6,5 et 6,8. Cette acidité est très proche de la neutralité, représentée par un pH de 7, ce qui est cohérent avec les caractéristiques attendues des eaux naturelles non polluées. En ce qui concerne la conductivité électrique, elle fluctue entre 39 et $115\text{ }\mu\text{S/cm}$, en corrélation avec la concentration et la nature des ions dissous. L'échantillon 1, avec une conductivité de $115\text{ }\mu\text{S/cm}$, révèle une forte teneur en ions, tandis que l'échantillon 3, affichant une conductivité de $39\text{ }\mu\text{S/cm}$, indique une concentration ionique significativement plus faible.

Table IV.5 : les résultats des analyses de (janvier et février)

Echantillon	pH	CE($\mu\text{S/cm}$)
1	6,8	115
2	6,5	108
3	6,7	39
4	6,6	77
5	6,5	69

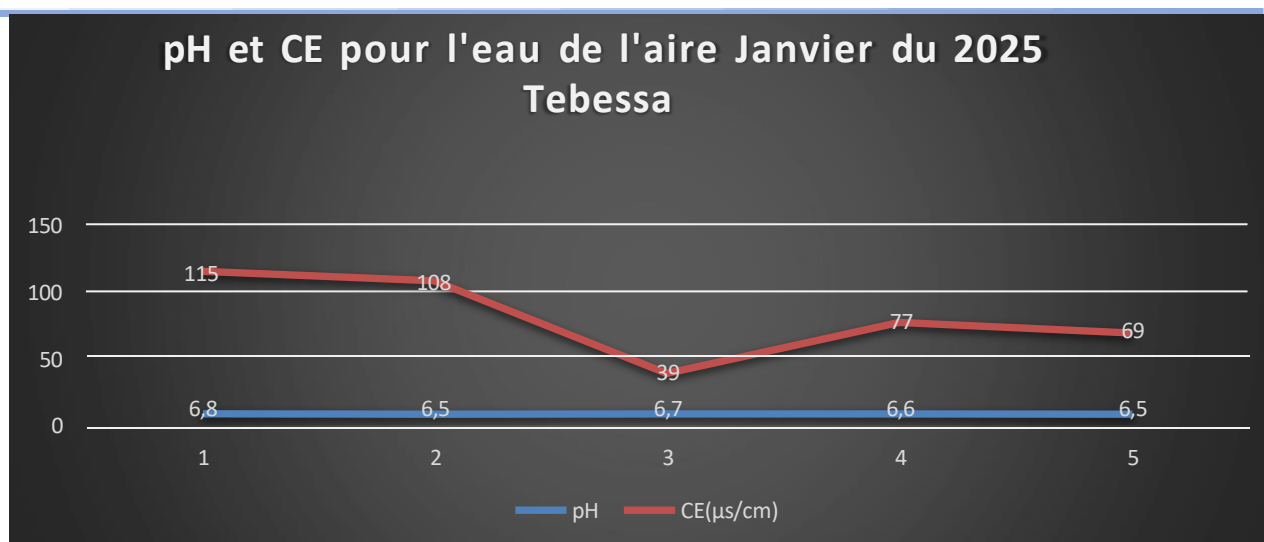


Figure IV.20: Graphe résultats des analyses (janvier, février)

Dans le cadre de l'analyse des données, il a été constaté que les mesures de pH s'inscrivant dans la plage de 6,5 à 6,8 se situent de manière optimale dans la fourchette préconisée par l'Organisation mondiale de la santé pour l'eau potable. En effet, les résultats de l'étude démontrent que ces mesures se trouvent entre 6,5 et 8,5, ce qui atteste de l'absence de risque d'acidité excessive. En outre, les mesures de conductivité électrique, réalisées dans une plage de valeurs s'étendant de 39 à 115 $\mu\text{S}/\text{cm}$, se sont avérées nettement inférieures au seuil de tolérance standard, fixé à 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Bien que l'augmentation de la conductivité ne constitue pas nécessairement un danger immédiat, elle peut potentiellement affecter la perception organoleptique de l'eau ou être le signe d'une minéralisation accrue.

