

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 GUELMA

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Hydraulique

Option : HYDRAULIQUE URBAINE

Présentée par : TOUAHRI Hanane

Thème : Technologies de récupération de l'eau atmosphérique

Sous la direction de : Docteur DORBANI Meriem

Juin 2024

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Allah de m'avoir donné la force et la volonté nécessaires pour achever ce modeste travail. J'exprime également ma profonde gratitude envers mes chers parents, qui m'ont toujours entouré d'amour et d'affection, et qui m'ont tout donné pour garantir ma réussite.

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance à mon encadrant, Docteur DORBANI Meriem , pour ses conseils avisés, son soutien constant et sa disponibilité. Son expertise et ses encouragements m'ont permis de surmonter les défis de ce projet et de progresser avec confiance.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude aux membres de jury pour le temps et l'attention consacrés à évaluer mon travail. Vos précieux conseils et votre expertise ont grandement contribué à enrichir mon projet.

Hanane

Dédicaces

À moi-même, pour ma persévérance, ma détermination et ma passion pour l'apprentissage.

À mes parents, pour leur amour inconditionnel et leur soutien indéfectible.

À ma famille, pour leur encouragement constant et leur présence bienveillante.

Aux amis qui ont partagé ce voyage avec moi.

À ceux qui m'ont inspiré et encouragé tout au long de ce parcours.

Résumé

L'eau est une ressource vitale mais inégalement répartie dans le monde. De nombreuses régions sont sujettes à des stress hydriques, ne disposant pas de suffisamment d'eau douce pour répondre aux besoins de leur population et de leurs activités économiques. Dans le même temps, il existe d'importantes quantités d'eau sous forme de vapeur et d'humidité dans l'atmosphère. Dès lors, la récupération de cette eau atmosphérique représente une opportunité pour compléter l'approvisionnement en eau dans les zones arides.

Face à l'augmentation des stress hydriques dans de nombreuses régions du monde, la récupération de l'important volume d'eau présent sous forme de vapeur et d'humidité dans l'atmosphère apparaît comme une opportunité pour compléter l'approvisionnement en eau douce.

Les technologies de récupération des eaux atmosphériques (TREA) permettent de produire de l'eau potable à partir de l'humidité de l'air. Face à la pénurie d'eau, ces systèmes offrent une source d'approvisionnement décentralisée, renouvelable et écologique. Les principaux types de TERA sont la captation de rosée/brouillard, la déshumidification et la captation d'humidité atmosphérique. Leur productivité dépend des conditions météo locales. Les avantages sont nombreux mais des défis techniques, économiques et sociaux freinent encore leur adoption à grande échelle. Bien que complémentaires aux sources d'eau classiques, les TREA constituent une solution prometteuse pour la sécurité hydrique dans un cadre de développement durable. Des efforts sont nécessaires pour optimiser ces technologies à fort potentiel.

Astract

Water is a vital resource but unevenly distributed around the world. Many regions are subject to water stress, lacking sufficient freshwater to meet the needs of their population and economic activities. At the same time, there are significant amounts of water in the form of vapor and humidity in the atmosphere. Therefore, harvesting this atmospheric water represents an opportunity to supplement water supply in arid areas.

Faced with increasing water stress in many regions of the world, harvesting the significant volume of water present in the form of vapor and humidity in the atmosphere appears as an opportunity to supplement freshwater supply.

Atmospheric water harvesting technologies (AWHT) allow the production of potable water from air humidity. Facing water scarcity, these systems offer a decentralized, renewable and environmentally-friendly water supply source. The main types of AWHT are dew/fog harvesting, dehumidification, and atmospheric moisture harvesting. Their productivity depends on local weather conditions. The advantages are numerous but technical, economic and social challenges still hinder their large-scale adoption. Although complementary to conventional water sources, AWHT represent a promising solution for water security within a sustainable development framework. Efforts are needed to optimize these high-potential technologies.

ملخص

الماء مورد حيوي ولكنه موزع بشكل غير متساوٍ في جميع أنحاء العالم إذ تعاني العديد من المناطق من ضغوط مائية، حيث لا تتوفر لديها كميات كافية من المياه العذبة لتلبية احتياجات سكانها وأنشطتها الاقتصادية. في الوقت نفسه، توجد كميات كبيرة من الماء على شكل بخار ورطوبة في الغلاف الجوي. لذلك، فإن استرداد هذا الماء الجوي يمثل فرصة لتعزيز إمدادات المياه في المناطق الجافة.

في مواجهة تزايد الضغوط المائية في العديد من مناطق العالم، يبدو استرداد الحجم الكبير من الماء الموجود على شكل بخار ورطوبة في الغلاف الجوي فرصة لتعزيز إمدادات المياه العذبة.

تسمح تقنيات استرداد المياه الجوية (TREA) بإنتاج مياه صالحة للشرب من رطوبة الهواء. في مواجهة شح المياه، تقدم هذه الأنظمة مصدرًا لإمدادات المياه اللامركزية والمتجددة والصديقة للبيئة. تتمثل أنواع TERA الرئيسية في التقاط الندى/الضباب، وإزالة الرطوبة، والتقاط رطوبة الغلاف الجوي. تعتمد إنتاجيتها على الأحوال الجوية المحلية. الفوائد كثيرة ولكن لا تزال هناك تحديات تقنية واقتصادية واجتماعية تعيق اعتمادها على نطاق واسع. على الرغم من أنها تكملة لمصادر المياه التقليدية، إلا أن TREA تشكل حلاً واعدًا لأمن المياه في إطار التنمية المستدامة. هناك حاجة لبذل جهود لتحسين هذه التقنيات ذات الإمكانيات العالية.

Tables des matières

- Remerciements
- Dédicaces
- Résumé
- Abstract
- ملخص
- Tables des matières
- Liste des figures
- Liste des tableaux
- Liste des abréviations

Introduction générale..... i

Chapitre I : Les capacités actuelle et future de l'eau en Algérie

1.1. Introduction	2
1.2. Les réserves en eau dans le monde.....	1
1.2.1.Les principales ressources en eau dans le monde	4
1.3.L'eau en Algérie du nord	5
1.3.1.Les ressources en eau en Algérie.....	7
1.4.L'eau dans le sud Algérien	13
1.5.Conclusion.....	15

Chapitre II :Les principaux problèmes hydrauliques en Algérie

2.1. Introduction	16
2.2. Les problèmes hydrauliques en Algérie	16
2.2.1. L'érosion des sols	18
2.2.2. Envasement dans les barrages	21
2.2.3. Évaporation des lacs de barrages.....	22
2.2.4. Fuites dans les barrages.....	23

2.2.5. Eutrophisation des retenues de barrages	24
2.2.6. Les inondations	24
2.2.7. Intrusion des eaux marines dans les aquifères côtiers	27
2.3. Les stratégies pour augmenter le stockage de l'eau en Algérie	27
2.4. Conclusion.....	28

Chapitre III :La technologie de récupération des eaux atmosphériques

3.1. Introduction	30
3.2. Problèmes de pénurie d'eau potable.....	30
3.2.1. Croissance démographique	30
3.2.2. Changement climatique.....	30
3.2.3. Pollution de l'eau	31
3.2.4. Gestion inefficace des ressources en eau	31
3.2.5. Conflits géopolitiques	31
3.2.6. Déforestation et dégradation des écosystèmes	31
3.3. Définition	31
3.4. L'importance de la récupération des eaux atmosphériques.....	32
3.5. Les sources d'eau atmosphérique.....	33
3.6. Les différentes techniques de récupération des eaux atmosphériques	35
3.6.1. La condensation par refroidissement de l'air.....	36
3.6.1. La condensation par refroidissement de l'air.....	36
3.6.1.1 Fonctionnement détaillé	37
3.6.1.2. Avantages et inconvénients de la condensation par refroidissement	36
3.6.2. Déshumidification par adsorption	37
3.6.3. Récolte de rosée	41

3.6.4.Capture de brouillard.....	43
3.6.5.Extraction d'eau atmosphérique par membrane	47
3.6.6.Critères de choix de la technique de récupération des eaux atmosphériques.....	49
3.7. Les aspects économiques, la viabilité et la durabilité de ces systèmes	50
3.7.1.Les aspects économiques	50
3.7.2.Viabilité économique.....	51
3.7.3.Durabilité de ces systèmes	52
3.7.4.Rentabilité économique.....	53
3.7.5.Rendements et productivité.....	53
3.7.6.Concurrence avec autres sources d'eau	53
3.8.Les challenges technologiques et les pistes d'amélioration potentielle.....	53
3.8.1.Défis technologiques	54
3.8.2.Pistes d'amélioration.....	54
2.4. Conclusion.....	55

Chapitre IV :Technique de condensation par refroidissement de l'air

4.1. Introduction	55
4.2. Principes de base de la condensation par refroidissement de l'air	56
4.2.1. Le processus de changement d'état de la vapeur à l'eau liquide.....	56
4.2.2. Notion de point de rosée et sa température	57
4.2.3. Facteurs influençant la condensation	58
4.3. Différentes méthodes de condensation pour l'eau atmosphérique.....	59
4.4. Conception des systèmes de condensation.....	60
4.5.Efficacité et optimisation des systèmes.....	61
4.5.1. Facteurs influençant le rendement.....	61

4.5.2. Pistes d'optimisation.....	62
4.6.Applications et perspectives.....	63
4.7.Innovations technologiques.....	64
4.7.1.Récolte de l'eau atmosphérique moderne	64
4.7.2.Systèmes Solaires.....	66
4.7.3.Applications d'utilisation et scénarios probables	66
4.7.4.Avantages et bénéfices de l'AWG	67
4.7.5.Comparer AWG avec le dessalement	68
4.7.6.Régler les problèmes d'eau en bouteille	69
4.8.Cas pratiques et développements récents	69
4.9.Applications et Avantages	70
4.10. Défis et Perspectives Futures	73
4.10.Exemple d'un AWG local.....	73
4.10.1. Le nom.....	74
4.10.2. Le logo.....	74
4.10.3 Description	75
4.10.4. Caractéristiques techniques	75
4.10.5. Applications.....	76
4.11. Conclusion.....	78
Conclusion générale	79
Bibliographies	81

Liste des figures

Chapitre I : Les capacités actuelle et future de l'eau en Algérie

- Figure 1.1 Les inégalités de l'eau dans le monde
- Figure 1.2 Réserves en eau dans le monde
- Figure 1.3 Répartition de l'eau dans le monde
- Figure 1.4 Répartition de l'eau en Algérie du Nord
- Figure 1.5 Découpage de l'Algérie du nord en quatre régions
- Figure 1.6 Importance d'oued Tefna
- Figure 1.7 Oued El Harrche
- Figure 1.8 Oued El Damous
- Figure 1.9 Barrage de Foum El Ghrza d'une capacité totale de 47 millions de m³
- Figure 1.10 Barrage de Zardezas d'une capacité totale de 35 millions de m³
- Figure 1.11 Carte du Sud Algérien

Chapitre II : Les principaux problèmes hydrauliques en Algérie

- Figure 2.1 Principaux problèmes hydrauliques en Algérie
- Figure 2.2 Forte érosion dans le bassin versant à l'amont du barrage d'Ighil Emda (Algérie)
- Figure 2.3 L'érosion éolienne dans le Sahara Algérien
- Figure 2.4 L'érosion éolienne dans le Sahara Algérien
- Figure 2.5 Les zones montagneuses en Algérie menacées par une « très grave érosion »
- Figure 2.6 Conséquences de l'érosion des bassins versants
- Figure 2.7 Problématique de l'envasement des barrages en Algérie
- Figure 2.8 Evaporation des lacs de barrages dans les régions arides et semi-arides

- Figure 2.9 Evaluation des débits de fuites dans les barrages Algériens
- Figure 2.10 Facteurs favorisant la formation des crues
- Figure 2.11 Fréquences des crues
- Figure 2.12 Facteurs aggravants les crues
- Figure 2.13 Types d'inondations
- Figure 2.14 Procédés d'augmentation de la capacité de stockage de l'eau en Algérie

Chapitre III :La technologie de récupération des eaux atmosphériques

- Figure 3.1 Exemple de procédé de condensation par refroidissement
- Figure 3.2 Principe de fonctionnement d'un déshumidificateur par adsorption
- Figure 3.3 Principe de fonctionnement de la récolte de rosée
- Figure 3.4 Des capteurs de brouillard pour produire de l'eau

Chapitre IV :Technique de condensation par refroidissement de l'air

- Figure 4.1 Principes de L'effet Peltier
- Figure 4.2 Principes de la méthode de condensation
- Figure 4.3 Une région Aride
- Figure 4.4 AWG en milieu urbain
- Figure 4.5 Logo AtmoDrink
- Figure 4.6 Affiche publicitaire pour la machine AtmoDrink

Listes des tableaux

Chapitre I : Les capacités actuelle et future de l'eau en Algérie

Tableau 1.1 Types d'eau

Tableau 1.2 Dotation annuelle en eau par habitant en Algérie

Tableau 1.3 Précipitations des quatre régions de l'Algérie du Nord

Tableau 1.4 L'apport des oueds de l'Algérie du Nord

Tableau 1.5 Nombre de barrages dans les 04 régions de l'Algérie du Nord

Tableau 1.6 Potentialités des eaux souterraines de l'Algérie du Nord

Liste des abréviations

AEP	Alimentation en eau potable
AWG	Atmospheric water generator
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
ERESS	étude des ressources en eau du Sahara septentrional
DGF	la Direction générale des forêts
TEA	Les techniques de récupération des eaux atmosphériques
HR	L'humidité relative
CFD	Computational Fluid Dynamics

Introduction générale

Introduction générale

L'eau est un élément crucial pour la vie sur Terre. Elle couvre environ 71% de la surface de notre planète et constitue environ 60% du corps humain. Elle est indispensable à la vie et représente un enjeu crucial pour le développement durable des sociétés humaines. Malgré sa répartition inégale à travers le globe, l'eau reste une ressource renouvelable grâce au cycle hydrologique naturel. Elle est essentielle pour l'agriculture, l'industrie, la production d'énergie et la préservation des écosystèmes. C'est une ressource essentielle pour la vie humaine, mais elle est de plus en plus menacée par plusieurs facteurs.

La pénurie d'eau douce est un problème réel et croissant qui affecte déjà des millions de personnes à travers le monde. Selon l'Organisation des Nations Unies, d'ici 2050, 45% de la population mondiale vivra dans des zones confrontées à une pénurie d'eau chronique ou récurrente.

L'accès à l'eau douce est l'un des plus grands défis auxquels l'humanité est confrontée à l'échelle mondiale. Avec la croissance démographique, l'urbanisation, le développement économique et les changements climatiques, la demande en eau ne cesse d'augmenter, tandis que les ressources en eau douce sont de plus en plus rares et inégalement réparties. Selon les estimations, environ 2,2 milliards de personnes n'ont pas accès à des services d'approvisionnement en eau potable gérés en toute sécurité (ONU, 2021). Cette situation est particulièrement critique dans les régions arides et semi-arides, où les précipitations sont faibles et irrégulières.

La disponibilité en eau douce est un défi majeur à l'échelle mondiale, notamment dans les régions arides et semi-arides où les ressources en eau sont limitées.

Face à ces défis urgents, il est impératif de diversifier les sources d'approvisionnement en eau, en complément des ressources en eau classiques (eaux de surface, eaux souterraines), et développer des solutions innovantes et durables pour la gestion de l'eau.

C'est dans ce contexte que la technologie de récupération des eaux atmosphériques est suscitée un regain d'intérêt ces dernières années. Elle s'impose comme une technologie prometteuse qui peut contribuer à relever le défi de la pénurie d'eau. Elle se présente comme une alternative prometteuse pour capter et valoriser les ressources en eau présentes dans l'atmosphère, sous forme de pluie, de brouillard ou de rosée, afin de la rendre disponible pour différents usages (consommation, irrigation, etc.).

Cette technologie consiste à collecter l'eau de l'air ambiant à l'aide de différents types de capteurs, comme des filets à brouillard, des panneaux de condensation ou des systèmes de récupération de rosée. L'eau récupérée peut ensuite être stockée et utilisée pour divers usages, tels que la consommation, l'irrigation, ou encore l'approvisionnement en eau des communautés.

L'intérêt de ces technologies réside dans leur capacité à fournir une source d'eau douce supplémentaire, tout en étant généralement plus écologiques et moins coûteuses que les solutions conventionnelles d'approvisionnement en eau, comme le dessalement ou le transfert d'eau sur de longues distances. De plus, elles peuvent s'adapter à différents contextes climatiques et socio-économiques, ce qui en fait des solutions particulièrement intéressantes pour les régions arides et les zones rurales isolées.

Cependant, les technologies actuelles de récupération de l'eau de l'air sont-elles suffisamment efficaces, rentables et durables pour constituer une véritable solution aux problèmes de stress hydrique ? Quels sont les verrous technologiques et économiques qui freinent encore leur déploiement à grande échelle ? Dans quelle mesure les innovations récentes dans ce domaine permettent-elles d'envisager une adoption étendue de ces technologies pour faire face aux pénuries d'eau ?

La problématique consiste donc à évaluer le potentiel des technologies de récupération de l'eau atmosphérique pour répondre de manière viable aux enjeux croissants de rareté de l'eau dans de nombreuses régions du monde.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce mémoire, dont l'objectif principal est d'étudier en profondeur l'état de l'art des technologies de récupération des eaux atmosphériques. Une analyse approfondie de leurs principes de fonctionnement, de leurs performances et de leurs limites sera menée. Les enjeux économiques, environnementaux et sociaux liés à leur mise en œuvre seront également abordés.

A la fin, ce travail vise à identifier les solutions les plus prometteuses à la pénurie d'eau et à dégager des pistes d'amélioration pour une exploitation optimale et durable de ces technologies dans différents contextes géographiques et climatiques.

Chapitre I
Les capacités actuelle
et future de l'eau en
Algérie

Chapitre I :

Les capacités actuelle et future de l'eau en Algérie

1.1. Introduction

L'Algérie est un pays qui fait face à une pénurie d'eau croissante en raison de sa situation géographique dans une zone aride et semi-aride et des effets du changement climatique. L'eau revêt un caractère stratégique du fait de sa rareté et d'un cycle naturellement perturbé et déséquilibré. Qu'il s'agisse de l'eau souterraine ou de l'eau de surface, les ressources sont limitées et, compte tenu des problèmes démographiques et de l'occupation de l'espace (sachant que près de 60% de la population algérienne sont concentrés dans la frange septentrionale du territoire qui ne représente que le dixième de la surface totale du pays), d'importants efforts sont nécessaires en matière d'urbanisation intégrée et de gestion rigoureuse dans l'exploitation des réserves. S'y ajoutent des problèmes de faible mobilisation et de mauvais recyclage par manque de maîtrise des stations d'épuration et l'envasement des retenues. [1]

Les ressources hydriques nationales sont limitées, avec seulement 17 milliards de m³ par an en moyenne, alors que la demande croît rapidement en raison de la croissance démographique et du développement économique.

Le secteur agricole consomme environ 60-70% des ressources en eau disponibles, suivi des usages domestiques (25-30%) et industriels (5-10%).

Pour faire face au stress hydrique, l'Algérie met en œuvre des stratégies comme le dessalement, les transferts d'eau, la réutilisation des eaux usées et la modernisation des réseaux d'irrigation. Cependant, des défis majeurs persistent pour assurer une gestion durable des ressources en eau du pays. [2]

1.2. Les réserves en eau dans le monde

Bien qu'apparemment inépuisable, l'eau est très inégalement répartie dans le monde. Au vu du développement industriel et de la demande de plus en plus croissante, tous les pays auront, à plus ou moins brève échéance, à faire face au problème de son manque. [3]

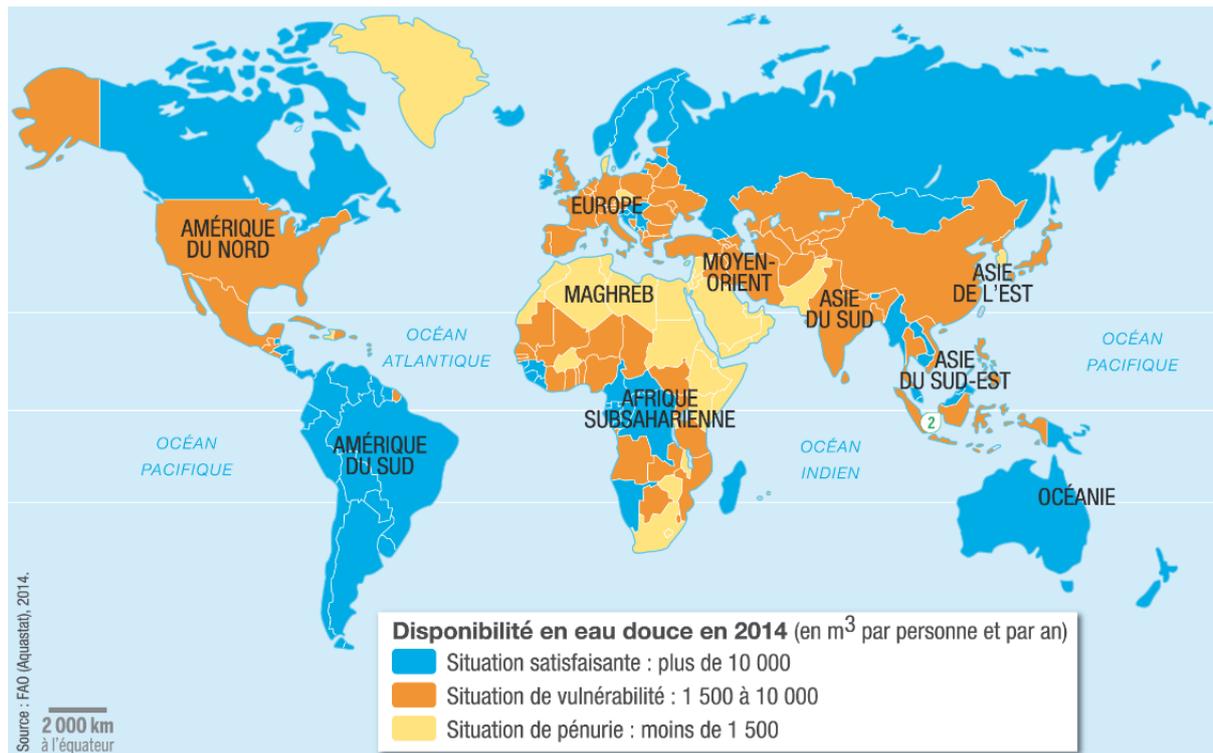


Figure 1.1. Les inégalités de l'eau dans le monde [3]

L'eau douce représente seulement 2,5% des ressources en eau totales de la planète. Le reste est constitué d'eau salée présente dans les océans. Sur ces 2,5% d'eau douce, près de 70% se trouve sous forme de glaces et de neiges dans les calottes glaciaires et les régions montagneuses.