IV.6.2. Les résultats des analyses de (mars et avril) : Le tableau présente les valeurs de pH et de conductivité électrique pour 11 échantillons.

Table IV.6 : les résultats des analyses de (mars et avril)

Echantillon	ph	conductivité
1	5,5	45,6
2	5,3	70
3	5,4	65
4	5,5	56
5	5,6	62,5
6	5,6	113
7	5,7	65
8	5,7	65
9	5,7	72,5
10	5,8	58
11	5,8	72

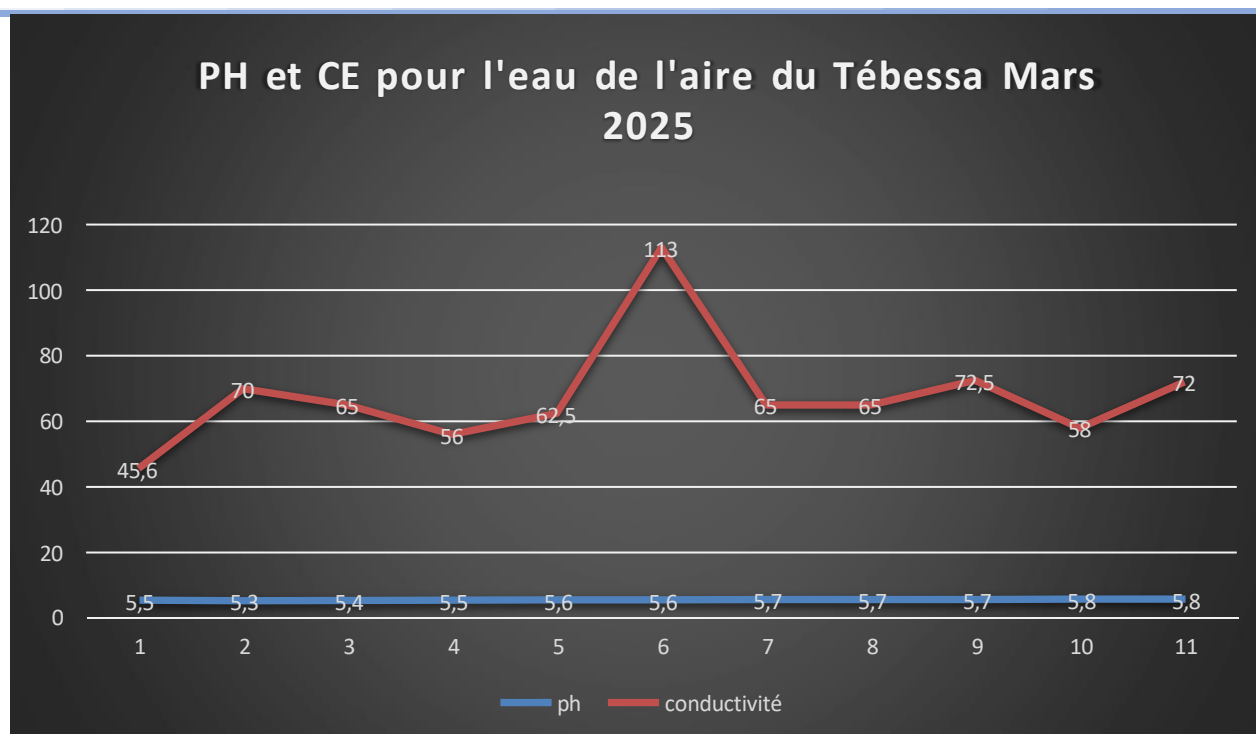


Figure IV.21: Graphe résultats des analyses (mars et avril)

L'analyse des échantillons révèle une tendance générale à l'acidité, avec des valeurs de pH s'inscrivant entre 5,3 et 5,8. Ce résultat indique que les solutions analysées sont acides. Par ailleurs, la conductivité électrique, qui reflète la concentration et la nature des ions dissous, varie de 45,6 à 113 $\mu\text{S}/\text{cm}$. L'échantillon 6, qui présente une conductivité de 113 $\mu\text{S}/\text{cm}$, révèle une forte teneur ionique. En revanche, l'échantillon 1, dont la conductivité est de 45,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$, traduit une concentration nettement plus faible.

Les critères de potabilité de l'eau, établis par des normes sanitaires strictes telles que celles de l'OMS, reposent notamment sur le pH, qui constitue un indicateur-clé : toute eau dont le pH est inférieur à 6,5 est considérée comme non potable. Quant à la conductivité électrique, même si les valeurs mesurées ne révèlent pas de risque immédiat, elles justifient la réalisation d'analyses complémentaires afin de confirmer l'innocuité et d'affiner l'évaluation de la qualité de l'eau.

IV.6.3. La comparaison entre l'analyse entre (Janvier et Février), (Mars et Avril) :

L'analyse comparative des résultats de qualité de l'eau entre les deux échantillons met en évidence des variations significatives associées à la saison et aux conditions environnementales. L'analyse du pH des échantillons révèle des valeurs légèrement alcalines pour l'échantillon 1 (janvier 2025), avec un spectre compris entre 6,5 et 6,8. En revanche, l'échantillon 2 (mars 2025) présente des valeurs nettement plus acides, avec un intervalle de mesure allant de 5,3 à 5,8. Ces observations

suggèrent une influence saisonnière, marquée par une pollution atmosphérique accrue durant les périodes hivernales et printanières. En ce qui concerne la conductivité électrique (CE), l'échantillon 1 présente des variations allant de 39 à 115 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indiquant une eau peu minéralisée à modérément chargée en ions. L'échantillon 2, quant à lui, affiche des valeurs similaires (45,6-113 $\mu\text{S}/\text{cm}$), avec un pic à 113 $\mu\text{S}/\text{cm}$, reflétant une concentration ionique plus élevée, probablement attribuable à des particules atmosphériques ou à des sources de pollution locales. Ces écarts pourraient également être attribuables à l'efficacité variable du module Peltier, qui est conçu pour séparer les impuretés en fonction des conditions climatiques. Bien que les deux échantillons étudiés présentent des concentrations en nitrates conformes aux normes de potabilité (pH 5-6,5 et CE < 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$), une acidité excessive (pH < 5,5) ou une minéralisation élevée pourraient nécessiter des traitements complémentaires, tels que la neutralisation ou la filtration, afin d'assurer la qualité sanitaire de l'eau. Ces résultats mettent en exergue l'importance cruciale du calibrage du système Peltier et de la surveillance régulière des paramètres environnementaux afin d'assurer une optimisation constante de la qualité de l'eau en fonction des variations saisonnières.

IV.7. Conclusion :

Les recherches menées en hiver 2025 ont révélé que le module Peltier présentait une efficacité notable. En effet, des productions maximales de 30 ml ont été enregistrées, et ce, dans des conditions humides (85 %) et tempérées (10 °C). Cependant, il convient de noter que sa performance est étroitement liée au point de rosée et à l'humidité ambiante. En outre, les pannes techniques observées soulignent l'importance cruciale d'une robustesse accrue du système.

Dans le cadre du développement de la production dans la région de Tébessa, il est essentiel d'identifier les axes d'amélioration susceptibles de contribuer à la stabilisation de la production et à son extension à grande échelle. Ces axes d'amélioration concernent notamment l'optimisation du refroidissement, la gestion de la glace et le suivi des paramètres secondaires.

La production d'eau par condensation atmosphérique est étroitement liée aux conditions climatiques locales, avec une dépendance critique à l'humidité relative et au point de rosée. Bien que le module Peltier démontre son potentiel en hiver et au début du printemps, son efficacité reste limitée par des contraintes d'ordre technique et par des variations saisonnières.

Le prototype 1 s'avère plus efficace, car en élimine la nécessité d'une intervention humaine et permet la production automatisée d'une quantité substantielle d'eau. Cependant, le prototype 2 nécessite une intervention manuelle toutes les 10 minutes pour remplacer la glace utilisée dans le système de refroidissement du liquide, ce qui se traduit par une diminution de la production d'eau. Il ressort de l'analyse que le premier prototype présente une efficacité supérieure au deuxième prototype.