La répartition des ressources en eau douce accessibles est très inégale à travers le monde. Certaines régions comme l'Amérique du Nord, l'Europe occidentale ou encore le Brésil sont relativement bien dotées, tandis que d'autres comme le Moyen-Orient ou l'Afrique du Nord souffrent de pénuries d'eau chroniques.

On estime qu'il y'a sur la planète environ 1.4 milliards de m³ d'eau. Cependant, la majeure partie (97%) de cette eau est présente sous forme d'eau salée dans les mers et les océans difficilement valorisable pour les activités humaines. Des 3% restants (36 millions de km³), plus de $\frac{3}{4}$ constituent les glaciers très peu accessibles. Le $\frac{1}{4}$ restant comprend essentiellement des eaux souterraines (inférieurs à 1% de l'eau totale du globe) et une faible partie sous forme des eaux de surface contenues dans les lacs et les rivières (soit 0.01% de l'eau de la planète) (Fig. 1.2 et tableau 1.1). [4]

Le stress hydrique, lié à la surexploitation et à la pollution des ressources en eau, touche déjà un quart de la population mondiale.

Avec les changements climatiques et la croissance démographique, cette situation risque de s'aggraver dans de nombreuses régions du globe au cours des prochaines décennies. La gestion durable et équitable des ressources en eau devient donc un enjeu majeur pour l'humanité.

La mobilisation des eaux superficielles a été de tous temps une préoccupation pour l'homme. L'humanité est conduite à étudier et à développer divers procédés permettant de l'obtenir à partir des eaux de mers, des eaux saumâtres, et des eaux usées dans des conditions admissibles techniquement et économiquement. [5]

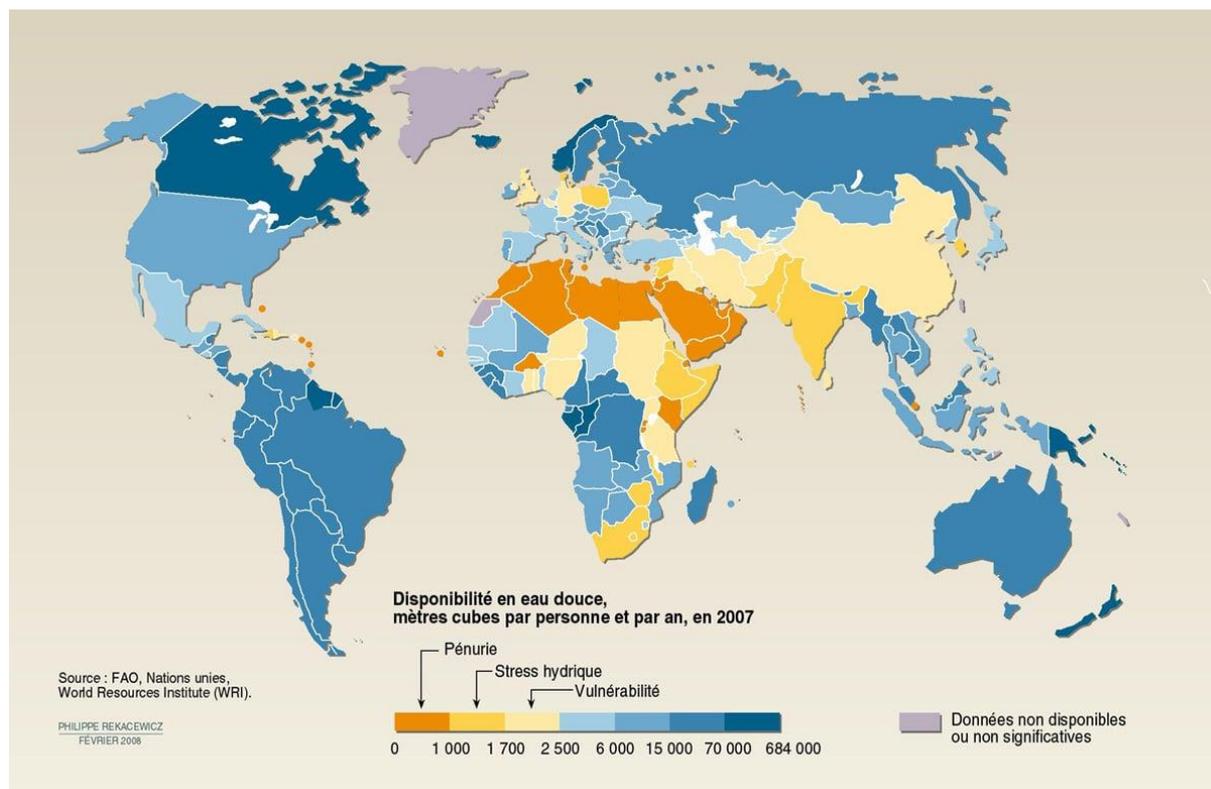


Figure 1.2. Réserves en eau dans le monde [5]

Tableau 1.1 : Types d'eau [5]

Type d'eau	Volume (millions de km ³)
Glaciers	27.5
Eaux souterraines	8.2
Humidité des sols	0.007
Lacs d'eau douce	0.1
Rivières	0.017
Mers intérieures	0.105
Atmosphère	0.013
Biosphère	0.0011

A l'échelle de la planète, l'eau est suffisamment importante, il n'y a pas de risque de pénurie globale. Les ressources en eau sont largement suffisantes. Approximativement, l'humanité à sa disposition entre 30 000 et 35 000 km³ par année et nous consommons à l'heure actuelle un peu moins du dixième de ce total (Fig.1.3). [6]

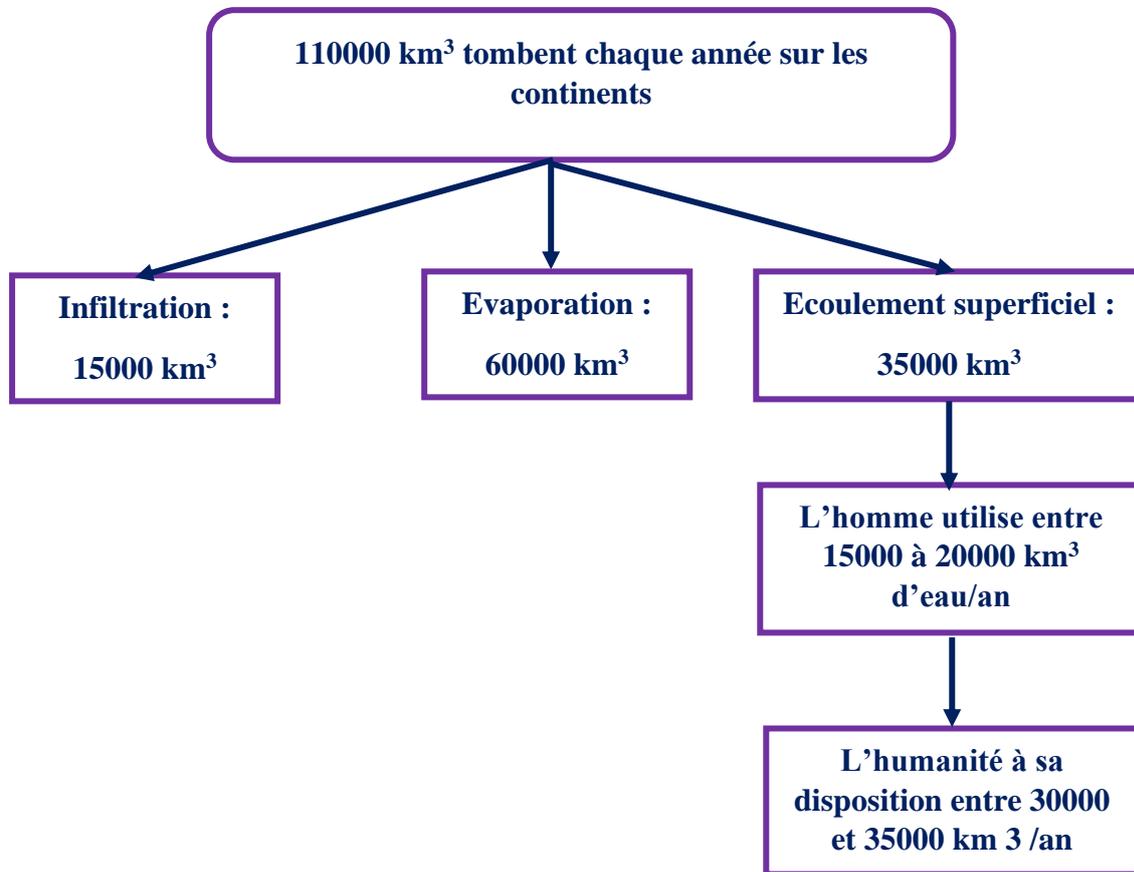


Figure 1.3. Répartition de l'eau dans le monde [6]

1.2.1. Les principales ressources en eau dans le monde :

❖ Les eaux de surface :

- Les rivières et les fleuves représentent une source importante d'eau douce, alimentée par les précipitations et les eaux souterraines. Certains grands fleuves comme l'**Amazone**, le **Mississippi**, le **Nil** ou le **Yangzi Jiang** fournissent de l'eau à des centaines de millions de personnes.
- Les lacs naturels comme le lac Supérieur, le lac **Victoria** ou le lac **Baïkal** stockent d'énormes quantités d'eau douce.
- Les eaux stagnantes comme les marais et les zones humides jouent un rôle écologique crucial.

❖ Les eaux souterraines:

- Les aquifères constituent une ressource majeure, avec les grands bassins sédimentaires et les aquifères poreux-fracturés.
- Certains aquifères comme celui du Bassin Artésien au Sahara ou l'Aquifère Nubien sont d'une importance capitale pour l'approvisionnement en eau dans les régions arides.

❖ L'eau gelée :

- Les calottes glaciaires et les glaciers des régions polaires et montagneuses représentent les plus grandes réserves d'eau douce liquide sur Terre, dont environ 70% en Antarctique et au Groenland.
- La fonte des glaciers alimente de nombreux cours d'eau importants.

❖ L'eau atmosphérique :

- L'humidité de l'air, les précipitations, le brouillard et la rosée, bien que faibles à l'échelle mondiale, peuvent être exploités localement.

❖ Les ressources non conventionnelles :

- Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, la réutilisation des eaux usées traitées prennent une importance croissante face à la pénurie.

La gestion durable de ces ressources en eau diversifiées est cruciale pour répondre aux besoins humains et environnementaux à travers le monde. [7]

1.3. L'eau en Algérie du nord

L'Algérie avec sa superficie de 2,381,741 km² est divisée en 48 wilayas (départements), dont près de 80% du territoire représente une zone désertique.

En Algérie, l'eau est une ressource de plus en plus précieuse. La concurrence que se livrent l'agriculture, l'industrie et l'AEP pour avoir accès à des disponibilités limitées en eau grève d'ores et déjà les efforts de développement de nombreux pays. [8]

La pluviométrie moyenne annuelle en Algérie du nord est évaluée entre 95 et 100.10⁹ m³. Plus de 80.10⁹ m³ s'évaporent, 3.10⁹ m³ s'infiltrent et 12,5.10⁹ s'écoulent dans les cours d'eau. Dans l'Algérie du nord l'apport principal vient de ruissellement. Les eaux de surface sont stockées dans les barrages. En 2002, l'Algérie dispose de 52 grands barrages d'une capacité de 5,2 milliards de m³. Le reste (7,3.10⁹ m³) se déverse directement dans la mer (Fig. 1.5)

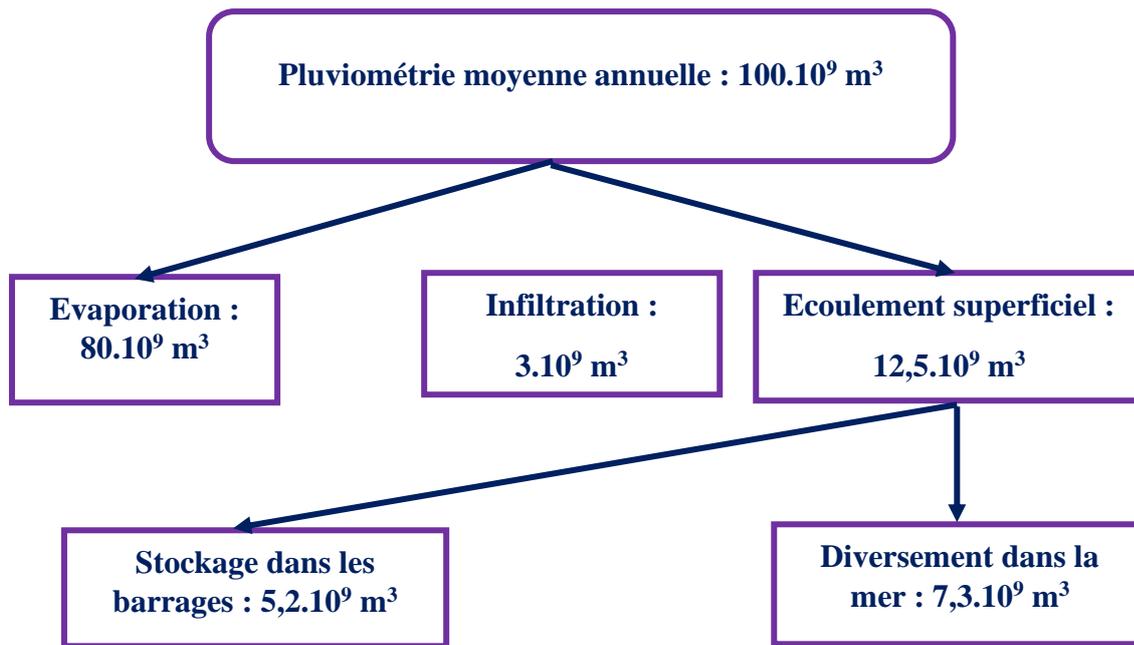


Figure 1.4. Répartition de l'eau en Algérie du Nord [8]

En Algérie, les pluies diminuent d'Est en Ouest et du Nord au Sud. L'Est algérien est la partie la plus humide avec une moyenne pluviométrique de 530 mm par an. Le Centre occupe la seconde place avec 480 mm. Enfin, l'Ouest est plus sec avec une moyenne annuelle de 260. Sur l'ensemble du pays, les précipitations moyennes s'élèvent à 89 mm/an [9].

L'eau qui tombe n'est pas captée en totalité. Les sécheresses jalonnent l'histoire du pays et l'aridité est une menace constante. C'est qui est important de souligner ici, c'est que le climat en Algérie est caractérisé par une aridité très marquée et par l'irrégularité de la pluviométrie. Cette irrégularité affecte très inégalement les différentes zones agroclimatiques : ce qui est mauvaise année dans une région ne l'est pas forcément ailleurs. Il est donc rare que l'année soit partout bonne ou partout mauvaise.

Le problème de l'eau est aggravé en ces dernières années de sécheresse qui ont touché l'ensemble du territoire de notre pays, ont montré combien il était nécessaire d'accorder la plus grande attention à l'eau.

Selon les spécialistes, à l'horizon 2025 l'Algérie connaîtra une diminution des précipitations de l'ordre de 5 à 13% et une élévation des températures de 0,6 à 1,1°C. [10]. De même, en l'espace d'une quarantaine d'années, entre 1962 et 2000, la dotation annuelle en eau par habitant a été divisée par 3, passant de 1500 à 500 m³/hab/an, comme le montre le tableau 1.2 suivant :

Table 1.2. Dotation annuelle en eau par habitant en Algérie [10]

Année	1962	1990	1995	1998	2000	2020
m ³ /hab/an	1500	720	680	630	500	430

Source : CNES (2000), « L'eau en Algérie : le grand défi de demain », Projet de rapport, 83p

Le découpage de l'Algérie du Nord en quatre régions repose sur les critères suivants :

- Les caractéristiques géographiques et naturelles des régions

Le groupement des bassins versants et sous bassins hydrographiques, entre lesquels existent des nécessités de transfert. [11]

Les différentes régions sont (Fig. 1.5) :

-  Oranie - Chott Chergui
-  Chellif - Zahrez
-  Algérois - Soummam - Hodna
-  Constantinois - Seybouse - Mellegue

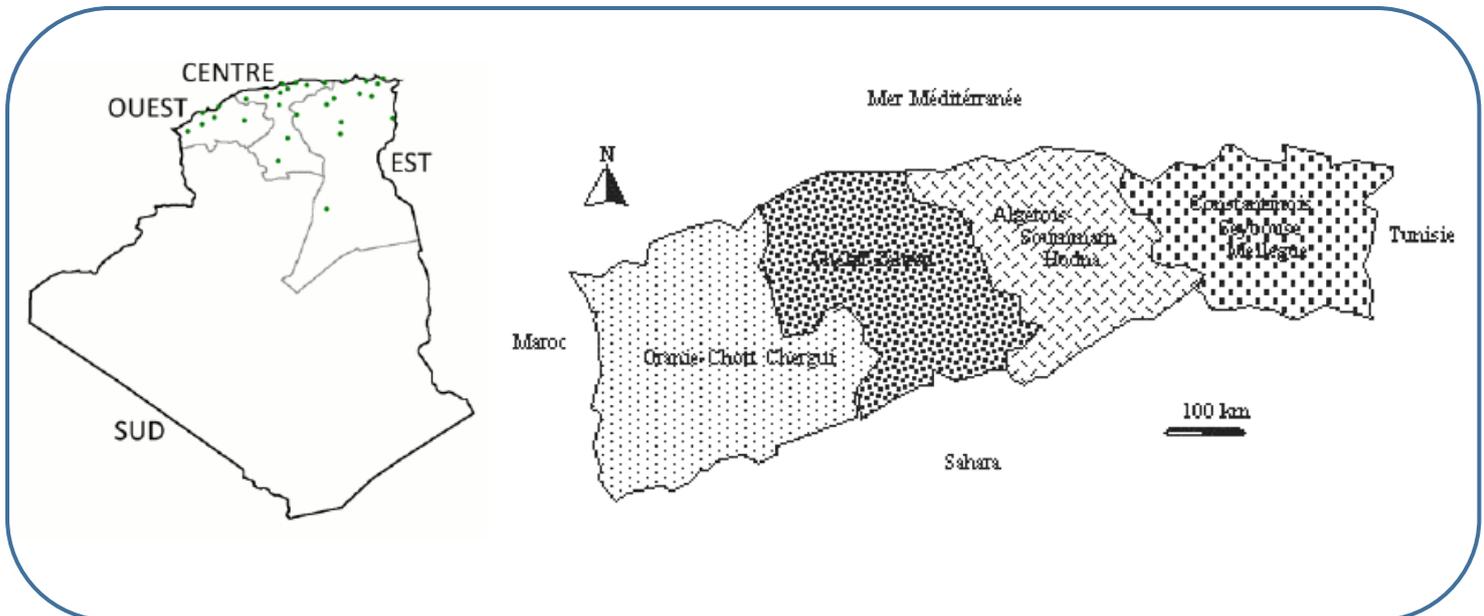


Figure 1.5. Découpage de l'Algérie du nord en quatre régions [10]

1.3.1. Les ressources en eau en Algérie

Les ressources en eau, menacées par les activités humaines, industrielles et agricoles, et par le réchauffement climatique, sont devenues un enjeu majeur, auquel l'État algérien attache

aujourd'hui une très grande importance. Toutefois, il faut admettre que les ressources en eau en Algérie sont limitées, vulnérables et inégalement réparties.