À partir des données communiquées des résultats des analyses de l'eau récupéré du l'air pour la période de (janvier et février) ; l'eau est potable en ce qui concerne le pH et la conductivité électrique. Cependant, l'absence de tests sur les contaminants microbiologiques et chimiques ne permet pas d'assurer une certification définitive. Une analyse exhaustive s'avère impérative pour écarter tout risque sanitaire.

Les eaux ne sont pas potables dans le cas des résultats des analyses pour ; (mars et avril), en raison de leur pH acide, car des changements urbains dans la zone d'étude. Néanmoins, une étude plus approfondie s'avère nécessaire afin d'identifier la cause liée à cette acidité qui est probablement à une source de pollution de l'air.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

Dans le cadre de la présente étude, une recherche approfondie a été conduite sur l'exploitation de l'humidité atmosphérique pour la production d'eau potable dans la région semi-aride de Tébessa. Cette étude, a fait usage de modules thermoélectriques à effet Peltier. Cette démarche s'inscrit dans un contexte global de pénurie d'eau douce, exacerbée par le changement climatique et les pressions humaine, et vise à proposer une solution innovante et durable adaptée aux conditions arides et semi-arides.

Les résultats expérimentaux obtenus montrent que la condensation de l'humidité atmosphérique par l'intermédiaire de modules Peltier est techniquement réalisable. Le volume d'eau produit varie entre 3 et 36 millilitres par jour, en fonction des conditions climatiques. Comparé à d'autres études nos résultats sont satisfaisants et le volume d'eau récupéré peut augmenter en augmentant la surface refroidit.

Les paramètres clés qui influencent l'efficacité du système sont l'humidité relative (seuil minimal de 60 %), la température ambiante (optimum entre 10 et 15 °C), et la proximité du point de rosée.

Les analyses physico-chimiques de l'eau récupérée révèlent un pH légèrement acide (5,3–6,8) et une conductivité électrique inférieure à 115 $\mu\text{S}/\text{cm}$, conformes aux normes de potabilité de l'Organisation mondiale de la santé pour certaines périodes, bien que des tests complémentaires soient nécessaires pour garantir l'absence de contaminants microbiologiques ou chimiques.

L'analyse comparative des deux prototypes évalués révèle une prépondérance du prototype n°1, fondé sur une dissipation thermique active, sur le prototype n°2, qui recourt à un système hybride de refroidissement par liquide. Cependant, les défis liés à la consommation énergétique élevée, à la formation de glace en conditions extrêmes et à la maintenance technique soulignent la nécessité d'optimiser ces systèmes pour une application à grande échelle.

Du point de vue de l'environnement et de l'économie sociale, cette approche présente un potentiel substantiel pour les régions affectées par une pénurie d'eau. Cette technologie repose sur une ressource atmosphérique renouvelable et dont la dépendance aux infrastructures existantes est limitée. Elle fait également appel à des technologies dont l'impact écologique est réduit (absence de fluides frigorigènes, compacité, et faible bruit). Cependant, son déploiement

à long terme nécessite des améliorations en termes d'efficacité énergétique, de résilience aux conditions climatiques extrêmes et de coûts de fabrication.

Dans cette perspective, il serait pertinent d'explorer des matériaux hygroscopiques afin d'améliorer l'adsorption de l'humidité (processus du polymère), d'intégrer des sources d'énergie renouvelable (solaire, éolienne) afin de réduire la dépendance énergétique, et de concevoir des systèmes modulaires adaptés aux besoins des communautés rurales ou isolées. Une validation à plus grande échelle, couplée à une modélisation thermodynamique précise, permettrait également de généraliser cette méthode à d'autres zones géographiques.

Dans l'ensemble, cette recherche contribue de manière significative à l'avancement de la connaissance dans le domaine de la condensation atmosphérique, qu'elle soit active ou passive, en tant que source d'eau alternative. Dans le cadre de ses activités, l'organisation contribue à l'élaboration de nouvelles stratégies de gestion des ressources hydriques en Algérie. Cette contribution se caractérise par l'intégration de technologies innovantes et le renforcement des capacités locales d'adaptation aux défis climatiques. Cette approche permet d'envisager des perspectives encourageantes pour la sécurité hydrique future, en cohérence avec les objectifs de développement durable et la lutte contre la désertification. Elle propose des solutions durables applicables non seulement dans les régions arides d'Algérie, mais aussi à l'échelle mondiale.