A vrai dire, l'Algérie présente un stress hydrique chronique dans certaines régions. Cette vulnérabilité représente un défi que l'Algérie a entrepris de relever, en adoptant une approche multisectorielle. [12]

1.3.1.1. Eaux conventionnelles

A)- Les eaux superficielles

Les données hydrométriques recueillies au moyen des réseaux d'observations sont la base principale de toute évaluation des eaux de surface. La qualité de cette évaluation dépend de la disponibilité de ces données, de leur densité dans le temps et dans l'espace ainsi que leur précision.

L'A.N.R.H (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) dispose à cet effet de 220 stations hydrométriques, 800 postes pluviométriques et 60 stations complètes. Les premières stations du réseau hydrométrique Algérien ont été installées en 1924 ; puis ce réseau s'est développé progressivement pour atteindre leur niveau actuel. Le tableau I.2 permet de donner la répartition de la pluviométrie et l'apport annuel en Algérie du nord. [13]

Tableau 1.3 : Précipitations des quatre régions de l'Algérie du Nord [12]

Régions Désignations	Oranie C. Chergui	Chélif Zahras	Algérois S. Hodna	Constantin Sey. Mellègue	Total Algérie du Nord
Superficie (km ²)	76.000	56.200	50.000	43.000	225 200
Pluviométrie (milliards m ³ /an)	24,5	23,5	21	26	95
Apport annuel moyen en (millions de m ³ /an)	958	1974	4300	5595	12827

Source : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH)

❖ Les oueds en Algérie du Nord

Les potentialités hydriques de surface susceptibles d'être mobilisées sont représentées essentiellement par les apports suivants :

- ✚ 02 oueds dont les apports sont supérieurs à 1000 Mm³ /an : le Cheliff et Kebir Rhumel totalisent un apport moyen de 2 268 Mm³ /an ;
- ✚ 05 oueds dont les apports sont compris entre 500 et 1000 Mm³ /an: Sébaou, Seybouse, Soummam, Kébir est et Isser dont l'apport est de 3.410 Mm³ /an;

- ✚ 11 oueds dont les apports sont compris entre 100 et 500 Mm³ /an : Djendjen, Tafna (Fig.1.6), Sidi - Khélifa, Kébir Ouest, El harrach (Fig.1.7), Mazafran, Agrioun, Acta, Ghébli, Draâs et Kissir dont l'apport total est de 2 530 Mm³ /an ;
- ✚ 16 oueds dont les apports sont compris entre 30 et 100 Mm³ /an : Damous, Safsaf, Oued El Arab, Ksob, Hamiz, Messelmoun, Boudouaou, Assif Ntaida, Oued El Hai, Oued El Abid, Ibahrissen, Sekkak, Allalah, Chemouna et El Hai dont l'apport total est de 718 millions de m³ /an. Les apports des oueds restant sont de 3 502 millions de m³ /an. Tous ces oueds sont représentés dans le tableau 1.4.

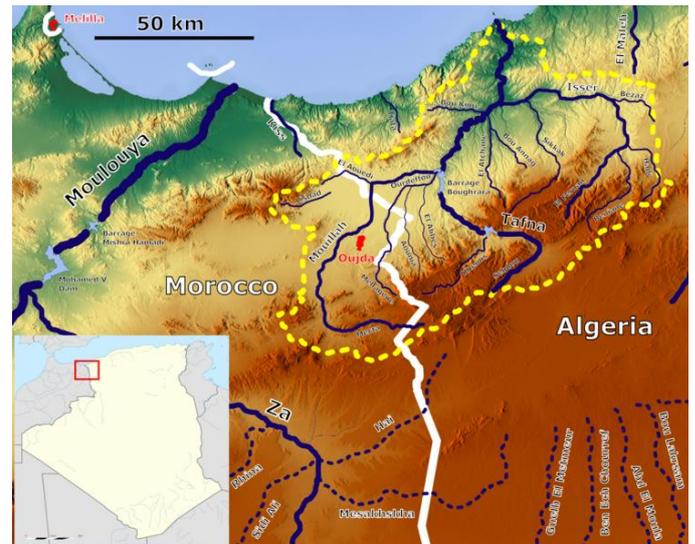


Figure 1.6 : Importance d'oued Tefna [13]

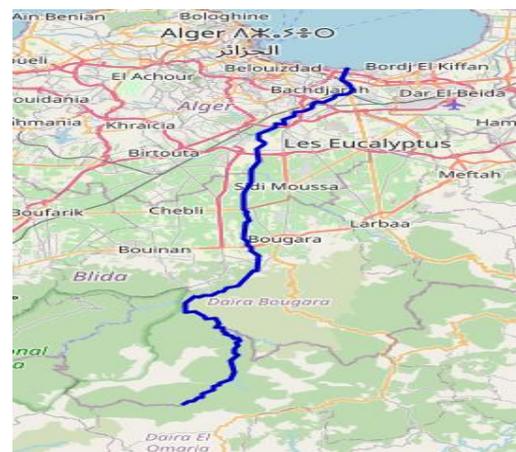


Figure 1.7: Oued El Harrache [13]



Figure 1.8 : Oued El Damous [13]

Tableau 1.4 : L'apport des oueds de l'Algérie du Nord [13]

L'apport des oueds	Nombre des oueds	Débits des oueds (Mm ³ /an)
Débit > 1000 (Mm ³ /an)	2	2 268
500 < débit < 1000 (Mm ³ /an)	5	3 410
100 < débit < 500 (Mm ³ /an)	11	2 530
30 < débit < 100 (Mm ³ /an)	16	718
Apport des oueds restants	> 100	3 502
TOTAL	34	12 428

❖ Les barrages de l'Algérie du Nord

Avec un nombre de barrages aussi important (114 grands et petits), l'Algérie se situe aujourd'hui au premier rang dans le monde Arabe et occupe la deuxième place en Afrique, après l'Afrique du sud. La capacité totale avoisine les 5200 millions de m³ et permettant de régulariser un volume annuel de 2500 millions de m³ (tableau 1.5). Néanmoins, les conditions naturelles et économiques ne permettent pas d'avoir des barrages de très grandes capacités. [13]



Figure 1.9 : Barrage de Foum El Ghrza d'une capacité totale de 47 millions de m³ [13]



Figure 1.10 : Barrage de Zardezas d'une capacité totale de 35 millions de m³ [13]

Tableau 1.5 : Nombre de barrages dans les 04 régions de l'Algérie du nord [13]

Régions Désignations	Oranie C. Chergui	Chélif Zahras	Algérois S. Hodna	Constantin Sey. Mellègue	Total Algérie du Nord
Nombre	12	13	12	15	52
Capacité (Mm ³)	685	1950	818	1530	5.10 ⁹ m ³

La région du Chélif Zahrez a un volume d'eau important, puisqu'elle détient 04 grands barrages :

-  Graggar: 450 millions de m³
-  Ghrib: 280 millions de m³
-  O. Fodda : 228 millions de m³
-  Sidi Yakoub: 280 million de m³

Parallèlement 61 petits barrages de capacité inférieure à 10 millions de m³ sont en exploitation d'une capacité totale de 98 millions de m³. Au total, on a 113 barrages.

B)- Les eaux souterraines

Les ressources en eau souterraines dans le nord de l'Algérie sont évaluées à plus de 2 milliards de m³. Elles sont exploitées à plus de 90 %, soit 1,9 milliards de m³ et beaucoup de nappes se trouvent actuellement en état de surexploitation. Cette évaluation est effectuée à partir de 50 000 points d'eau (forages et puits) recensés par l'A.N.R.H. Le tableau 1.6 donne les estimations des ressources en eau souterraines de l'Algérie du Nord. [13]

Tableau 1.6 : Potentialités des eaux souterraines de l'Algérie du Nord [13]

Régions Désignations	Oranie C. Chergui	Chélif Zahras	Algérois S. Hodna	Constantin Sey. Mellègue	Total Algérie du Nord
Ressources souterraines mobilisables en Mm ³ / an	400	245	775	580	2000
Ressources souterraines mobilisées en Mm ³ / an	375	230	745	550	1900

A la lecture du tableau 1.6, il apparaît que la région de l'Algérois Soummam Hodna a le volume le plus important par rapport aux autres régions en eau souterraine. Ceci est dû à la présence au niveau de cette région d'importantes nappes, comme par exemple la nappe de la Mitidja qui est surexploitée actuellement car, ses eaux constituent la principale source d'approvisionnement en eau de la ville d'Alger.

1.3.1.2. Les eaux non conventionnelles

❖ Les eaux usées

Les réseaux d'assainissement totalisent 17000 km (11500 en milieu urbain et 5500 km en milieu rural) en 1994. Le taux de raccordement en milieu urbain est supérieur à 80%. Le volume rejeté annuellement est évalué à plus 600 millions de m³.

Une cinquantaine de stations d'épuration ont été réalisées en Algérie avec une capacité de l'ordre de 4 millions habitants équivalents; à l'horizon 2000, le nombre serait porté à une soixantaine de stations avec une capacité de l'ordre de 5.2 millions équivalent habitants.

Il est à noter que près de 95% de ces stations sont à réhabiliter.

❖ Les eaux saumâtres/salées

L'Algérie, pays méditerranéen, a 1200 km de côtes, ce qui laisse présager d'énormes possibilités. La quantité d'eau dessalée en Algérie est estimée à 60 millions m³ (dans le monde arabe 4537 millions de m³).

1.4. L'eau dans le sud Algérien

Le sud de l'Algérie couvre 85 % du territoire global du pays, avec une superficie d'environ 2 156 000 km², et une population qui a dépassé aujourd'hui les 3 millions d'habitants. Considérée comme une zone désertique, où les précipitations sont quasi nulles, les crues sont violentes et dévastatrices, le charriage est considérable et l'érosion des berges participe au transport solide dans les cours d'eau avec un débit appréciable), le sud algérien est constitué des wilayas suivantes : Adrar, Laghouat, Biskra, Béchar, Tamnasset, Ouargla, Illizi, El Oued, Ghardaia, El Bayadh, Naama et Tindouf.

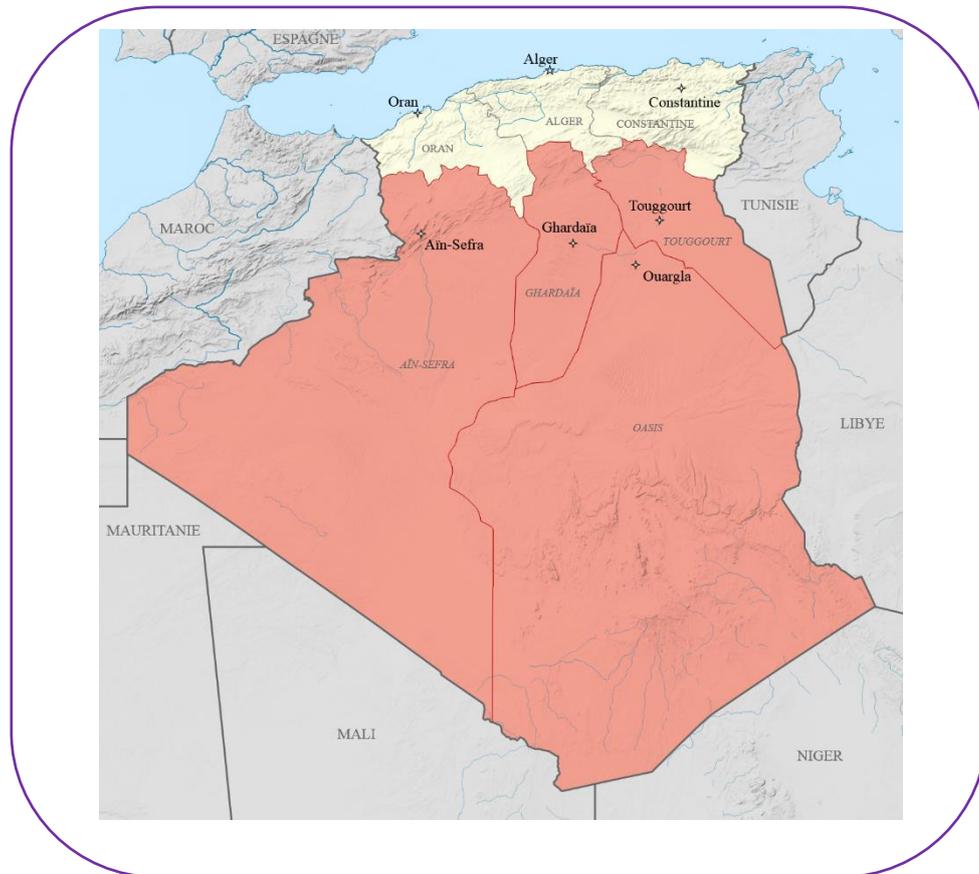


Figure 1.11 : Carte du Sud Algérien [13]

Pour ce grand espace, l'essentiel de ces ressources en eau est localisé dans deux grands systèmes aquifères ; la nappe du continental intercalaire qui est un grand réservoir d'eau fossile et qui s'étend sur tout la Sahara Septentrional et la nappe du complexe Terminal qui est un aquifère peu profond. Une étude initiée par l'UNESCO a été réalisée dans le cadre du projet ERESS (étude des ressources en eau du Sahara septentrional) en 1972 sur la nappe du continental intercalaire à l'échelle du Sahara Algéro - tunisienne. [13]

- ✚ Les précipitations sont très faibles, souvent inférieures à 100 mm par an, et irrégulières. L'essentiel des pluies tombe en hiver.
- ✚ Il n'existe quasiment pas de cours d'eau permanents en surface. On trouve seulement quelques oueds temporaires qui coulent lors des rares épisodes pluvieux.
- ✚ Les principales ressources en eau proviennent des nappes souterraines fossiles, accumulées il y a plusieurs milliers d'années sous le Sahara lorsque le climat était plus humide. Ces réserves sont peu renouvelables.
- ✚ La nappe de l'Albien, l'une des plus importantes, s'étend sur plus de 600 000 km² à des profondeurs atteignant 3000 m par endroits. Elle alimente en eau potable plusieurs villes dont Adrar et Timimoun.

- ✚ D'autres aquifères comme le Continental intercalaire et la nappe du Sahara septentrional sont également exploités, mais leurs réserves s'épuisent progressivement du fait d'une surexploitation.

Pour faire face aux besoins croissants et préserver ces ressources stratégiques, l'Algérie développe des techniques comme le dessalement d'eau de mer et la réutilisation des eaux usées traitées. [14]

1.5. Conclusion

L'Algérie fait face à une situation de stress hydrique du fait de ressources en eau limitées et inégalement réparties sur son territoire. Au nord, les pressions sur les ressources conventionnelles sont fortes. Au sud, les vastes nappes souterraines fossiles s'épuisent progressivement avec leur surexploitation. Pour sécuriser son approvisionnement en eau, le pays doit rationaliser les prélèvements, développer des techniques comme le dessalement et la réutilisation des eaux usées, et promouvoir une gestion durable et intégrée de cette ressource vitale mais rare.

Chapitre II
Les principaux
problèmes
hydrauliques en
Algérie

Chapitre II

Les principaux problèmes hydrauliques en Algérie

2.1. Introduction

En Algérie, l'eau est une ressource de plus en plus précieuse. La concurrence que se livrent l'agriculture, l'industrie et l'A.E.P pour avoir accès à des disponibilités limitées en eau grève d'ores et déjà les efforts de développement de nombreux pays.

Une fois l'eau tombe sur la terre, son stockage et sa protection deviennent de plus en plus difficiles. Que ce soit de l'eau souterraine ou superficielle, l'eau en Algérie rencontre divers problèmes, nous citerons dans ce chapitre les principaux problèmes techniques

2.2. Les problèmes hydrauliques en Algérie

L'Algérie, comme de nombreux pays du Maghreb, est confrontée à des défis importants en matière d'eau. La qualité des eaux superficielles se dégrade dans des bassins d'importance vitale sous l'effet des rejets de déchets urbains et industriels, les barrages réservoirs s'ensavent et perdent de la capacité utile et le rejet de la vase dans les cours d'eau pose d'énormes problèmes écologiques et environnementales. Les eaux souterraines sont polluées à partir de la surface et sont irréversiblement endommagées par l'intrusion d'eau saline, la surexploitation des couches aquifères entame la capacité de celle-ci à retenir l'eau, ce qui provoque l'enfoncement des couches sous-jacentes. Nombre de villes se révèlent incapables de fournir en quantité suffisante de l'eau potable et des équipements d'hygiène. [13]

Les principaux problèmes techniques hydrauliques rencontrés en Algérie se regroupent dans la (Fig. 2.1) :

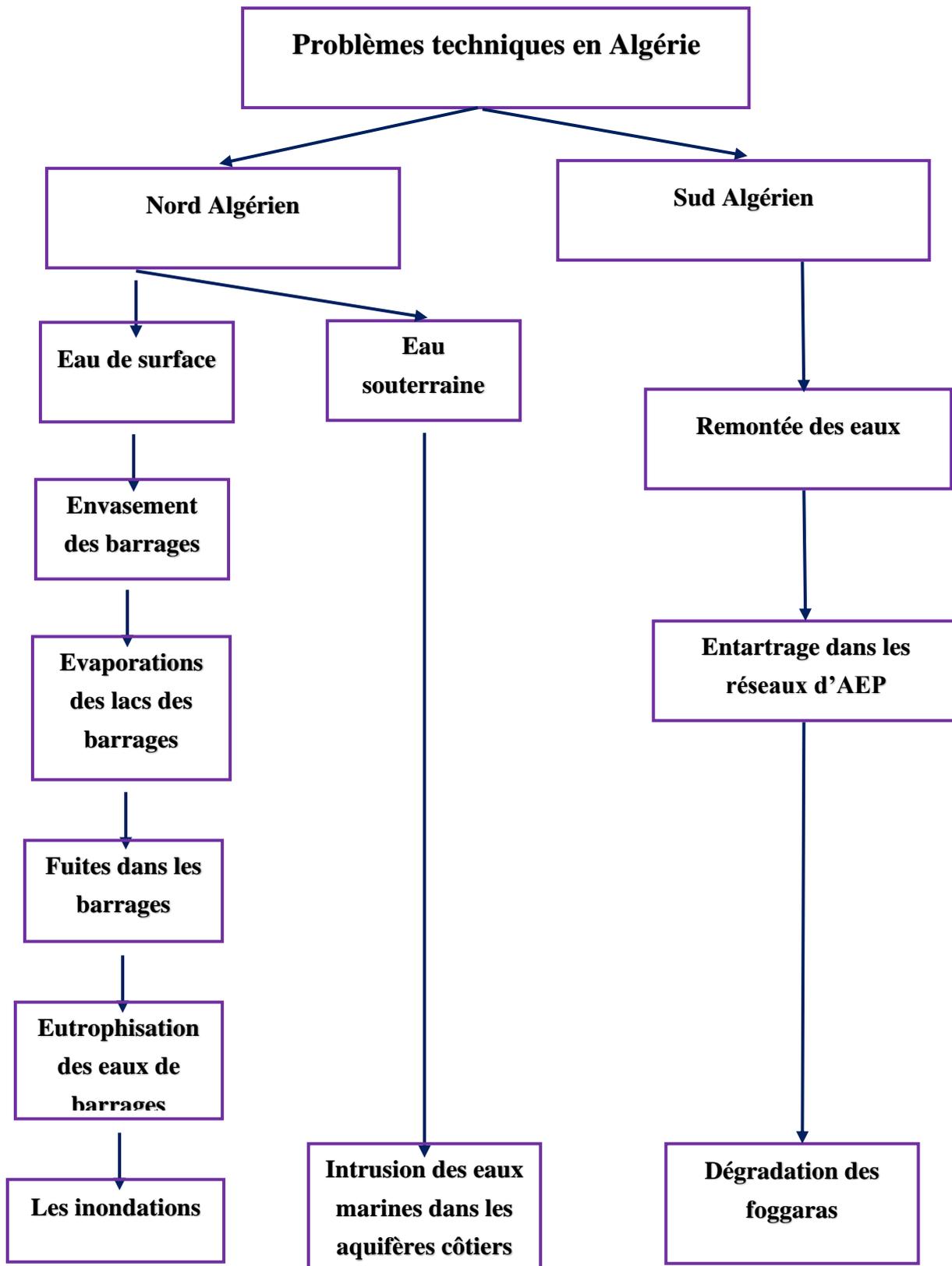


Figure 2.1. Principaux problèmes hydrauliques en Algérie [14]

2.2.1. L'érosion des sols

L'Algérie, située en Afrique du Nord, est confrontée à un grave problème d'érosion des sols, principalement dû à des facteurs naturels comme le climat aride et semi-aride, mais aussi à des activités anthropiques comme le surpâturage, la déforestation et les pratiques agricoles non durables. [15]

Selon une étude menée par Daoudi et Fatemi (2017), environ 15 millions d'hectares de terres, soit près de 60% du territoire algérien, sont touchés par l'érosion hydrique et éolienne. Les régions les plus affectées sont le nord du pays, les hauts plateaux et les zones montagneuses.

L'érosion des bassins versants dans les pays du Maghreb enregistre les valeurs les plus élevées de la planète. Plusieurs exemples témoignent de la gravité du problème ; en Algérie le taux d'érosion spécifique atteint la valeur de $5000 \text{ t/km}^2 \cdot \text{an}$ sur le bassin versant d'Oued Agrioum [16] (Fig.2.2).



Figure 2.2 : Forte érosion dans le bassin versant à l'amont du barrage d'Ighil Emda (Algérie). [15]

L'érosion éolienne est particulièrement sévère dans les zones désertiques du sud, où les vents violents emportent d'immenses quantités de particules de sol, créant des tempêtes de sable et de poussière. Lahouati et al. (2015) ont estimé que les pertes annuelles de sol par érosion éolienne peuvent atteindre 40 tonnes par hectare dans certaines régions. [17]



Figure 2.3 : L'érosion éolienne dans le Sahara Algérien [17]

L'érosion hydrique, quant à elle, est favorisée par les pluies irrégulières et intenses, ainsi que par le ruissellement excessif dû à la dégradation du couvert végétal. Selon Bouguerra et al. (2019), les pertes annuelles de sol peuvent aller jusqu'à 50 tonnes par hectare dans certaines zones montagneuses du nord. [18]



Figure 2.4 : L'érosion éolienne dans le Sahara Algérien [17]

Les zones montagneuses sont soumises à un processus d'érosion "très grave" qui menace les écosystèmes en place avec 120 millions de tonnes de terres arrachées annuellement, a avisé jeudi la Direction générale des forêts (DGF) à l'occasion de la Journée internationale de la montagne.



Figure 2.5 : Les zones montagneuses en Algérie menacées par une « très grave érosion » [17]

L'érosion des bassins versants peut avoir plusieurs conséquences graves sur l'environnement et les activités humaines (Fig.2.6):

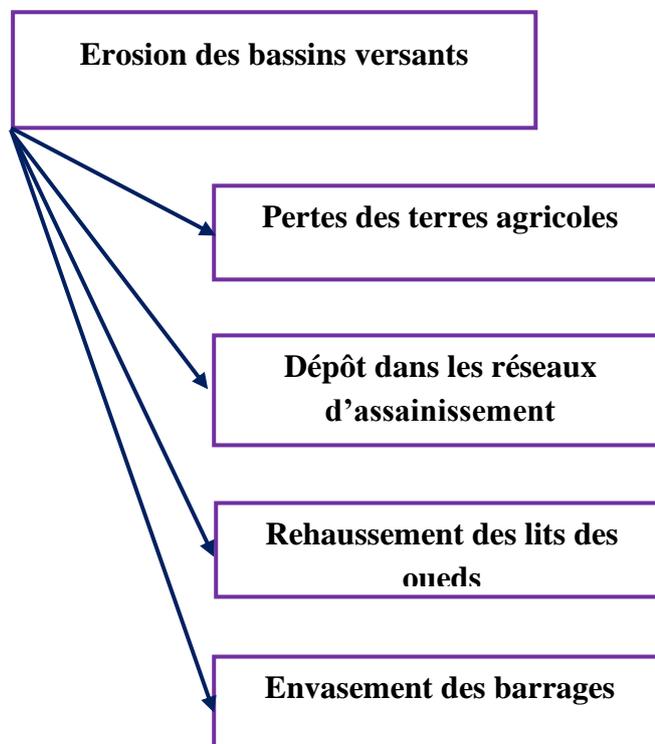


Figure 2.6 : Conséquences de l'érosion des bassins versants [17]

Pour lutter contre ce fléau, les autorités algériennes ont mis en place des programmes de reboisement, de conservation des eaux et des sols, et encouragent l'adoption de pratiques agricoles durables comme l'agroforesterie et l'agriculture de conservation.

2.2.2. Envasement dans les barrages

L'envasement des barrages est un problème majeur en Algérie, en raison de l'érosion hydrique importante dans plusieurs régions du pays. L'accumulation de sédiments dans les retenues diminue considérablement la capacité de stockage d'eau de ces ouvrages.

Selon une étude menée par Remini et Hallouche (2018), sur 65 grands barrages étudiés, 43 sont touchés par l'envasement à des degrés divers. Le taux d'envasement annuel moyen est estimé à 0,73% de la capacité initiale des retenues. [19]

Les barrages les plus affectés se situent dans les régions montagneuses du nord du pays, où l'érosion hydrique est la plus intense en raison du relief accidenté et des pluies irrégulières et violentes. Par exemple, le barrage de Boughezoul (wilaya de Médéa) a perdu plus de 40% de sa capacité en seulement 25 ans (Haraza, 2019). [20]



Figure 2.7 : Problématique de l'envasement des barrages en Algérie [20]

Pour lutter contre ce phénomène, les autorités algériennes ont mis en place des programmes de reboisement dans les bassins versants, de protection des berges et de dragage régulier des retenues. Cependant, ces mesures restent insuffisantes face à l'ampleur du problème.

Outre la perte de capacité de stockage, l'envasement des barrages a également un impact négatif sur la durée de vie des infrastructures hydrauliques et sur la qualité de l'eau destinée à l'irrigation et à la consommation humaine.

2.2.3. Evaporation des lacs de barrages

L'évaporation des lacs de barrages représente une perte d'eau non négligeable dans les régions arides et semi-arides comme l'Algérie. Cette évaporation est favorisée par les conditions climatiques chaudes et sèches qui règnent dans plusieurs régions du pays.

Selon une étude de Bouchetra (2006), les pertes par évaporation des grands barrages peuvent atteindre jusqu'à 10% du volume total emmagasiné annuellement. Pour un barrage comme celui de Boughezoul, Remini et Kettab (2014) ont estimé les pertes à environ 6 millions de m³ par an, soit 2,4% de sa capacité initiale. [21] [22]

Cette évaporation accrue diminue les ressources en eau disponibles pour l'irrigation, l'approvisionnement en eau potable et d'autres usages. Elle peut également entraîner une augmentation de la salinité de l'eau restante.

Plusieurs facteurs influencent le taux d'évaporation comme la surface du plan d'eau, la température, l'humidité relative, le vent et l'ensoleillement. L'envasement progressif des retenues contribue aussi à augmenter l'évaporation en réduisant la profondeur de l'eau.

Pour limiter ces pertes, différentes techniques sont envisagées comme le compactage des sols des bassins versants, la réduction de la végétation autour des retenues, ou encore l'utilisation de produits chimiques réduisant l'évaporation. Cependant, leur mise en œuvre reste limitée en Algérie.

Face au stress hydrique croissant, la lutte contre l'évaporation des barrages devient une priorité pour préserver les ressources en eau du pays.

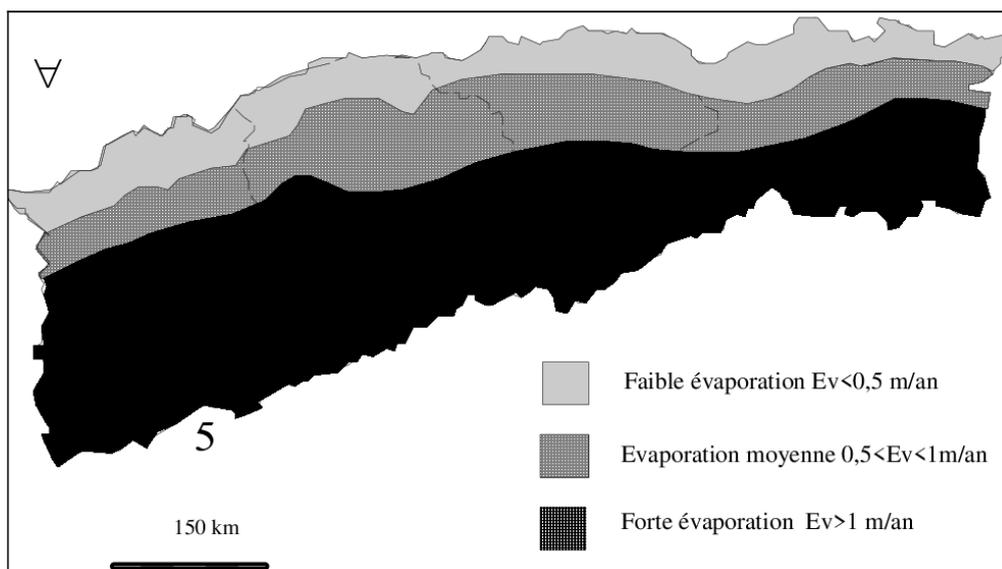


Figure 2.8 : Evaporation des lacs de barrages dans les régions arides et semi arides [22]

D'après cette figure, trois zones se dégagent du nord au sud ; la première de faible évaporation dont la perte par évaporation est inférieure à 1m/an et elle s'étend sur une largeur moyenne de 50 km à partir du littoral. Environ 25 barrages sont situés dans cette partie. La deuxième bande de moyenne évaporation d'une largeur moyenne de 100 km située juste après la première dans laquelle 25 barrages sont exploitation ; elle est caractérisée par une perte d'eau par évaporation inférieure à 1 m/an. Celle-ci est suivie par une troisième bande caractérisée par une forte évaporation dont la perte s'élève à une hauteur d'eau supérieure 1m/an. Huit barrages en exploitation sont situés dans cette zone. [13]

2.2.4. Fuites dans les barrages

Les fuites représentent un risque majeur pour la stabilité des barrages, pouvant entraîner des ruptures partielles ou totales avec des conséquences catastrophiques en termes de pertes en vies humaines et de dégâts matériels.

Selon Remini (2005), de nombreux barrages en Algérie souffrent de fuites plus ou moins importantes, dues à divers facteurs comme le vieillissement des ouvrages, les défauts de conception ou de construction, ou encore les mouvements de terrain. [23]

À titre d'exemple, le barrage de Zardezas (wilaya de Skikda) a connu des fuites importantes en 2005 suite à un défaut d'étanchéité, nécessitant des travaux de réparation d'urgence (Bouguerra et al., 2009). [24]

Pour prévenir ces fuites, un suivi et un entretien réguliers des barrages sont indispensables. Cependant, selon Remini et Kettab (2014), les moyens techniques et financiers alloués à la maintenance des barrages restent insuffisants en Algérie. [22]

Les fuites non détectées ou non traitées à temps peuvent s'aggraver et menacer la pérennité des ouvrages. Elles engendrent également des pertes d'eau précieuse dans un contexte de stress hydrique croissant.

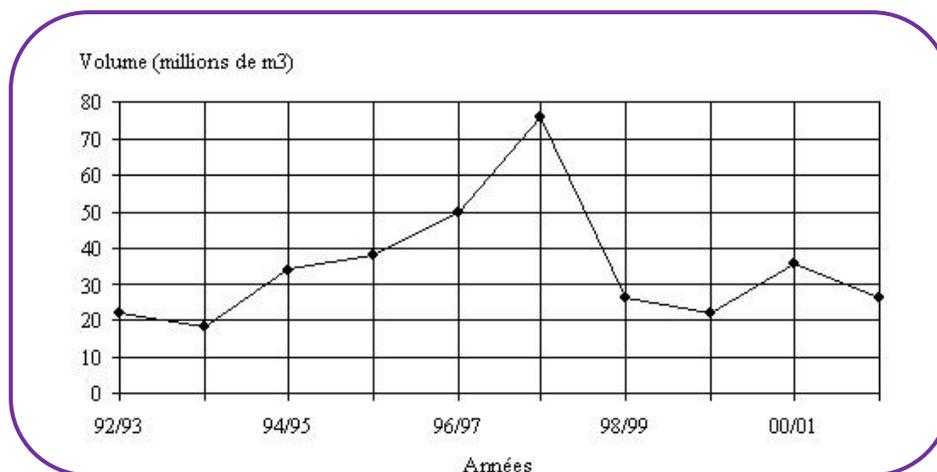


Figure 2.9 : Evaluation des débits de fuites dans les barrages Algériens [22]

Pour faire face à cette problématique, les auteurs recommandent un renforcement des mesures de surveillance, l'utilisation de techniques modernes de détection des fuites, et la mobilisation des ressources nécessaires pour l'entretien et la réhabilitation des barrages vieillissants.

2.2.5. Eutrophisation des retenues de barrages

L'eutrophisation, qui est l'enrichissement excessif des eaux en nutriments (azote, phosphore), est un phénomène qui touche de nombreuses retenues de barrages en Algérie. Elle entraîne une prolifération d'algues et de végétaux aquatiques indésirables.

Selon Bouguerra et al. (2017), sur 25 grands barrages étudiés, 18 présentaient des signes d'eutrophisation plus ou moins avancés. Les barrages les plus touchés étaient ceux recevant des apports importants d'eaux usées urbaines et d'effluents agricoles riches en nutriments. [25]

Ce phénomène pose plusieurs problèmes : la dégradation de la qualité de l'eau, la réduction de l'oxygène dissous pouvant asphyxier la faune aquatique, l'obstruction des conduites et des vannes par la végétation, ainsi que la production de composés toxiques par certaines algues.

Ouahid et Oualkia (2015) ont montré que le barrage d'Oued El Aneb (Annaba) connaissait une eutrophisation sévère due aux rejets urbains et industriels dans son bassin versant, avec des concentrations élevées en chlorophylle dépassant les normes de potabilité. [26]

Pour lutter contre l'eutrophisation, il est nécessaire de réduire les apports de nutriments dans les retenues, en traitant mieux les eaux usées et en contrôlant l'utilisation d'engrais. Des méthodes physiques, chimiques et biologiques de lutte contre la prolifération d'algues existent également.

Cependant, la mise en œuvre de ces solutions reste limitée en Algérie selon Mekkia et al. (2019), en raison du manque de moyens techniques et financiers. [27]

2.2.6. Les inondations

Selon la documentation technique, il existe plusieurs définitions des inondations. L'inondation est une submersion (rapide ou lente) d'une zone habituellement hors de l'eau. Les inondations comprennent les débordements d'un cours d'eau, les remontées des nappes, les ruissellements résultant de fortes pluies d'orages, les inondations par ruptures des barrages. L'inondation par le débordement des cours d'eau est la plus fréquente dans le monde. La crue est le facteur majeur induisant à l'inondation. C'est une augmentation du débit d'eau qui s'écoule dans le cours d'eau. [13]

Les facteurs conduisant à la formation des crues et des inondations sont représentés par la figure 2.10.

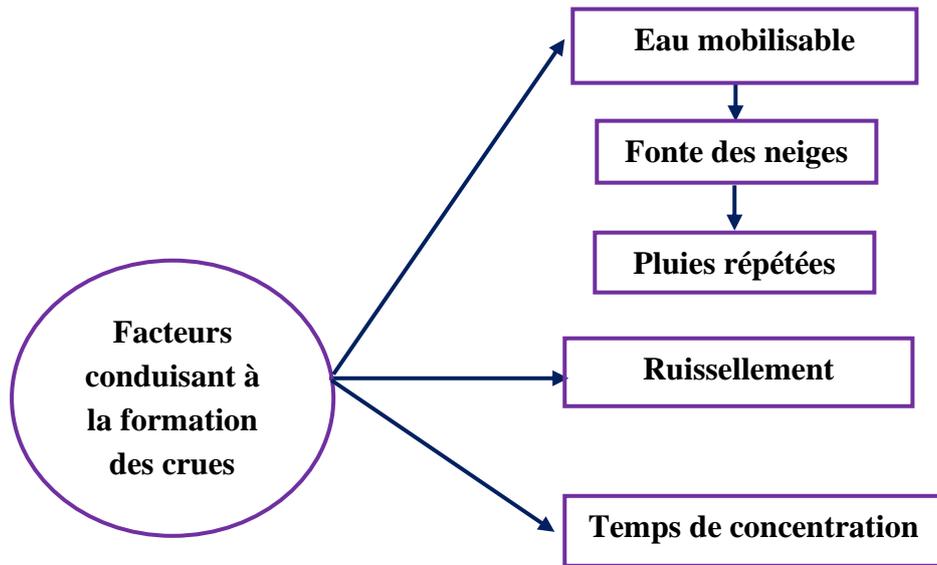


Figure 2.10. Facteurs favorisant la formation des crues [27]

Décrire l'intensité d'une inondation, c'est connaître sa fréquence : plus elle est rare plus elle est forte. On distingue les fréquences suivantes :

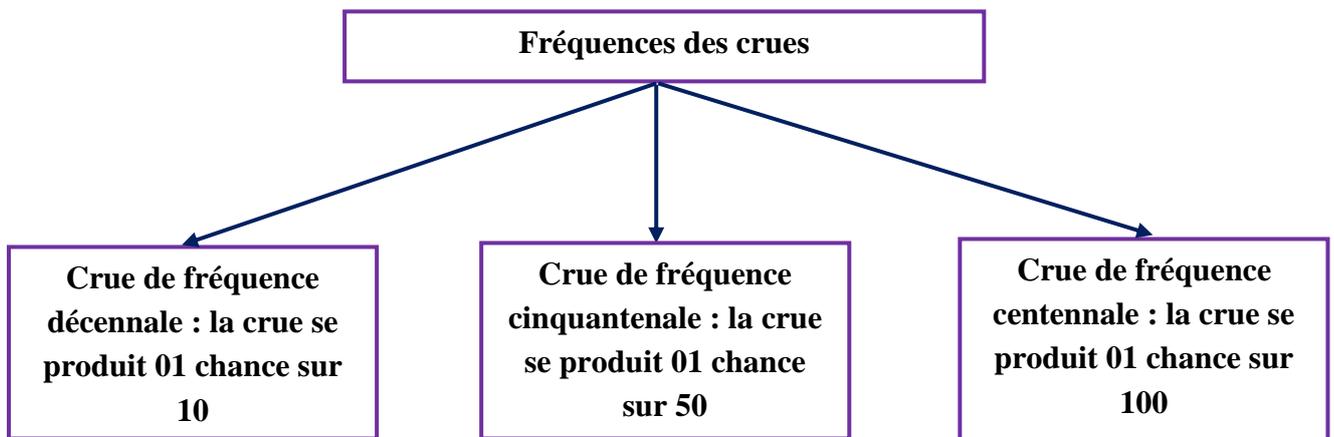


Figure 2.11 : Fréquences des crues [27]

Les facteurs aggravants les crues sont résumées sur la figure 2.12.

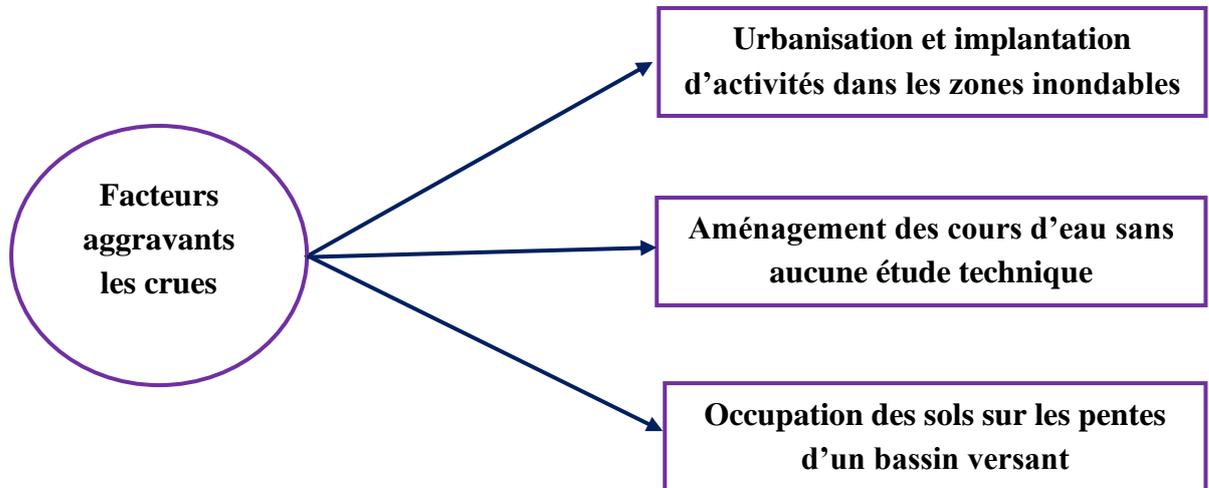


Figure 2.12 : Facteurs aggravants les crues [27]

On peut distinguer les types d'inondations (Fig. 2.13) :

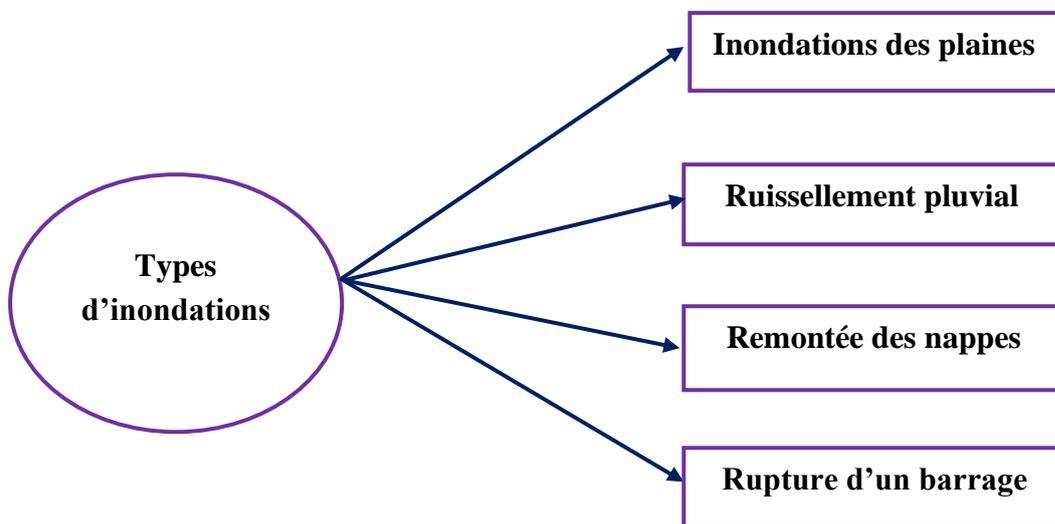


Figure 2.13 : Types d'inondations [27]

Les inondations en Algérie sont causées par des tempêtes localisées. Ces orages sont souvent accompagnés de pluies torrentielles qui ne durent pas longtemps mais peuvent être d'une extrême violence. C'est les mêmes caractéristiques des crues du sud algérien qui sont accompagnées d'un charriage intense. En moyenne, on enregistre 30 cas d'inondations par an.