Bibliographie

- **Ahrestani, Z., Sadeghzadeh, S., & Motejadded Emrooz, H. B. (2023).** An overview of atmospheric water harvesting methods, the inevitable path of the future in water supply. In RSC Advances (Vol. 13, Issue 15, pp. 10273–10307). Royal Society of Chemistry.
- **Baturkin V., (2005).** Micro-satellites thermal control – concepts and components. Acta Astronautica 56, 161-170
- **BELLOULA, M. (2018).** Evaluation de l’aptitude aux écoulements et risque d’érosion dans le haut cours de la Medjerda par Modélisation (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- **Benarfa, N., & Louadi, K. (2005).** Inventaire de la faune apoidienne dans la région de Tébessa.
- **Berner, E. K., & Berner, R. A. (2012).** Global Environment: Water, Air, and Geochemical Cycles (2^e éd.). Princeton University Press.
- **Beysens D., Milimouk I., (2000).** Pour des ressources alternatives en eau. Sécheresse 2000, 11 (4) : 281-8.
- **Bouceta, D. (2018).** Effets des changements climatiques sur les cultures pratiquées et les ressources en eau dans la région de Biskra (Doctoral dissertation, université Mohamed Kheider Biskra.
- **Bouchagoura, L. (2019)** Étude de la qualité des eaux souterraines et vulnérabilité à la pollution d'une nappe superficielle à l’extrême Est algérien : Cas de la région de Tébessa. Université Tébessa
- **Boudemagh, D (2010)** « Synthèse et Etude de Matériaux Thermoélectriques du Système Mg₂Si_{1-x}Sn_x ». Thèse de Doctorat, université de Grenoble, France, 2010
- **Boudy. P, (1952) -:** Guide du foresier en Afrique du Nord. Edition : la maison rustique, 505 P de la Tunisie Ed. Larose, 453p
- **Boumachrouk, R. (2020).** Evolution des extrêmes pluviométriques dans un contexte de changement climatique dans une zone semi-aride (cas de la wilaya de Tébessa , (Mémoire de master, Université de Khenchela).
- **Casian, A., Stockholm, J. G., Dusciac, V., & Nicic, V. (2009).** Low-Dimensional Organic Crystal Tetrathiotetracene–Iodide as Thermoelectric Material: Reality and Prospects. Journal of nanoélectroniques and optoélectroniques, 4(1), 95-100
- **Chikha Belgacem, B., & Debbar, H.** Etude Hydrologique et Hydrogéologique de la région de Tébessa par application de la télédétection et SIG (Doctoral dissertation).
- **Chow V., Maidement D. et Mays L. (1988).** Applied hydrology. Ed. Mc Graw-Hill
- **CLUS O., 2007.** Condenseurs radiatifs de la vapeur d’eau atmosphérique (Rosée) comme source alternative d’eau douce. Thèse soutenue le 10-04-2007 à l’Université de Corse Pasquale Paoli, Faculté des sciences et technique.