2.2.7. Intrusion des eaux marines dans les aquifères côtiers

L'intrusion des eaux marines constitue une menace sérieuse pour les ressources en eau douce des zones côtières algériennes. Ce phénomène, qui se traduit par la salinisation progressive des nappes phréatiques, est dû à une combinaison de facteurs naturels et anthropiques. [28]

Les causes de l'intrusion marine en Algérie :

- ✚ **Pompage excessif des eaux souterraines** : La surexploitation des nappes phréatiques pour l'irrigation, l'industrie et l'usage domestique crée un appel d'eau salée en provenance de la mer.
- ✚ **Descente du niveau des nappes** : La baisse du niveau des nappes due à la sécheresse ou à l'utilisation excessive accentue l'intrusion marine.
- ✚ **Élévation du niveau de la mer** : Le changement climatique et l'élévation du niveau de la mer poussent l'eau salée plus loin dans les terres.
- ✚ **Perméabilité des sols** : La nature perméable des formations géologiques côtières facilite l'infiltration de l'eau salée.

Les impacts de l'intrusion marine :

- ✚ **Salinisation des eaux souterraines** : L'augmentation de la salinité rend l'eau impropre à la consommation humaine et à l'irrigation, affectant gravement l'agriculture et la santé publique.
- ✚ **Dégradation des sols** : L'accumulation de sel dans les sols peut les rendre stériles et réduire la productivité agricole.
- ✚ **Perte de biodiversité** : La salinisation des écosystèmes aquatiques et terrestres peut entraîner la disparition de certaines espèces et la perturbation des chaînes alimentaires.

La lutte contre l'intrusion marine :

- ✚ **Gestion durable des ressources en eau** : Une réduction du pompage excessif et une meilleure gestion de la demande en eau sont essentielles pour limiter l'intrusion marine.
- ✚ **Techniques de dessalement** : Le développement de technologies de dessalement plus efficaces et abordables peut fournir une alternative aux eaux souterraines salinisées.
- ✚ **Protection des zones côtières** : La préservation des dunes littorales et des zones humides peut contribuer à freiner l'avancée de l'eau salée.
- ✚ **Sensibilisation et éducation** : Il est crucial d'informer et de sensibiliser le public aux enjeux de l'intrusion marine et à l'importance d'une gestion durable des ressources en eau.

2.3. Les stratégies pour augmenter le stockage de l'eau en Algérie

Après avoir traité l'état et le déficit en eau en Algérie et énumérer les différents problèmes hydrauliques qui menacent les ressources en eau, nous proposons les principales stratégies et suggestions pour augmenter les capacités des ressources en eau et de faire face au déficit en eau d'ici l'an 2030.

Aujourd'hui, la priorité de l'Algérie est l'amélioration de la qualité et la quantité des ressources en eau. A cet effet, une série de suggestions sont proposées dans le but d'augmenter au maximum nos ressources en eau.

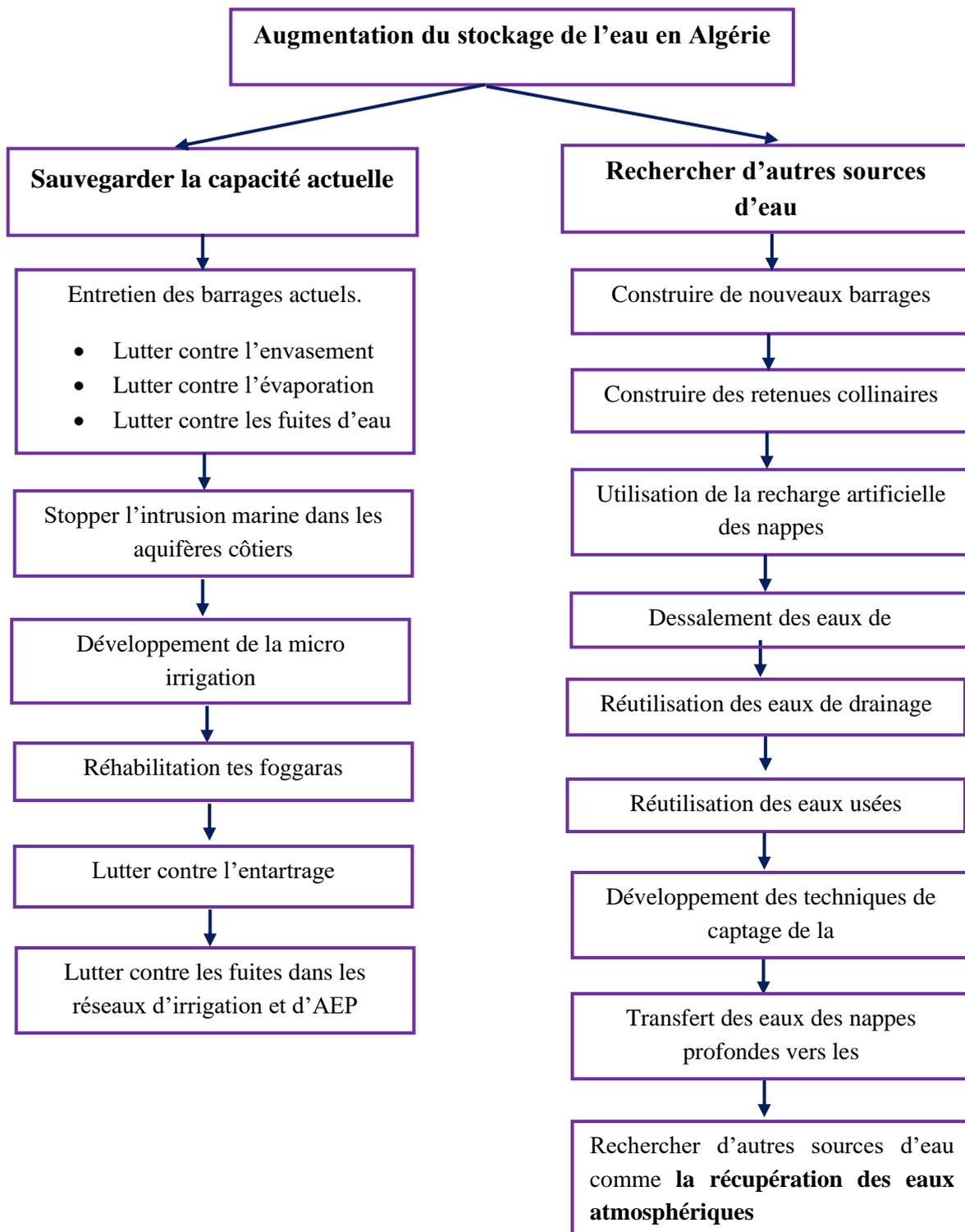


Figure 2.14. Procédés d'augmentation de la capacité de stockage de l'eau en Algérie [28]

Le choix des solutions les plus adaptées dépendra de facteurs spécifiques à chaque région, tels que la disponibilité des ressources, les contraintes techniques et économiques, et les contextes environnementaux et sociaux.

Face à la pression croissante sur les ressources en eau douce en Algérie, la recherche de nouvelles sources d'eau potable s'avère cruciale pour assurer la sécurité hydrique du pays.

Plusieurs options prometteuses existent, chacune présentant ses propres avantages et défis.

Dans notre étude nous avons opté pour une nouvelle technologie qui est la **Collecte de l'eau atmosphérique**. C'est une technologie innovante capable de produire de l'eau potable à partir de l'humidité ambiante.

Dans les chapitres qui suivent nous allons bien détaillés cette techniques.

2.4. Conclusion

L'Algérie, pays à climat aride et semi-aride, est confrontée à des problèmes hydrauliques majeurs qui menacent pour le présent et l'avenir sa sécurité hydrique et son développement durable. La raréfaction de l'eau, l'intrusion saline, le vieillissement des infrastructures et l'insuffisance des investissements constituent des défis majeurs auxquels il est urgent de s'attaquer.

Dans la fin de ce chapitre nous avons proposé des stratégies et suggestion pour augmenter le stockage de l'eau. Nous avons proposé une technologie innovante et prometteuse qui est la récupération des eaux atmosphériques qui va être détaillée dans les prochains chapitres.

Chapitre III

La technologie de récupération des eaux atmosphériques

Chapitre III

La technologie de récupération des eaux atmosphériques

3.1. Introduction

L'eau est une ressource vitale et précieuse, essentielle à la vie et au développement humain. Cependant, la disponibilité et la qualité de l'eau sont de plus en plus menacées par le changement climatique, la croissance démographique et les pressions anthropiques croissantes. Dans ce contexte, la recherche de solutions innovantes et durables pour la gestion de l'eau est devenue une priorité mondiale.

La récupération des eaux atmosphériques émerge comme une approche prometteuse pour répondre à ces défis en capturant l'humidité de l'air et en la transformant en une source d'eau potable non et non potable.

Cette pratique, bien que relativement ancienne, connaît un regain d'intérêt en raison de son potentiel à diversifier les sources d'eau, à réduire la pression sur les ressources hydriques traditionnelles et à renforcer la résilience des systèmes d'approvisionnement en eau. [29]

3.2. Problèmes de pénurie d'eau potable dans le monde

La pénurie d'eau potable est un problème mondial complexe qui touche des milliards de personnes. Les principales causes de cette pénurie incluent la croissance démographique, le changement climatique, la pollution, la gestion inefficace des ressources en eau et les conflits géopolitiques.

3.2.1. Croissance démographique

L'augmentation rapide de la population mondiale exerce une pression considérable sur les ressources en eau. De nombreuses régions voient leur demande en eau dépasser la disponibilité, ce qui conduit à des situations de pénurie chronique. [30]

3.2.2. Changement climatique

Le changement climatique affecte les cycles de l'eau à l'échelle mondiale, modifiant les régimes de précipitation, augmentant la fréquence et la gravité des sécheresses et entraînant la fonte des glaciers qui alimente de nombreuses rivières. Ces changements perturbent les sources d'eau douce. [31]

3.2.3. Pollution de l'eau

La pollution des sources d'eau par les déchets industriels, agricoles et domestiques rend l'eau impropre à la consommation. Les produits chimiques, les métaux lourds et les agents pathogènes contaminent les rivières, les lacs et les nappes phréatiques. [32]

3.2.4. Gestion inefficace des ressources en eau

Une mauvaise gestion des ressources en eau, y compris les fuites dans les infrastructures, le gaspillage d'eau et l'irrigation inefficace en agriculture, contribue à la pénurie. De nombreuses régions manquent de systèmes adéquats pour capter, stocker et distribuer l'eau. [33]

3.2.5. Conflits géopolitiques

Les conflits et l'instabilité politique affectent la gestion et la distribution des ressources en eau. Dans certaines régions, les infrastructures hydrauliques sont ciblées pendant les conflits, aggravant les problèmes de pénurie d'eau. [34]

3.2.6. Déforestation et dégradation des écosystèmes

La déforestation et la dégradation des écosystèmes naturels réduisant la capacité des sols à retenir l'eau, perturbent les cycles hydrologiques et diminuent les réserves d'eau douce disponibles. [35]

3.3. Définition

La récupération des eaux atmosphériques, aussi appelée captage de l'eau atmosphérique ou de l'eau de l'air, est un processus qui consiste à extraire l'eau présente sous forme de vapeur dans l'air ambiant et à la condenser pour produire de l'eau potable. [36]

Cette approche offre une solution aux régions touchées par la pénurie d'eau en exploitant une source naturelle disponible en quantité significative.

Cette technologie utilise différentes méthodes, comme le refroidissement pour amener l'air en dessous de son point de rosée et permettre la condensation de la vapeur d'eau, ou bien l'adsorption de la vapeur d'eau sur des matériaux dessiccants qui sont ensuite chauffés pour libérer l'eau condensée. [37]

La récupération des eaux atmosphériques offre une source d'eau décentralisée et renouvelable, particulièrement intéressante dans les régions arides ou semi-arides où les ressources en eau douce conventionnelles sont rares. [38]

Au-delà de la simple condensation, les TEA s'appuient sur des principes scientifiques et des technologies variées pour capturer l'eau atmosphérique, souvent invisible à l'œil nu. Ces techniques se distinguent par leur capacité à fonctionner dans des conditions climatiques et environnementales diverses, offrant ainsi des solutions prometteuses pour répondre aux défis liés à la raréfaction de l'eau douce. [39]

Cette technique s'applique dans plusieurs domaines telles que :

- ✚ **Production d'eau potable:** Accès à l'eau potable dans les régions défavorisées ou en situation de crise.
- ✚ **Irrigation:** Approvisionnement en eau pour l'agriculture dans les zones arides, préservant les ressources en eau souterraine.
- ✚ **Assainissement:** Production d'eau pour l'hygiène et l'assainissement dans les communautés isolées.
- ✚ **Applications industrielles:** Utilisation dans des processus industriels tels que la fabrication de produits électroniques ou pharmaceutiques.

3.4. L'importance de la récupération des eaux atmosphériques

L'importance de la récupération des eaux atmosphériques est multiple, touchant à des aspects environnementaux, sociaux, économiques et de santé publique.

Les TEA présentent un intérêt croissant dans le contexte du changement climatique et de la raréfaction de l'eau douce. Elles peuvent offrir une solution alternative aux sources d'eau traditionnelles, notamment dans les régions arides ou semi-arides. Recourir à des sources alternatives comme l'eau atmosphérique présente plusieurs intérêts majeurs :

3.4.1. Lutte contre la pénurie d'eau

La récupération des eaux atmosphériques offre une solution innovante aux régions souffrant de pénurie d'eau potable. En captant l'humidité de l'air, ces technologies peuvent fournir dans les zones arides ou semi-arides où les ressources hydriques traditionnelles sont insuffisantes une source d'eau potable permettant ainsi de pallier le manque d'accès à l'eau courante.

Elle peut aussi réduire la pression sur les ressources conventionnelles, En fournissant une source d'eau complémentaire, l'exploitation de l'eau atmosphérique permet de réduire la pression exercée sur les réserves d'eaux souterraines et de surface souvent surexploitées. [40]

3.4.2. Durabilité et impact environnemental

La technologie de récupération des eaux atmosphérique et durable et respectueuse de l'environnement. Elle permet de réduire la dépendance aux ressources d'eau traditionnelles et conventionnelles telles que les rivières, les lacs, les nappes phréatiques et les réservoirs, souvent surexploités préservant ainsi ces écosystèmes fragiles.

Les TEA peuvent être alimentées par des énergies renouvelables, minimisant leur impact environnemental et contribuant à la transition énergétique. [41]

3.4.3. Amélioration de la santé publique

L'accès à de l'eau potable propre est crucial pour la santé publique. La récupération des eaux atmosphériques peut aider à réduire les maladies liées à l'eau contaminée particulièrement dans les régions où les infrastructures d'eau potable sont déficientes.

Les TEA peuvent fournir un accès à l'eau potable dans les régions défavorisées ou en situation de crise, améliorant ainsi la santé et le bien-être des populations. [42]

3.4.4. Réduction de l'empreinte écologique

La récupération des eaux atmosphériques nécessite généralement moins d'énergie et de ressources que le dessalement de l'eau de mer ou le pompage intensif de l'eau souterraine, contribuant ainsi à une réduction de l'empreinte écologique.

Cette source d'eau, indépendante des précipitations, offre une certaine résilience face aux perturbations des cycles hydrologiques provoquées par les changements climatiques. [43]

3.4.5. Solutions innovantes pour l'agriculture

En agriculture, l'eau atmosphérique peut être utilisée pour l'irrigation, surtout dans les régions souffrant de sécheresse. Cela aide à stabiliser la production agricole et à assurer la sécurité alimentaire.

Cette technologie peut s'affranchir des contraintes géographiques, contrairement aux ressources en eaux de surface ou souterraines, l'eau atmosphérique est présente partout, y compris dans les zones désertiques dépourvues d'autres sources hydriques exploitables. [44]

3.4.6. Réduction des conflits liés à l'eau

La technologie de récupération des eaux atmosphériques peut aussi jouer un rôle dans la réduction des conflits liés à l'eau. En fournissant une source alternative d'eau, elle peut réduire les tensions entre les nations ou les communautés qui se disputent les ressources hydriques. [34]

3.4.7. Innovations technologiques et développement économique

Le développement de technologies de récupération des eaux atmosphériques stimule l'innovation et peut créer de nouvelles opportunités économiques, notamment dans les secteurs technologiques et industriels.

L'adoption des TEA peut stimuler l'innovation technologique, la création d'emplois et la croissance économique, particulièrement dans les régions rurales et isolées. Des modèles économiques innovants, tels que le micro-crédit ou les partenariats public-privé, peuvent faciliter l'accès aux TEA pour les populations à faible revenu. [45]

C'est donc une solution prometteuse pour répondre aux défis croissants de sécurité hydrique, bien qu'encore en phase de développement.

3.5. Les sources d'eau atmosphérique

Les sources d'eau atmosphérique désignent les différentes formes sous lesquelles l'eau présente dans l'atmosphère peut être captée et utilisée. La disponibilité de cette source varie considérablement en fonction de la région, du climat et des conditions météorologiques.

Les principales sources d'eau atmosphériques sont :

3.5.1. Vapeur d'eau

La vapeur d'eau est l'état gazeux de l'eau présent dans l'atmosphère. Elle peut être condensée en eau liquide à l'aide de diverses technologies. [46]

3.5.2. La rosée

La rosée se forme lorsque la vapeur d'eau dans l'air se condense en fines gouttelettes sur des surfaces froides en cours de la nuit. La récupération de la rosée peut être une source d'eau dans les régions où les températures nocturnes sont suffisamment basses pour permettre la condensation. [47]

3.5.3. Le brouillard

Le brouillard est constitué de fines gouttelettes d'eau en suspension dans l'air. Dans certaines régions, notamment dans les zones côtières et montagneuses, le brouillard peut être une source importante d'eau. [48]

3.5.4. La pluie

La pluie est la forme la plus courante de précipitation atmosphérique. La collecte de l'eau de pluie est une méthode largement utilisée pour obtenir de l'eau potable. [46]

3.5.5. La neige

Dans les régions où les températures hivernales sont suffisamment basses, la neige peut être collectée et fondue pour fournir de l'eau potable. [46]

3.6. Les différentes techniques de récupération des eaux atmosphériques

Les techniques de récupération des eaux atmosphériques (TEA) visent à extraire l'eau de la vapeur d'eau présente dans l'air ambiant pour la rendre utilisable à diverses fins. Parmi les techniques les plus répandues, on trouve :

3.6.1. La condensation par refroidissement de l'air

Cette méthode consiste à refroidir l'air en dessous de son point de rosée, provoquant la condensation de la vapeur d'eau en gouttelettes, ces gouttelettes peuvent ensuite être collectées et purifiées pour obtenir de l'eau potable ou à usage industriel. C'est la technique la plus simple et la plus répandue, souvent utilisée dans les déshumidificateurs domestiques et industriels. C'est la méthode la plus courante. [49]

Les systèmes comprennent généralement :

- Un ventilateur ou une soufflante pour faire entrer l'air extérieur,
- Un échangeur de chaleur réfrigéré (batterie froide, chambre de condensation) sur lequel l'air se condense,
- Un système de réfrigération (compresseur, condenseur) pour refroidir l'échangeur,
- Un récupérateur d'eau pour collecter et stocker l'eau de condensation,
- Éventuellement un système de purification/traitement de l'eau récupérée.

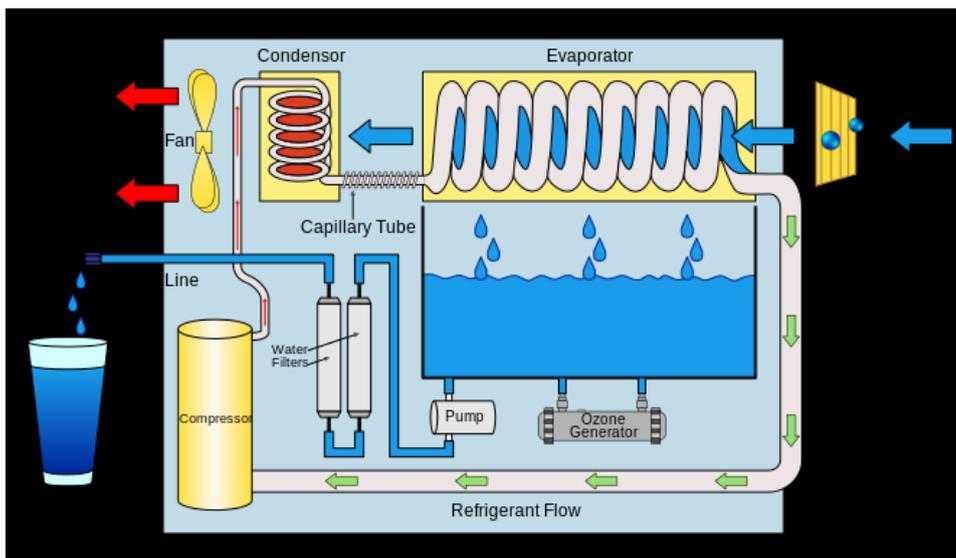


Figure 3.1 : Exemple de procédé de condensation par refroidissement. [49]

3.6.1.1. Fonctionnement détaillé :

❖ Capture d'air :

L'air ambiant est aspiré dans un système de condensation par un ventilateur ou un autre dispositif d'aspiration.