- **Degaichia.O, (2014)**, Sédimentation et paléoenvironnement des sédiments du pliocène du fossé d'effondrement de Tébessa et ses abords (Atlas saharien orientale, NE de l'Algérie, Thèse doctorat, 214 page, université Annaba, faculté science de la terre
- **Derradji, T. (2023)**. Régionalisation et cartographie des précipitations et des indices de sécheresse dans les bassins versants du Nord-Est algérien (Constantinois-Seybouse-Mellègue) (Doctoral dissertation, Université Kasdi Merbah Ouargla).
- **Diliberto, S., Richoux, V., Stein, N., & Boulanger, C. (2008)**. Influence of pulsed electrodeposition on stoichiometry and thermoelectric properties of bismuth telluride films. *physica status solidi (a)*, 205(10), 2340-2344
- **Djebari, H. (2011)**. Ressources et essais de gestion intégrées des eaux du bassin d'El Malabiod, W. de Tébessa, Nord-est Algérien
- **Gioda A. Acosta Baladon A. (1991)** L'importance des précipitations occultes sous les tropiques secs. *Sécheresse* ; 2 : 132-5.
- **Gioda A. Acosta Baladon A. Fontanel P. Hernandez Martin Z. Santos A. (1992)** L'arbre fontaine. *La Recherche* ; 249 : 1400-8.
- **Graham A.S., (1989)**. Atmospheric water condenser. UK patent application GB 2209683A ; 24-05-1989
- **Gueddouh, K. (2024)**. *Possibilité de la production d'eau dans la région de Biskra par condensation de l'humidité atmosphérique* [Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, Département de Génie Civil et Hydraulique].
- **Guerred, C. (2018)**. Les ressources en eau dans les régions semi arides, cas du sous bassin versant de l'Oued Mellegue aval ; région de Tébessa (nord est Algérien) (Thèse de doctorat, Université de Annaba).
- **Hamaidia, Z., & Bekkai, A. E. (2019)**. Comparaison des inventaires de la faune orthoptérique de la région de Tébessa réalisés par différentes techniques d'échantillonnage (Doctoral dissertation, Université Larbi Tébessi Tébessa).
- **Kieser M., Edler G., Daponte T., Leon F., Verschaeren P., Corneel M., (2002)**. Agricultural method and materials for screening solar radiation. US Patent 6441059, Aug 2002
- **Lekouch, I. (2010)**. Production d'eau potable par condensation passive de l'humidité atmosphérique (rosée). *Physique Atmosphérique et Océanique [physics.ao-ph]*. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI ; Université Ibn Zohr, Agadir, 2010. Français. FfNNT : ff. Ffpastel-00547593ff.
- **Linder, A. (1970)**. La thermoélectricité
- **Lindblom.J and B. Nordell , (2006)** Condensation irrigation a system for desalination and irrigation, *World Renewable Energy and Environmental Conference: Abstract Book* , ,
- **Lindblom and B. Nordell** , Water production by underground condensation of humid air, *Desalination*, 2006, 189 , 248 —260

- **Mekonnen, M. M. & Hoekstra, A. Y. (2016).** Four billion people facing severe water scarcity. *Sci. Adv.* 2, e1500323

- **Milani, D., Qadir, A., Vassallo, A., Chiesa, M., & Abbas, A. (2014).** Experimentally validated model for atmospheric water generation using a solar assisted desiccant dehumidification system. *Energy and Buildings*, 77, 236-246
- Ministère de l'écologie, du développement durable et du l'Energie
- **Nikolayev V.S., Beysens D., Muselli M., (2001).** A computer model for assessing dew/frost surface deposition. *Proceedings of the Second International Conference on Fog and Fog Collection*, St John's (Canada) July 2001 Eds.R.S. Shemenauer and H. Puxbaum, IRDC, 333 – 336
- **Nilsson T. M., (1994).** Optical Scattering properties of Pigmented Foils for Radiative Cooling and Water Condensation: Theory and Experiment. Chalmers University of Technologie, Göteborg, Sweden. PhD
- **Nobileau, A., Gaurav, R., Chougar, L., Faucher, A., Valabrègue, R., Mangone, G., ... & Lehericy, S. (2023).** Neuromelanin-sensitive magnetic resonance imaging changes in the locus coeruleus/subcoeruleus complex in patients with typical and atypical Parkinsonism. *Movement Disorders*, 38(3), 479-484.
- **Organisation météorologique mondiale (OMM). (2012).** Guide de l'hydrologie opérationnelle.
- **Peeters, R., Vanderschaeghe, H., Rongé, J., & Martens, J. A. (2020).** Energy performance and climate dependency of technologies for fresh water production from atmospheric water vapour. In *Environmental Science: Water Research and Technology* (Vol. 6, Issue 8, pp. 2016–2034). Royal Society of Chemistry.
- **Pied J.P., (1978).** Method for increasing the productive yield of crops with polyolefin films. US Patent 4075784, feb 1978
- **PNUD. (2009).** Problématique du secteur de l'eau et impacts liés au climat en Algérie.
- **Ramade. F., (1993) -:** Eléments d'écologie, DUNOD, Paris, France.
- **Robinson, M. (2000).** Principles of Hydrology (4^e éd.). McGraw-Hill
- **ROJONIAINA Faneva ,(2023).** Production de l'eau à partir de l'air ambiant en se basant sur l'effet Peltier ; Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de LICENCE En Génie mécanique et Industriel, université d'Antananarivo, 95 page
- **Salehi, A. A., Ghannadi-Maragheh, M., Torab-Mostaedi, M., Torkaman, R., & Asadollahzadeh, M. (2020).** A review on the water-energy nexus for drinking water production from humid air. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 120). Elsevier Ltd.
- **Scott, C.; Sugg, Z. (2015)** Global energy development and climate-induced water scarcity—Physical limits, sectoral constraints, and policy imperatives. *Energies* 2015, 8, 8211–8225.
- **Seghir, K. (2008).** Vulnérabilité à la pollution, protection des ressources en eaux et gestion active du sous-système aquifère de Tébessa Hammamet (Est Algérien) (Doctoral dissertation, Annaba).

-
- **Seltzer.P (1949)** : le Climat de l'Algérie. (book)
 - **Stuckey W. and Meshishnek M., (2003).** Ground Testing of Spacecraft Material. Crosslink, The Aerospace Corporation, 4 (2), 36-41
 - **Tahar, M. (2024).** Etude périmètre d'irrigation de Tebessa secteur A (300 ha) à partir d'une STEP Wilaya de Tebessa (Doctoral dissertation).
 - **Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015).** Plant physiology and Development
 - **Vargas William E., Greenwood P., Otterstdt J.E., Niklasson G.A., (2000).** Light scattering in pigmented coatings: experiments and theory. Solar Energy, 6, 553-561

Site web

[\(https://fr.climate-data.org/afrique/algerie/tebessa/tebessa-3692/\)](https://fr.climate-data.org/afrique/algerie/tebessa/tebessa-3692/)

[\(https://www.horizons.dz/?p=51642&utm_\)](https://www.horizons.dz/?p=51642&utm_)

[\(https://www.cresus.dz/wp-content/uploads/2024/04/1525.pdf?utm\)](https://www.cresus.dz/wp-content/uploads/2024/04/1525.pdf?utm)

[\(https://www.projetecolo.com/\)](https://www.projetecolo.com/)

[\(https://www.meted.ucar.edu/\)](https://www.meted.ucar.edu/)

[\(https://www.timeanddate.com/weather/%402477461/climate\)](https://www.timeanddate.com/weather/%402477461/climate)

[\(https://meteo42.jimdofree.com/le-saviez-vous/article-6-le-brouillard/\)](https://meteo42.jimdofree.com/le-saviez-vous/article-6-le-brouillard/)

[\(http://www.wipo.int/wipo_magazine/fr/2010/04/article_0005.html\)](http://www.wipo.int/wipo_magazine/fr/2010/04/article_0005.html)

[\(https://wikiwater.fr/e5-water-recovery-by-condensation\)](https://wikiwater.fr/e5-water-recovery-by-condensation)

[\(https://www.geekmaispasque.com/\)](https://www.geekmaispasque.com/)

[\(https://www.apnnews.com/\)](https://www.apnnews.com/)

[\(https://www.nature.com/articles/s41467-022-30505-2\)](https://www.nature.com/articles/s41467-022-30505-2)

[\(Atmospheric Water Generator by Paul O'Keeffe at Coroflot.com\)](Atmospheric Water Generator by Paul O'Keeffe at Coroflot.com)

[\(https://www.youtube.com/watch?v=S2Cq_TpNXoQ\)](https://www.youtube.com/watch?v=S2Cq_TpNXoQ)

[\(https://pitch-technologies.fr/produits/laird-principe-module-peltier-agent-en-france/\)](https://pitch-technologies.fr/produits/laird-principe-module-peltier-agent-en-france/)

[\(https://www.netkulture.fr/article245/mini-eolienne-waterseer\)](https://www.netkulture.fr/article245/mini-eolienne-waterseer)