❖ Refroidissement :

L'air est ensuite refroidi par un réfrigérant, généralement un fluide frigorigène circulant dans un serpentin métallique. Le refroidissement de l'air abaisse sa température en dessous de son point de rosée.

❖ Condensation :

Lorsque l'air refroidi atteint son point de rosée, la vapeur d'eau qu'il contient se condense en gouttelettes d'eau liquide. Ces gouttelettes se forment généralement sur des surfaces froides, comme les ailettes d'un échangeur thermique.

❖ Collecte des gouttelettes :

Les gouttelettes d'eau condensée sont ensuite collectées dans un bac ou un autre récipient. La conception du système de collecte doit minimiser les pertes d'eau par évaporation.

❖ Purification de l'eau :

L'eau collectée peut contenir des impuretés et des contaminants provenant de l'air ambiant. Elle doit donc être purifiée avant d'être utilisée à des fins domestiques ou industrielles. La purification peut inclure des processus tels que la filtration, la stérilisation et la déminéralisation.

3.6.1.2. Avantages et inconvénients de la condensation par refroidissement : [50]

✚ Avantages

- **Simplicité** : La technologie est relativement simple à comprendre et à mettre en œuvre. Systèmes compacts pouvant être installés à petite échelle (habitations).
- **Efficacité** : La technique peut être efficace dans des environnements humides, avec des taux d'humidité relative supérieurs à 40%. Technologie éprouvée et mature, utilisée depuis longtemps (climatiseurs, déshumidificateurs).
- **Coût relativement bas** : Les systèmes de condensation par refroidissement peuvent être relativement peu coûteux à installer et à entretenir.

- **Rendement** : Rendements relativement élevés, de l'ordre de plusieurs litres/jour dans les climats chauds et humides, de climatisation.
- **Flexibilité** : La technique peut être adaptée à différentes échelles, des petits déshumidificateurs domestiques aux installations industrielles de grande capacité. Possibilité de coupler la production d'eau à un système

✚ Inconvénients de la condensation par refroidissement

- **Consommation d'énergie** : Le processus de refroidissement de l'air consomme de l'énergie, ce qui peut limiter la durabilité de la technique.
- **Production d'eau limitée dans des environnements secs** : La technique est moins efficace dans des environnements secs, avec des taux d'humidité relative inférieurs à 40%.
- **Risque de croissance microbienne** : L'eau collectée peut favoriser la croissance de micro-organismes si elle n'est pas stockée et purifiée correctement.

Cette technique convient particulièrement aux régions côtières/insulaires chaudes et humides, où les rendements peuvent être intéressants. Elle requiert cependant un accès à l'énergie électrique.

3.6.2. Déshumidification par adsorption

La déshumidification par adsorption est une technique de récupération des eaux atmosphériques (TEA) qui utilise des matériaux adsorbants comme le gel de silice ou l'alumine activée, pour capturer la vapeur d'eau présente dans l'air. Contrairement à la condensation par refroidissement, qui nécessite un refroidissement direct de l'air, la déshumidification par adsorption fonctionne à température ambiante. L'eau est ensuite récupérée par chauffage ou par un changement de pression. [51]

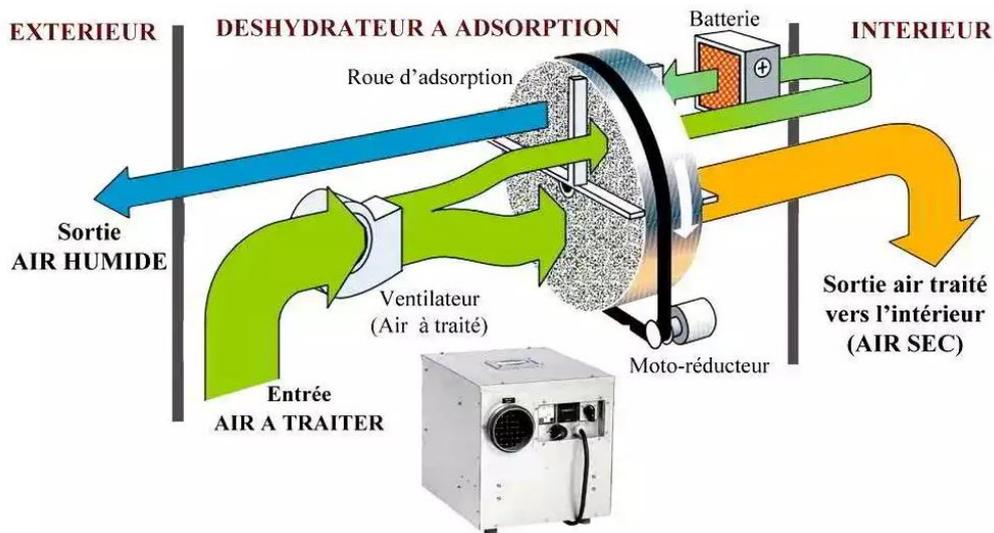


Figure 3.2. : Principe de fonctionnement d'un déshumidificateur par adsorption [51]

3.6.2.1. Fonctionnement détaillé

❖ Capture d'air

L'air ambiant est aspiré dans un système de déshumidification par adsorption à l'aide d'un ventilateur ou d'un autre dispositif d'aspiration.

❖ Contact avec l'adsorbant

L'air est ensuite mis en contact avec un matériau adsorbant, généralement sous forme de lit granulaire ou de monolithe. Les matériaux adsorbants couramment utilisés incluent le gel de silice, l'alumine activée et les zéolithes.

❖ Adsorption de la vapeur d'eau

Les molécules de vapeur d'eau présentes dans l'air s'adhèrent à la surface des matériaux adsorbants grâce à des forces intermoléculaires. Ce processus est connu sous le nom d'adsorption.

❖ Régénération de l'adsorbant

Une fois que le matériau adsorbant est saturé en vapeur d'eau, il doit être régénéré pour pouvoir être réutilisé. La régénération consiste généralement à chauffer l'adsorbant ou à le mettre sous vide, ce qui provoque la libération de la vapeur d'eau adsorbée.

❖ Collecte de l'eau

La vapeur d'eau libérée lors de la régénération de l'adsorbant est condensée en eau liquide et collectée dans un récipient.

3.6.2.2. Avantages et inconvénients de la déshumidification par adsorption

✚ Avantages

- **Efficacité élevée dans une large plage d'humidité :** La technique peut être efficace dans une large plage d'humidité relative, de 1% à 100%.
- **Production d'eau de haute qualité :** L'eau produite par déshumidification par adsorption est généralement de haute qualité, avec une faible teneur en contaminants.
- **Fonctionnement à température ambiante :** La technique ne nécessite pas de refroidissement direct de l'air, ce qui peut être un avantage dans certains environnements.
- **Flexibilité :** La technique peut être adaptée à différentes échelles, des petits déshumidificateurs domestiques aux installations industrielles de grande capacité.

✚ Inconvénients

- **Coût plus élevé :** Les systèmes de déshumidification par adsorption peuvent être plus coûteux à installer et à entretenir que les systèmes de condensation par refroidissement.
- **Consommation d'énergie pour la régénération :** La régénération de l'adsorbant nécessite de l'énergie, ce qui peut limiter la durabilité de la technique.
- **Génération de chaleur :** Le processus de régénération de l'adsorbant peut générer de la chaleur, qui doit être dissipée.

3.6.2.3. Applications de la déshumidification par adsorption

✚ Déshumidification industrielle

Contrôle de l'humidité dans les processus industriels sensibles à l'humidité, tels que la production de produits pharmaceutiques, d'électronique et de produits alimentaires.

✚ Production d'eau potable

Fournir de l'eau potable dans des régions où l'accès à l'eau douce est limité ou inexistant.

✚ Séchage de l'air

Séchage de l'air dans des environnements tels que les piscines intérieures, les patinoires et les entrepôts.

✚ Conditionnement d'air

Maintenir un niveau d'humidité optimal dans les environnements industriels et commerciaux.

3.6.2.4. Améliorations et innovations futures

✚ Développement de matériaux adsorbants plus performants

Des matériaux adsorbants ayant une capacité d'adsorption plus élevée, une meilleure sélectivité pour la vapeur d'eau et une régénération plus facile peuvent améliorer l'efficacité et la durabilité des systèmes de déshumidification par adsorption.

✚ Systèmes de récupération d'énergie

L'intégration de systèmes de récupération d'énergie peut réduire la consommation d'énergie globale des systèmes de déshumidification par adsorption.

✚ Combinaison avec d'autres technologies de TEA

L'intégration de la déshumidification par adsorption avec d'autres techniques de TEA, comme la condensation par refroidissement, peut élargir l'applicabilité de la technologie dans des environnements climatiques variés.

En conclusion, la déshumidification par adsorption est une technique de récupération des eaux atmosphériques fiable et efficace qui offre un potentiel important pour répondre aux besoins en eau dans divers secteurs industriels et domestiques.

3.6.3. Récolte de rosée

La récolte de rosée, également connue sous le nom de captage de rosée, est une technique de récupération des eaux atmosphériques (TEA) qui consiste à collecter les gouttelettes de rosée qui se forment naturellement sur des surfaces froides la nuit. Des filets ou des structures spéciales peuvent être utilisés pour maximiser la quantité de rosée collectée. Cette technique simple et passive existe depuis des siècles et a été utilisée par diverses cultures dans le monde entier pour obtenir de l'eau potable dans des régions arides et semi-arides. [47]



Figure 3.3 : Principe de fonctionnement d'un de la récolte de rosée [47]

3.6.3.1. Fonctionnement détaillé

❖ Formation de la rosée

La rosée se forme lorsque la vapeur d'eau présente dans l'air se condense en gouttelettes d'eau liquide sur des surfaces froides. Ce phénomène se produit généralement la nuit, lorsque la température du sol et des objets exposés au ciel descend en dessous du point de rosée de l'air ambiant.

❖ Collecte de la rosée

La rosée est collectée en utilisant des matériaux absorbants, tels que des tissus, des filets, des éponges ou des matériaux naturels comme les feuilles et les branches. Ces matériaux sont disposés à l'extérieur la nuit, exposés à l'air ambiant, et captent les gouttelettes de rosée qui se forment.

❖ Transfert de l'eau

L'eau collectée par les matériaux absorbants est ensuite transférée dans des récipients de collecte, généralement des gouttières ou des conteneurs. Ce transfert peut se faire par gravité ou par des mécanismes passifs, comme l'utilisation de mèches ou de capillaires.

❖ Purification de l'eau

L'eau collectée peut contenir des impuretés et des contaminants provenant de l'air ambiant et des matériaux de collecte. Elle doit donc être purifiée avant d'être utilisée à des fins domestiques ou d'irrigation. La purification peut inclure des processus tels que la filtration, la stérilisation et la déminéralisation.

3.6.3.2. Avantages inconvénients et de la récolte de rosée

✚ Avantages

- **Simplicité et faible coût :** La technique est simple à mettre en œuvre et ne nécessite pas d'infrastructures complexes ou d'apports d'énergie externes.
- **Durabilité :** La technique est passive et ne consomme pas d'énergie, ce qui en fait une solution durable pour la récupération de l'eau.
- **Approvisionnement en eau local :** La rosée peut être collectée dans des zones où l'accès à d'autres sources d'eau douce est limité ou inexistant.
- **Adaptabilité à divers climats :** La technique peut être appliquée dans une large gamme de climats, bien qu'elle soit plus efficace dans les régions arides et semi-arides avec des nuits claires et fraîches.

✚ Inconvénients

- **Production d'eau limitée :** La quantité d'eau collectée dépend des conditions climatiques locales et de la surface de collecte disponible. La production peut être insuffisante pour répondre aux besoins en eau importants.
- **Dépendance des conditions météorologiques :** La technique est dépendante de la formation de rosée, qui ne se produit pas toutes les nuits et peut être affectée par des facteurs tels que la couverture nuageuse, l'humidité et le vent.
- **Risque de contamination :** L'eau collectée peut contenir des impuretés et des contaminants provenant de l'air ambiant et des matériaux de collecte.
- **Maintenance des matériaux de collecte :** Les matériaux de collecte peuvent nécessiter un entretien régulier pour maintenir leur efficacité et éviter la croissance de micro-organismes.

3.6.3.3. Applications de la récolte de rosée

- ✚ **Approvisionnement en eau potable dans les communautés rurales :** Fournir de l'eau potable dans des zones où l'accès à des sources d'eau salubres est limité.
- ✚ **Irrigation de petites cultures :** Arroser des cultures potagères et des arbres fruitiers dans des zones arides.
- ✚ **Alimentation du bétail :** Fournir de l'eau d'abreuvement aux animaux dans des zones de pâturage.
- ✚ **Prévention de la désertification :** Maintenir l'humidité du sol et favoriser la croissance de la végétation dans des zones arides.

3.6.3.4. Améliorations et innovations futures

- ✚ **Développement de matériaux de collecte plus performants**

Des matériaux ayant une meilleure capacité d'absorption et de transfert de l'eau, une résistance accrue aux contaminants et une durabilité accrue peuvent améliorer l'efficacité de la récolte de rosée.

- ✚ **Optimisation des structures de collecte**

Des structures de collecte plus efficaces, telles que des collecteurs inclinés ou des surfaces texturées, peuvent augmenter la quantité d'eau collectée.

En conclusion la récolte de rosée peut jouer un rôle important dans l'amélioration de l'accès à l'eau potable et à l'irrigation dans les communautés rurales et les zones isolées. Des recherches et des développements continus pour améliorer les matériaux de collecte et optimiser les structures de collecte pourraient accroître l'efficacité et l'applicabilité de cette technique ancestrale prometteuse.

3.6.4. Capture de brouillard

La capture de brouillard est une technique de récupération des eaux atmosphériques (TEA) qui vise à collecter les gouttelettes de brouillard présentes dans l'air. Le brouillard, souvent présent dans les régions montagneuses et côtières, peut constituer une source d'eau importante, en particulier dans des zones où l'accès à l'eau douce est limité. Capturer les gouttelettes de brouillard à l'aide de filets ou de structures spéciales. [48]

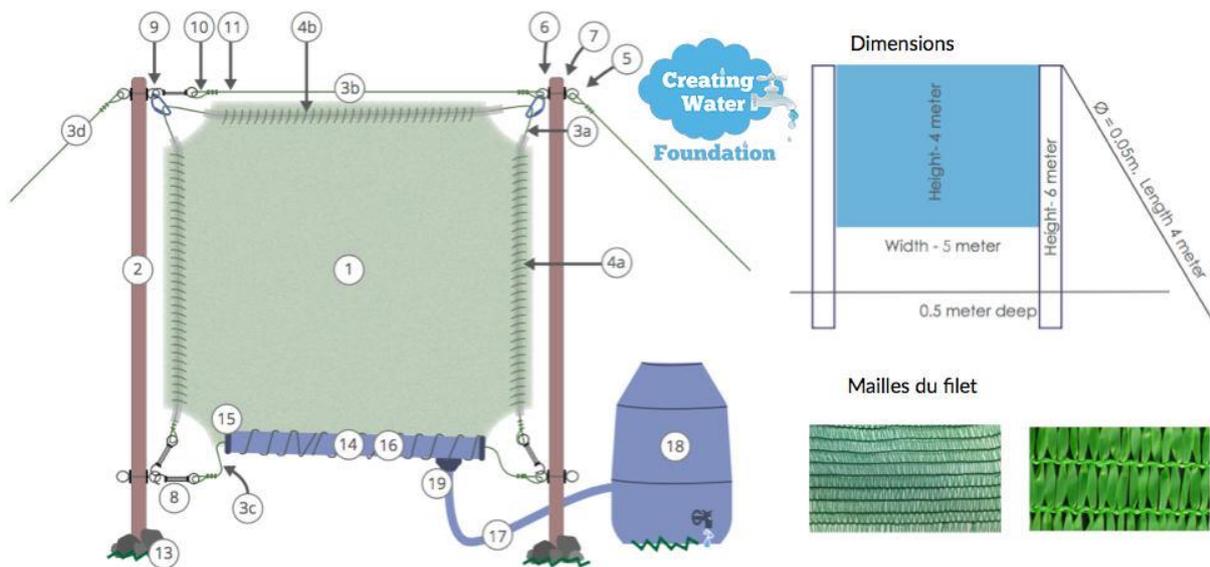


Figure 3.4 : Des capteurs de brouillard pour produire de l'eau [48]

3.6.4.1. Fonctionnement détaillé

❖ Identification des zones de brouillard

La première étape consiste à identifier les zones où le brouillard est fréquent et abondant. Cela peut se faire en analysant les données climatiques locales, en observant les patterns de formation de brouillard et en utilisant des outils de télédétection.

❖ Installation de structures de capture

Des structures spécifiques, appelées collecteurs de brouillard, sont installées dans les zones identifiées. Ces structures peuvent être de différentes formes et tailles, mais elles ont toutes pour objectif d'augmenter la surface de contact avec le brouillard et d'optimiser la capture des gouttelettes.

❖ Capture des gouttelettes de brouillard

Les collecteurs de brouillard sont généralement constitués de matériaux tels que des filets, des grilles métalliques ou des tissus synthétiques. Ces matériaux permettent aux gouttelettes de brouillard de s'y accrocher grâce à la tension superficielle.

❖ Évacuation de l'eau collectée

L'eau collectée par les collecteurs de brouillard s'écoule ensuite par gravité ou par des systèmes de drainage vers des réservoirs de collecte.

❖ Purification de l'eau

L'eau collectée peut contenir des impuretés et des contaminants provenant de l'air ambiant et des matériaux de collecte. Elle doit donc être purifiée avant d'être utilisée à des fins domestiques ou d'irrigation. La purification peut inclure des processus tels que la filtration, la stérilisation et la déminéralisation.

3.6.4.2. Avantages et inconvénients de la capture de brouillard

✚ Avantages

- **Production d'eau importante :** Dans les zones où le brouillard est fréquent et abondant, la capture de brouillard peut fournir une quantité d'eau significative.
- **Approvisionnement en eau local :** La technique permet de collecter l'eau dans des zones où l'accès à d'autres sources d'eau douce est limité.
- **Durabilité :** La technique est passive et ne consomme pas d'énergie, ce qui en fait une solution durable pour la récupération de l'eau.
- **Faible impact environnemental :** La technique n'a pas d'impact environnemental significatif, contrairement à d'autres méthodes de récupération d'eau comme les barrages ou le pompage des eaux souterraines.

✚ Inconvénients

- **Dépendance des conditions météorologiques :** La quantité d'eau collectée dépend de la fréquence et de l'abondance du brouillard dans la zone.
- **Coût d'installation :** L'installation de structures de capture de brouillard peut être coûteuse, en particulier dans des zones difficiles d'accès.
- **Maintenance des structures :** Les structures de capture de brouillard nécessitent un entretien régulier pour maintenir leur efficacité et éviter la croissance de micro-organismes.
- **Impact visuel :** Les structures de capture de brouillard peuvent avoir un impact visuel important sur le paysage, ce qui peut poser des problèmes d'acceptabilité sociale dans certaines régions.

3.6.4.3. Applications de la capture de brouillard

✚ Approvisionnement en eau potable dans les communautés rurales

Fournir de l'eau potable dans des zones où l'accès à des sources d'eau salubres est limité.

✚ Irrigation de petites cultures

Arroser des cultures potagères et des arbres fruitiers dans des zones arides.

✚ Alimentation du bétail

Fournir de l'eau d'abreuvement aux animaux dans des zones de pâturage.

✚ Prévention de la désertification

Maintenir l'humidité du sol et favoriser la croissance de la végétation dans des zones arides.

3.6.4.4. Améliorations et innovations futures

✚ Développement de matériaux de capture plus performants

Des matériaux ayant une meilleure capacité de capture des gouttelettes de brouillard, une résistance accrue aux contaminants et une durabilité accrue peuvent améliorer l'efficacité de la capture de brouillard.

✚ Optimisation des structures de capture

Des structures de capture plus efficaces, telles que des collecteurs inclinés ou des surfaces texturées, peuvent augmenter la quantité d'eau collectée.

✚ Combinaison avec d'autres technologies de TEA

L'intégration de la capture de brouillard avec d'autres techniques de TEA, comme la récolte de rosée

Malgré ses limites, la capture de brouillard peut être une solution viable pour l'approvisionnement en eau dans des zones arides et semi-arides. Des recherches et des développements continus pour optimiser les structures de capture et améliorer l'efficacité de la collecte pourraient rendre cette technique encore plus attractive et contribuer à atténuer le stress hydrique dans les régions où l'eau est une ressource rare et précieuse.

3.6.5. Extraction d'eau atmosphérique par membrane

L'extraction d'eau atmosphérique par membrane est une technique de récupération des eaux atmosphériques (TEA) émergente qui utilise des membranes semi-perméables pour séparer la vapeur d'eau de l'air ambiant. La vapeur d'eau est ensuite condensée et récupérée sous forme liquide. Cette technologie innovante offre un fort potentiel pour répondre aux défis liés à la raréfaction de l'eau douce, en particulier dans des régions arides et semi-arides. [52]

3.6.5.1. Fonctionnement détaillé

❖ Capture d'air

L'air ambiant est aspiré dans un système d'extraction d'eau atmosphérique par membrane à l'aide d'un ventilateur ou d'un autre dispositif d'aspiration.

❖ Mise en contact avec la membrane

L'air est ensuite mis en contact avec une membrane semi-perméable. Ces membranes sont conçues pour permettre le passage de la vapeur d'eau tout en bloquant les gaz non condensables comme l'azote et l'oxygène.

❖ Diffusion de la vapeur d'eau

La vapeur d'eau présente dans l'air diffuse à travers la membrane semi-perméable, attirée par une pression partielle plus basse du côté opposé de la membrane.

❖ Condensation de la vapeur d'eau

La vapeur d'eau ayant traversé la membrane se condense en eau liquide du fait de la différence de pression et de température entre les deux côtés de la membrane.

❖ Collecte de l'eau

L'eau condensée est ensuite collectée et stockée dans un réservoir.

❖ Régénération de la membrane

La membrane doit être régénérée périodiquement pour éliminer les contaminants et maintenir son efficacité. La régénération peut se faire par lavage à l'eau ou par un changement de pression.

3.6.5.2. Avantages et inconvénients de l'extraction d'eau atmosphérique par membrane

✚ Avantages

- **Efficacité élevée dans une large plage d'humidité :** La technique peut être efficace dans une large plage d'humidité relative, de 1% à 100%.
- **Production d'eau de haute qualité :** L'eau produite par extraction d'eau atmosphérique par membrane est généralement de haute qualité, avec une faible teneur en contaminants.
- **Fonctionnement à température ambiante :** La technique ne nécessite pas de refroidissement direct de l'air, ce qui peut être un avantage dans certains environnements.
- **Flexibilité :** La technique peut être adaptée à différentes échelles, des petits déshumidificateurs domestiques aux installations industrielles de grande capacité.
- **Faible impact environnemental :** La technique n'a pas d'impact environnemental significatif, contrairement à d'autres méthodes de récupération d'eau comme les barrages ou le pompage des eaux souterraines.

✚ Inconvénients

- **Coût élevé :** Les systèmes d'extraction d'eau atmosphérique par membrane peuvent être coûteux à installer et à entretenir, en raison du coût élevé des membranes semi-perméables.
- **Consommation d'énergie :** La technique consomme de l'énergie pour aspirer l'air et régénérer la membrane.
- **Génération de chaleur :** La régénération de la membrane peut générer de la chaleur, qui doit être dissipée.
- **Technologie relativement nouvelle :** L'extraction d'eau atmosphérique par membrane est une technologie relativement nouvelle qui nécessite encore des développements et une optimisation pour une meilleure efficacité et un coût réduit.

3.6.5.3. Applications de l'extraction d'eau atmosphérique par membrane

✚ Production d'eau potable dans les communautés rurales

Fournir de l'eau potable dans des zones où l'accès à des sources d'eau salubres est limité.

- ✚ **Approvisionnement en eau pour les applications industrielles**

Fournir de l'eau pour les processus industriels qui nécessitent une eau de haute qualité.

- ✚ **Déshumidification de l'air**

Contrôler l'humidité dans les environnements industriels et commerciaux sensibles à l'humidité.

- ✚ **Applications dans les zones arides et semi-arides**

Récupérer l'eau dans des régions où les sources d'eau traditionnelles sont rares ou inexistantes.

3.6.5.4. Améliorations et innovations futures

- ✚ **Développement de membranes plus performantes**

Des membranes ayant une perméabilité à la vapeur d'eau plus élevée, une sélectivité accrue et une durabilité accrue peuvent améliorer l'efficacité et réduire le coût de l'extraction d'eau atmosphérique par membrane.

- ✚ **Optimisation des systèmes d'extraction**

Des systèmes d'extraction plus efficaces, avec une consommation d'énergie réduite et une meilleure gestion de la chaleur générée,

En conclusion, l'extraction d'eau atmosphérique par membrane présente un fort potentiel pour devenir une source d'eau durable et fiable dans le futur. Des recherches et des innovations continues pour développer des membranes plus performantes, optimiser les systèmes d'extraction et réduire la consommation d'énergie pourraient rendre cette technologie plus accessible et répandue.

3.6.6. Critères de choix de la technique de récupération des eaux atmosphériques

Le choix de la technique de TEA la plus adaptée dépend de plusieurs facteurs, tels que :

- ✚ **L'environnement climatique :** L'humidité, la température et la présence de brouillard influencent l'efficacité des différentes techniques. La quantité de pluie reçue et la régularité des précipitations influencent le choix du système de collecte. La présence de brouillard ou de rosée peut déterminer l'utilisation de filets à brouillard ou de collecteurs de rosée.

- ✚ **Les besoins en eau :** La quantité d'eau requise et la qualité souhaitée de l'eau guideront le choix de la technologie. Les techniques doivent garantir une qualité d'eau potable. Pour l'irrigation ; moins d'exigence sur la qualité, mais quantité et régularité sont essentielles.
- ✚ **Les ressources disponibles :** Le coût d'investissement, l'accès à l'énergie et les compétences techniques nécessaires varient selon les techniques.
- ✚ **Infrastructures et installations :** les systèmes de collecte varient en termes de cout d'installation et de maintenance. Certains systèmes nécessitent des technologies avancées et des compétences techniques pour leur installation et entretien.
- ✚ **Disponibilité des matériaux et ressources :** l'accessibilité locale des matériaux peut influencer le choix de la méthode. La disponibilité de personnel formé pour l'installation et la maintenance des systèmes est cruciale.
- ✚ **Efficacité et rendement :** Le rendement des systèmes en fonction de la surface de collecte et du volume d'eau récupéré. La longévité et la résilience des systèmes face aux conditions climatiques et environnementales.

En évaluant ces critères et en choisissant la technique adaptée aux besoins et à l'environnement, nous pouvons maximiser l'efficacité de la récupération des eaux atmosphériques.

3.7. Les aspects économiques, la viabilité et la durabilité de ces systèmes

3.7.1. Les aspects économiques

Voici les principaux aspects économiques à prendre en compte pour les systèmes de récupération d'eau atmosphérique :

❖ Coûts d'investissement initiaux

- Achat des équipements (systèmes de condensation/absorption, réservoirs, pompes etc.)
- Installation et mise en service
- Ingénierie et études préalables Ces coûts en capital représentent une dépense importante, variable selon la taille et la technologie choisie.

❖ Coûts opérationnels récurrents :

- Energie (électricité, chaleur) pour faire fonctionner les systèmes de réfrigération/régénération
- Maintenance et remplacement des pièces (filtres, dessicants, pièces d'usure)

- Main d'œuvre
- Traitement éventuel de l'eau produite Ces coûts opérationnels sur le long terme sont souvent plus élevés que l'investissement initial.

❖ **Coût de production de l'eau**

Il dépend des rendements des systèmes et de tous les coûts cumulés. Il varie grandement (de mais reste généralement supérieur aux coûts de production d'eau par des techniques conventionnelles.

❖ **Economies potentielles :**

- Réduction des coûts de transport/distribution dans les zones isolées
- Valorisation éventuelle des sous-produits (chaleur, air déshumidifié)
- Report des investissements lourds en infrastructures hydrauliques

3.7.2. Viabilité économique :

La viabilité économique des systèmes de récupération d'eau atmosphérique dépend de plusieurs facteurs :

❖ **Coûts d'investissement et d'exploitation**

- Les coûts d'investissement initiaux sont généralement élevés pour l'achat des équipements et l'installation.
- Les coûts opérationnels récurrents (énergie, maintenance, remplacement des pièces) peuvent représenter une part importante sur le long terme.
- Le coût total de production de l'eau par ces systèmes reste souvent plus élevé que les sources d'approvisionnement conventionnelles.

❖ **Contexte géographique et climatique**

- La viabilité économique est meilleure dans les régions arides/semi-arides dépourvues de ressources en eau facilement accessibles.
- Des conditions météorologiques favorables (chaleur, humidité) permettent d'atteindre de meilleurs rendements et de réduire les coûts de production.

❖ **Concurrence avec les autres sources d'eau**

- Cette solution est plus avantageuse lorsque les coûts de l'eau provenant d'autres sources (eau dessalée, transport sur longues distances) sont très élevés.
- Elle reste difficilement compétitive économiquement face à l'eau issue de nappes, rivières ou barrages lorsque celles-ci sont disponibles localement.

❖ **Échelle et finalité du projet**

- Les petits systèmes décentralisés pour l'usage domestique ou de petites communautés sont plus facilement rentables.
- Les grandes installations industrielles nécessitent des volumes importants pour dégager des économies d'échelle suffisantes.
- La viabilité dépend aussi de la finalité : eau potable, activités agricoles/industrielles, production d'énergie...

❖ **Soutiens publics et environnement économique**

- Dans certains cas, des aides publiques, subventions ou tarifs préférentiels sur l'énergie sont requis pour assurer la rentabilité, surtout pour l'usage domestique.
- Un environnement économique stable et des coûts énergétiques raisonnables sont indispensables.

3.7.3. Durabilité de ces systèmes

❖ **Durabilité environnementale**

La durabilité des systèmes de récupération d'eau atmosphérique repose sur plusieurs aspects environnementaux, sociaux et économiques à long terme :

- **Impact énergétique** : La plupart des systèmes (sauf condensation radiative passive) consomment de l'énergie, générant des émissions indirectes de gaz à effet de serre en fonction de la source d'énergie utilisée.
- **Utilisation des ressources** : Consommation d'eau et de matières premières (réfrigérants, dessicants...) dont l'approvisionnement doit être durable.
- **Gestions des déchets** : Traitement en fin de vie des équipements et des consommables usagés.
- **Rejets** : Gestion des eaux usées industrielles et des effluents éventuels.
- **Impacts locaux** : Empreinte au sol, nuisances sonores/visuelles, modification microclimatique à étudier.

❖ **Durabilité économique**

- Conception et dimensionnement économes en énergie et ressources.
- Optimisation des coûts d'investissement et d'exploitation sur le cycle de vie complet.
- Modèles économiques viables dans la durée sans aide extérieure permanente.
- Création d'emplois et de richesses locales pérennes.

❖ **Durabilité sociale**

- Accès à l'eau pour les populations vulnérables dans les régions arides.

- Amélioration de la sécurité hydrique et alimentaire locale.
- Appropriation des technologies par les communautés locales.
- Participation des parties prenantes à la gouvernance de l'eau.

Pour garantir la durabilité à long terme, ces systèmes doivent donc être conçus et déployés dans une approche d'éco-conception, d'efficacité énergétique et de viabilité économique, tout en maximisant les bénéfices sociaux et en réduisant les impacts environnementaux sur leur cycle de vie complet.

3.7.4. Rentabilité économique

La rentabilité économique des systèmes de récupération d'eau atmosphérique est un enjeu majeur pour assurer leur viabilité et leur déploiement à plus grande échelle. Elle dépend de plusieurs facteurs.

3.7.5. Rendements et productivité

- Le coût de production par m³ d'eau dépend grandement des rendements obtenus
- Ceux-ci varient selon la technologie, mais aussi les conditions météorologiques (chaleur, humidité)
- Des rendements faibles impactent directement la rentabilité

3.7.6. Concurrence avec autres sources d'eau

- Compétition difficile avec l'eau issue de ressources conventionnelles (nappes, rivières) lorsque disponibles localement
- Peut-être plus avantageuse face à l'eau dessalée ou acheminée sur de longues distances dans les zones désertiques.

3.8. Les challenges technologiques et les pistes d'amélioration potentielle

Les principaux défis technologiques auxquels sont confrontés les systèmes de récupération d'eau atmosphérique, ainsi que quelques pistes d'amélioration potentielle : [53]

3.8.1. Défis technologiques

- Rendements encore limités, surtout pour les techniques passives comme la condensation radiative.
- Consommation énergétique élevée des systèmes réfrigérés qui impacte les coûts opérationnels.
- Durée de vie réduite de certains composants (dessicants, filtres) nécessitant des remplacements fréquents.
- Encrassement et entartrage des surfaces de captation par les poussières et impuretés.

- Difficultés techniques de mise à l'échelle pour atteindre des capacités de production industrielles.
- Traitement de l'eau brute parfois nécessaire avant utilisation selon la qualité requise.

3.8.2. Pistes d'amélioration

- Développer de nouveaux matériaux haute performance (revêtements, dessiccants) plus efficaces et durables.
- Optimiser les designs et géométries des systèmes de captation pour maximiser les rendements.
- Utiliser des réfrigérants et fluides à plus faible impact environnemental.
- Intégrer la récupération de chaleur résiduelle pour réduire les besoins énergétiques.
- Développer des systèmes hybrides combinant plusieurs techniques selon le contexte climatique.
- Explorer les possibilités offertes par les nanomatériaux et membranes pour améliorer les procédés.
- Favoriser l'usage d'énergies renouvelables (solaire, éolien) pour l'autonomie énergétique.
- Mettre au point des techniques simples de traitement de l'eau in situ.

L'innovation technologique reste essentielle pour relever ces défis, accroître les performances, fiabilité et viabilité économique de ces systèmes, qui demeurent encore relativement coûteux et énergivores à ce stade.

3.9. Conclusion

En conclusion, les techniques de récupération des eaux atmosphériques offrent un éventail de solutions prometteuses pour répondre aux défis liés à la raréfaction de l'eau douce. Le choix de la technique la plus adaptée dépend de chaque contexte spécifique, et des efforts continus de recherche et développement permettront d'améliorer l'efficacité, la durabilité et le coût de ces technologies pour un accès à l'eau plus équitable et durable.

En combinant différentes techniques de récupération des eaux atmosphériques, il est possible de créer des systèmes d'approvisionnement en eau complets et résilients pour répondre aux besoins en eau croissants dans un monde confronté à la raréfaction de cette ressource précieuse.

Les TEA ont le potentiel de jouer un rôle important dans la lutte contre la pénurie d'eau et de garantir un accès à l'eau potable pour tous.

Chapitre IV
Technique de
condensation
par refroidissement
de l'air

Chapitre IV

Technique de condensation par refroidissement de l'air

4.1. Introduction

Face à la raréfaction des ressources en eau douce dans de nombreuses régions du monde, l'extraction de l'eau contenue dans l'air ambiant représente une solution prometteuse pour pallier ce manque. Parmi les différentes technologies de récupération des eaux atmosphériques, la condensation de l'air humide est une approche efficace et de plus en plus étudiée [54].

Le principe de base de cette méthode consiste à refroidir l'air humide en dessous de son point de rosée, température à laquelle la vapeur d'eau se condense pour former de l'eau liquide. En contrôlant ce processus de changement de phase, il est possible d'extraire l'humidité présente dans l'air ambiant [55]. Bien que ce concept soit connu depuis des siècles, les récents progrès techniques et scientifiques ont permis d'améliorer considérablement les performances et l'efficacité énergétique de ces systèmes.

Les techniques de condensation de l'air peuvent être classées en plusieurs catégories selon le mode de refroidissement utilisé, notamment le refroidissement par convection forcée, la détente et l'effet Peltier [56]. Le choix de la méthode dépend de divers facteurs tels que les conditions environnementales, la quantité d'eau souhaitée et les contraintes énergétiques.

Au cœur de ces systèmes se trouvent les surfaces de condensation, conçues avec des matériaux et des géométries spécifiques pour optimiser la collecte de l'eau condensée [57]. Des améliorations constantes sont apportées, comme l'utilisation de surfaces super-hydrophobes ou de structures à l'échelle nanométrique [58].

L'efficacité globale des systèmes à condensation dépend de nombreux paramètres environnementaux tels que l'humidité relative, la température ambiante et la vitesse de l'air. Des modèles et simulations numériques sont utilisés pour mieux comprendre et optimiser ces processus complexes [59].

Cette technologie suscite un intérêt croissant pour diverses applications allant de l'approvisionnement en eau potable dans les régions arides à la récupération d'eau dans les bâtiments et les systèmes de climatisation [60]. Son intégration avec les énergies renouvelables est également prometteuse pour une production d'eau durable.

4.2. Principes de base de la condensation par refroidissement de l'air

Le processus de condensation est un changement de phase de la vapeur d'eau à l'état liquide. Il se produit lorsque l'air humide est refroidi en dessous de son point de rosée, qui est la

température à laquelle la vapeur d'eau commence à se condenser en gouttelettes d'eau liquide. [54].

Lorsque l'air humide entre en contact avec une surface froide en dessous du point de rosée, la vapeur d'eau se condense spontanément sous forme liquide. Ce changement de phase libère de la chaleur latente, qui doit être évacuée pour maintenir la surface à basse température [60].

La formation de gouttelettes suit généralement deux modes distincts [61] :

- **Condensation par film** : un film d'eau liquide se forme d'abord sur la surface.
- **Condensation par gouttes** : des gouttelettes se forment directement sur la surface.

Le mode prédominant dépend des propriétés de la surface (rugosité, mouillabilité, etc.) et des conditions environnementales.

4.2.1. Le processus de changement d'état de la vapeur à l'eau liquide

Le changement d'état de la vapeur d'eau à l'eau liquide, appelé condensation, est un processus complexe impliquant des interactions moléculaires et des transferts d'énergie. Il se produit lorsque la vapeur d'eau atteint une température inférieure à son point de rosée.

❖ Processus moléculaire

À l'échelle moléculaire, la condensation implique la formation de gouttelettes d'eau à partir de molécules de vapeur d'eau. Dans la phase gazeuse, les molécules de vapeur d'eau sont séparées et se déplacent rapidement et de manière désordonnée. Lorsque la température diminue, leur énergie cinétique diminue également, ce qui permet aux forces intermoléculaires attractives (forces de van der Waals) de les rapprocher [62].

Les molécules commencent alors à former des amas ou des nucléus autour de particules microscopiques présentes dans l'air (noyaux de condensation). Une fois qu'un nucléus atteint une taille critique, il devient stable et peut croître par condensation supplémentaire de molécules de vapeur d'eau, formant ainsi une gouttelette liquide [62].

❖ Transferts d'énergie

Le processus de condensation est un processus exothermique, c'est-à-dire qu'il libère de la chaleur latente. Lorsqu'une molécule de vapeur d'eau se condense, elle perd son énergie de vaporisation et la relâche sous forme de chaleur. Cette chaleur latente de condensation doit être évacuée pour permettre une condensation continue [64].

Le transfert de chaleur se produit généralement par convection depuis la surface de condensation vers un fluide de refroidissement, ou par conduction à travers la surface elle-même. Un apport d'énergie supplémentaire peut être nécessaire pour maintenir la surface en dessous du point de rosée [60].

❖ Cinétique de condensation

La vitesse à laquelle la condensation se produit dépend de plusieurs facteurs, notamment la sursaturation (différence entre la pression de vapeur réelle et la pression de vapeur saturante), la température de la surface, la nature de la surface (rugosité, mouillabilité) et les conditions d'écoulement de l'air [65].

4.2.2. Notion de point de rosée et sa température

Le point de rosée est la température à laquelle l'air doit être refroidi, à pression constante, pour que la vapeur d'eau qu'il contient soit saturée et commence à se condenser. En d'autres termes, c'est la température à laquelle la phase vapeur coexiste avec la phase liquide de l'eau.

❖ Température du point de rosée

La température du point de rosée dépend de la pression partielle de vapeur d'eau présente dans l'air. Plus la quantité de vapeur d'eau (humidité) est élevée, plus la température du point de rosée est élevée [62].

Elle peut être calculée à partir de l'équation de Clausius-Clapeyron :

$$T_d = \frac{(b \cdot \ln(P_y/C))}{(a - \ln(P_y/C))} \dots\dots\dots (4.1)$$

Où

- T_d est la température du point de rosée (K),
- P_v la pression partielle de vapeur d'eau (Pa), et a, b et c sont des constantes empiriques spécifiques à l'eau [61].

❖ Relation avec l'humidité relative

L'humidité relative (HR) est le rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau réelle et la pression de vapeur saturante à la même température. Lorsque l'humidité relative atteint 100%, l'air est saturé et la condensation se produit si la température diminue davantage [62].

La température du point de rosée est donc étroitement liée à l'humidité relative. Plus l'HR est élevée, plus la température du point de rosée est proche de la température ambiante.

❖ Importance pour la condensation

Connaître la température du point de rosée est crucial pour les procédés de condensation de l'air humide. Pour qu'il y ait condensation, la surface doit être refroidie en dessous de la température du point de rosée [60].

L'écart entre la température de la surface et la température du point de rosée détermine le taux de condensation. Plus cet écart est grand, plus la force motrice pour la condensation est élevée, ce qui augmente le taux de récupération d'eau.

4.2.3. Facteurs influençant la condensation

Les principaux facteurs qui influencent le processus de condensation sont :

❖ Température

La température est le facteur le plus important pour la condensation. Une diminution de la température de l'air humide en dessous de son point de rosée est nécessaire pour que la vapeur d'eau se condense. Plus l'écart entre la température et le point de rosée est grand, plus le taux de condensation est élevé [62].

❖ Humidité relative

L'humidité relative représente le rapport entre la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air et la quantité maximale que l'air peut contenir à cette température. Une humidité relative élevée signifie que l'air est proche de la saturation, favorisant ainsi la condensation [62].

❖ Pression atmosphérique

Une augmentation de la pression atmosphérique totale favorise la condensation, car elle augmente la pression partielle de vapeur d'eau et donc la quantité de vapeur d'eau condensable [61].

❖ Vitesse de l'air

Un débit d'air plus élevé sur la surface de condensation améliore le transfert de masse des molécules de vapeur d'eau vers la surface, augmentant ainsi le taux de condensation. Cependant, une vitesse trop élevée peut également emporter les gouttelettes condensées [61].

❖ Nature des surfaces

Les propriétés des surfaces, telles que la rugosité, la mouillabilité (hydrophilie/hydrophobie) et la géométrie, influencent la formation et la croissance des gouttelettes condensées. Les surfaces

hydrophiles favorisent la formation d'un film d'eau, tandis que les surfaces rugueuses ou hydrophobes favorisent la condensation par gouttes [59].

❖ Contaminants

La présence de particules ou de gaz dans l'air peut affecter la condensation en modifiant les propriétés de surface ou en agissant comme noyaux de condensation supplémentaires [59].

4.3. Différentes méthodes de condensation pour l'eau atmosphérique

Les principales méthodes de condensation utilisées pour récupérer l'eau atmosphérique sont :

❖ Refroidissement par convection forcée

Cette méthode utilise un fluide réfrigérant froid, généralement de l'air ou un liquide, pour refroidir une surface en dessous du point de rosée de l'air humide. L'air passe sur cette surface froide, ce qui entraîne la condensation de la vapeur d'eau [58].

❖ Refroidissement par détente

Le principe est de faire détendre l'air humide, ce qui entraîne une diminution de sa température en dessous du point de rosée. La vapeur d'eau se condense alors sur une surface froide. Ce processus est similaire à celui utilisé dans les déshumidificateurs à détente [60].

❖ Refroidissement par effet Peltier

Cette technique exploite l'effet Peltier, un phénomène thermoélectrique où un courant électrique traversant la jonction de deux métaux différents transfère de la chaleur, créant ainsi un côté froid. L'air humide passe sur ce côté froid pour permettre la condensation [58].

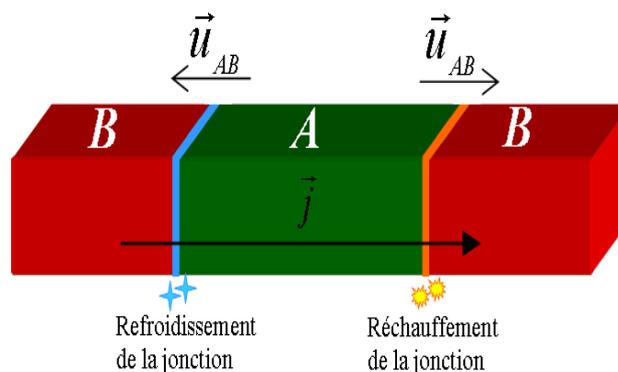


Figure 4.1 : Principes de L'effet Peltier [58]

❖ Condensation par surface froide

Il s'agit d'une méthode passive où une surface métallique ou plastique est refroidie en dessous du point de rosée, généralement par un système de réfrigération ou un fluide caloporteur froid circulant à l'intérieur. L'humidité de l'air se condense sur cette surface froide [58].

❖ Condensation sur matériaux hygroscopiques

Certains matériaux hygroscopiques, comme les sels ou les polymères, peuvent absorber la vapeur d'eau de l'air et la condenser sous forme liquide. Cette méthode ne nécessite pas de refroidissement mais reste limitée en termes de quantité d'eau récupérable [58].

❖ Condensation par refroidissement radiatif

Dans cette approche, une surface exposée au ciel clair perd de la chaleur par rayonnement infrarouge vers l'espace, ce qui la refroidit suffisamment pour permettre la condensation de la vapeur d'eau de l'air ambiant [58].

4.4. Conception des systèmes de condensation

Les principaux aspects à prendre en compte pour la conception des systèmes de condensation visant à récupérer l'eau atmosphérique :

4.4.1. Matériaux et géométries des surfaces de condensation

Le choix des matériaux et de la géométrie des surfaces de condensation est crucial pour optimiser le processus. Les matériaux doivent avoir une bonne conductivité thermique (métaux comme l'aluminium, le cuivre) et être résistants à la corrosion [57].

Différentes géométries sont utilisées : plaques planes, ailettes, tubes, canaux microstructurés, etc. Les surfaces texturées à l'échelle micro/nanométrique peuvent augmenter l'aire de condensation [56].

4.4.2. Systèmes de refroidissement

Pour maintenir les surfaces en dessous du point de rosée, différents systèmes de refroidissement sont employés comme la réfrigération par compression, les échangeurs air-liquide, les systèmes thermoélectriques (effet Peltier) ou le refroidissement radiatif [58]. Le dimensionnement et l'intégration de ces systèmes dépendent des conditions opératoires.

4.4.3. Gestion de l'air

La circulation efficace de l'air humide sur les surfaces froides est essentielle. Des ventilateurs ou des systèmes de soufflage d'air peuvent être utilisés pour forcer la convection. Le débit d'air, sa vitesse et son cheminement doivent être optimisés. Une filtration préalable peut également être nécessaire pour éliminer les contaminants [57].

4.4.4. Récupération et évacuation de l'eau condensée

L'eau condensée doit être collectée et évacuée de manière efficace, en utilisant des systèmes de drainage, des goulottes, des réservoirs, etc. Les surfaces peuvent être inclinées ou présenter des rainures pour faciliter l'écoulement de l'eau. Des traitements anti-buée peuvent être appliqués pour éviter l'engorgement [58].

4.4.5. Contrôle et automatisation

Des systèmes de contrôle et d'automatisation permettent d'ajuster les paramètres opératoires (température, débit d'air, cycles de fonctionnement) en fonction des conditions ambiantes pour optimiser les performances et l'efficacité énergétique [60].

4.4.6. Intégration globale

La conception doit tenir compte de l'intégration du système dans son environnement final (bâtiment, installation industrielle, etc.), en considérant les contraintes d'espace, d'alimentation électrique, de maintenance, etc.

4.5. Efficacité et optimisation des systèmes

Il existe plusieurs facteurs qui influencent l'efficacité des systèmes de condensation pour la récupération d'eau atmosphérique, ainsi que les pistes d'optimisation :

4.5.1. Facteurs influençant le rendement

❖ Humidité relative

Plus l'humidité relative de l'air est élevée, plus la quantité d'eau condensable est importante, augmentant ainsi le rendement du système [60].

❖ **Température ambiante**

Une température ambiante élevée signifie généralement une humidité absolue (quantité de vapeur d'eau) plus élevée, ce qui favorise la récupération d'eau. Cependant, un écart trop grand avec la température de la surface de condensation peut réduire l'efficacité [58].

❖ **Débit d'air**

Un débit d'air suffisant sur les surfaces de condensation permet d'apporter continuellement de la vapeur d'eau, mais une vitesse trop élevée peut également emporter les gouttelettes d'eau avant qu'elles ne soient collectées [57].

❖ **Différence de température**

Plus l'écart entre la température de la surface et la température du point de rosée est grand, plus le taux de condensation est élevé. Cependant, un refroidissement excessif augmente la consommation énergétique [58].

4.5.2. Pistes d'optimisation

❖ **Modélisation et simulations numériques**

Des modèles mathématiques et des simulations par CFD « Computational Fluid Dynamics » (mécanique des fluides numérique) permettent d'optimiser la conception des systèmes, en étudiant l'impact des différents paramètres et géométries [59].

❖ **Surfaces super-hydrophobes**

L'utilisation de surfaces super-hydrophobes texturées à l'échelle micro/nano favorise la condensation par gouttes plutôt que par film, facilitant ainsi la collecte de l'eau [58].

❖ **Augmentation des surfaces d'échange**

L'utilisation de surfaces étendues (ailettes, micro-canaux, etc.) permet d'augmenter l'aire de condensation et d'améliorer les transferts de chaleur et de masse [57].

❖ **Récupération de la chaleur latente**

La chaleur latente libérée lors de la condensation peut être récupérée et réutilisée pour préchauffer l'air entrant, améliorant ainsi l'efficacité énergétique globale [60].

❖ **Couplage avec les énergies renouvelables**

L'utilisation d'énergies renouvelables (solaire, géothermie, etc.) pour alimenter les systèmes de refroidissement permet de réduire la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ [57].

4.6. Applications et perspectives

Les principales applications et perspectives pour les systèmes de récupération d'eau atmosphérique par condensation sont :

- Systèmes domestiques/commerciaux pour l'eau potable
- Récupération dans les bâtiments/systèmes HVAC
- Régions arides et zones de stress hydrique
- Intégration aux énergies renouvelables

❖ Systèmes domestiques/commerciaux pour l'eau potable

Dans les régions arides ou semi-arides, ces systèmes peuvent fournir une source d'eau potable supplémentaire pour les ménages, les bâtiments commerciaux ou les petites communautés [54]. Ils permettent de réduire la dépendance aux sources d'eau conventionnelles.

❖ Récupération d'eau dans les bâtiments/systèmes HVAC

L'intégration de ces technologies dans les systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (HVAC) des bâtiments permet de récupérer l'eau présente dans l'air d'évacuation. Cette eau peut être réutilisée pour diverses applications non potables (chasse d'eau, arrosage, etc.) [60].

❖ Régions arides et zones de stress hydrique

La récupération d'eau atmosphérique est particulièrement prometteuse dans les régions désertiques ou côtières arides, où les ressources en eau douce sont rares. Elle peut contribuer à l'approvisionnement en eau potable et à l'agriculture dans ces zones [60].

❖ Applications industrielles et militaires

Ces systèmes peuvent fournir de l'eau pour les procédés industriels, le refroidissement des équipements ou les besoins en eau potable sur les sites isolés. Ils présentent également un intérêt pour les applications militaires dans des environnements hostiles [61].

❖ Intégration aux énergies renouvelables

Le couplage des systèmes de condensation avec des sources d'énergie renouvelables (solaire, éolienne, géothermique) permet d'obtenir une production d'eau durable avec une faible empreinte carbone [58].

❖ Adaptation au changement climatique

Avec l'augmentation des températures et la raréfaction des ressources en eau dans certaines régions due au changement climatique, la récupération d'eau atmosphérique pourrait devenir une solution clé pour l'approvisionnement en eau [57].

❖ Nouvelles applications émergentes

Des recherches sont en cours pour explorer d'autres applications potentielles, comme la production d'eau pour les stations spatiales, l'extraction d'eau sur Mars ou d'autres planètes, ou encore la capture de l'humidité dans les environnements extrêmes [62].

4.7. Innovations technologiques

4.7.1. Récolte de l'eau atmosphérique moderne

La méthode artisanale de récupération du brouillard n'est toutefois pas toujours appropriée ni pratique, en particulier dans les zones sèches et arides. C'est là que des techniques plus modernes peuvent être envisagées. Un récupérateur d'eau atmosphérique ou un générateur d'eau atmosphérique (AWG) est un appareil alimenté à l'électricité qui utilise le principe de déshumidification pour transformer l'eau de boisson en humidité de l'air. Avec une quantité d'eau renouvelable dans l'atmosphère de la planète estimée à environ 12 504 kilomètres cubes, il existe certainement une source illimitée d'eau à exploiter.

AWG peut être utilisé pratiquement n'importe où si de l'eau potable est nécessaire, mais il convient surtout dans les endroits très humides. L'endroit idéal pour cela est la bande autour de l'équateur (40 ° de latitude nord à 40 ° de latitude sud). Il se trouve également que la plupart des gens se trouvent dans le monde. Fait intéressant, c'est dans cette bande que la plupart des problèmes de pénurie d'eau ont été identifiés.

Les appareils AWG sont conçus pour générer de l'eau à des températures relativement modérées mais à une humidité relative élevée. Ils ont tendance à produire plus d'eau dans les endroits où la température est élevée et le climat humide, et moins d'eau dans les régions plus froides ou sèches.

Absolument aucune source d'eau conventionnelle ou secondaire n'est nécessaire dans un AWG. La seule ressource dont AWG a besoin pour fonctionner est l'air avec son humidité emprisonnée, car le processus imite la formation de la pluie. L'électricité alimente l'appareil, qui peut être obtenu à partir du réseau électrique principal ou de sources d'énergie propres telles que panneaux solaires, éoliennes, convertisseur d'ondes, etc.

Cette technologie est un système décentralisé de collecte d'eau atmosphérique qui n'était pas considérée auparavant comme une source d'eau potable pour les masses. Il est durable, fiable et produit de l'eau potable sans installation massive et complexe.

Comment fonctionne AWG?

La vapeur d'eau dans l'air est condensée en refroidissant l'air en dessous du point de rosée, en l'exposant à des dessiccants ou en le pressurant. Les deux techniques principales utilisées sont le refroidissement et le dessiccant.

L'AWG fonctionne par distillation. Il capte la vapeur d'eau de l'air et la dirige vers un système d'évaporation dans un environnement sanitaire avant de se liquéfier et d'être exposé à la pollution.

Dans les générateurs d'eau atmosphérique (AWG), un compresseur fait circuler un fluide frigorigène à travers un condenseur et un évaporateur, abaissant ainsi la température de l'air et provoquant la condensation de la vapeur d'eau. Ce processus permet de capter l'humidité de l'air ambiant, qui est ensuite collectée sous forme d'eau liquide. Cette eau, après avoir été purifiée, peut être utilisée à des fins diverses, y compris la consommation humaine, l'irrigation et les applications industrielles.

Les systèmes de condensation utilisent généralement des technologies de réfrigération similaires à celles des climatiseurs et des déshumidificateurs, mais optimisées pour maximiser la production d'eau. En abaissant la température de l'air à un point où la vapeur d'eau se transforme en liquide, ces systèmes peuvent produire de l'eau en quantités significatives, même dans des environnements avec une humidité relative modérée. L'intégration de filtres et de systèmes de purification garantit que l'eau produite est de haute qualité, répondant aux normes de potabilité et étant exempte de contaminants et d'impuretés. [54]

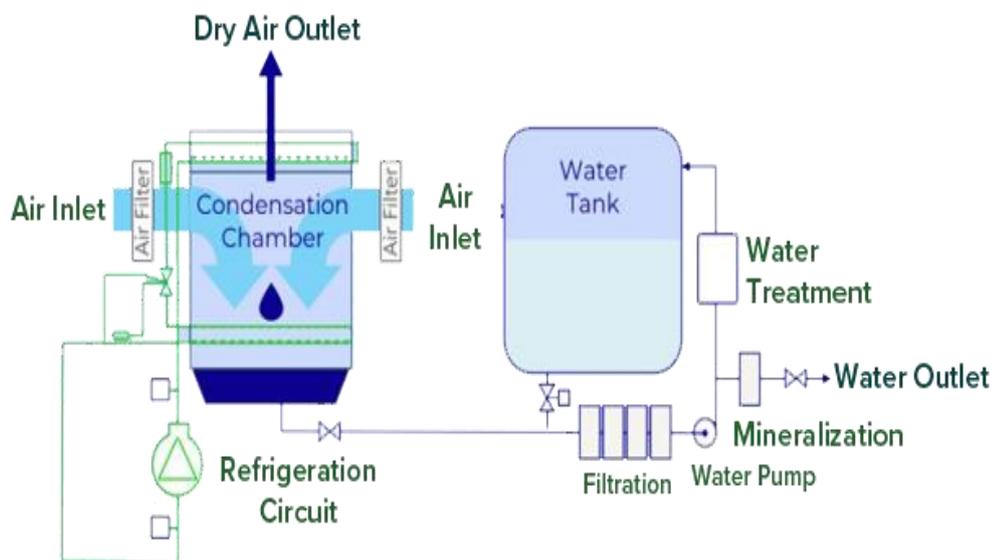


Figure 4.2 : Principes de la méthode de condensation [54]

4.7.2. Systèmes Solaires

Les dispositifs solaires pour la condensation de l'eau atmosphérique sont également en développement. Ces systèmes utilisent l'énergie solaire pour refroidir l'air et provoquer la condensation, offrant ainsi une solution écologique et autonome. L'utilisation de l'énergie solaire réduit considérablement la consommation d'énergie des systèmes de condensation, les rendant plus durables et plus adaptés aux régions ensoleillées et isolées.

❖ **Fonctionnement :**

Ces dispositifs exploitent l'énergie solaire pour chauffer l'air ambiant, ce qui augmente sa capacité à contenir de l'humidité.

L'air chaud et humide est ensuite refroidi rapidement, souvent la nuit lorsque les températures baissent, provoquant la condensation de l'humidité sous forme d'eau liquide.

Cette eau condensée est ensuite collectée et stockée pour une utilisation ultérieure, notamment pour la consommation humaine, l'irrigation ou d'autres besoins en eau.

❖ **Types de dispositifs :**

Les dispositifs solaires pour la condensation de l'eau atmosphérique peuvent prendre différentes formes. Certains utilisent des surfaces spécialement conçues pour maximiser la condensation, tandis que d'autres utilisent des matériaux absorbants pour capturer l'humidité.

Les tours de condensation solaire, par exemple, sont des structures qui attirent l'air chaud et humide vers le haut, où il se refroidit et se condense, puis l'eau est recueillie au bas de la tour.

Les générateurs d'eau atmosphérique sont un autre exemple de dispositif solaire pour la condensation de l'eau. Ils utilisent des matériaux absorbants qui captent l'humidité de l'air et la condensent en eau liquide.

❖ **Avantages et défis :**

Les avantages de ces dispositifs comprennent leur capacité à produire de l'eau potable sans nécessiter de sources d'eau traditionnelles et leur utilisation d'une ressource renouvelable, l'énergie solaire.

Cependant, ces dispositifs peuvent être limités par des facteurs tels que l'efficacité énergétique, la disponibilité de l'ensoleillement et les coûts initiaux de mise en place. De plus, ils ne sont souvent pas aussi efficaces dans les climats très froids ou très secs où l'humidité atmosphérique est faible. [57]

4.7.3. Applications d'utilisation et scénarios probables

L'AWG a des utilisations et des applications distinctes dans des lieux, des circonstances et des besoins immédiats spécifiques. Il peut être considéré comme un atout logistique en raison de la nature de sa mobilité et de sa durabilité. Sa fiabilité, due au fait qu'il n'a besoin que de deux facteurs pour produire de l'eau potable - air et électricité - en fait un investissement rentable.

Les restaurants, les bars et les hôtels qui ont besoin de grandes quantités d'eau propre et de glace trouveront l'essentiel de l'AWG dans la cuisine ou le hall d'entrée. Les environnements de bureau utilisant des unités d'eau en bouteille peuvent se débarrasser des plastiques lorsqu'ils sont remplacés par AWG. AWG peut être envisagé dans des endroits éloignés, des stations balnéaires insulaires, des sites miniers et des cas où le détartrage de l'eau pose un problème.

En cas de catastrophes naturelles et d'épidémies, la disponibilité de groupes de travail spéciaux peut permettre de sauver des vies et d'améliorer les conditions sanitaires. Les organisations de gestion des catastrophes considèrent l'eau potable comme une priorité absolue pour rester en bonne santé; la portabilité et la fiabilité des travaux des groupes de travail lors de la production d'eau potable pure se révéleront être une intervention technologique essentielle pour préserver la vie et la santé.

4.7.4. Avantages et bénéfices de l'AWG

L'eau provenant de l'air est une solution d'approvisionnement en eau respectueuse de l'environnement, durable et responsable dans les régions tropicales où la teneur en humidité de l'air ambiant est élevée.

Les machines AWG peuvent être placées pratiquement n'importe où, ouvrant la porte à un développement terrestre autrement impossible. Les sites qui bénéficieraient grandement de ces machines sont des sites sous-développés où l'infrastructure d'approvisionnement en eau n'a pas encore été stabilisée. Les écoles, les hôpitaux, les lieux de culte, la police et les casernes de pompiers devraient tirer le meilleur parti du déploiement de telles machines.

Les applications peuvent également inclure des développements résidentiels plus importants - à un coût - ainsi que l'irrigation en serre et l'utilisation industrielle légère. Certains modèles sont évolutifs tandis que d'autres ne le sont pas. Le volume d'eau pure généré peut même atteindre quelques milliers de litres d'eau par jour.

Un système AWG typique présente des avantages distincts:

- Très portable, économique et facile à entretenir
- Aucun investissement coûteux en infrastructure de tuyauterie n'est nécessaire
- Déploiement rapide et flexible
- Aucune source d'eau conventionnelle requise
- Ne nécessite que de brancher sur une prise électrique pour générer de l'eau pure et fraîche

- Pratique, fiable et sûr
- Vous donne un contrôle total sur vos besoins en eau

4.7.5. Comparer AWG avec le dessalement

L'eau produite par AWG est plus pure que certains autres systèmes de traitement de l'eau. En raison des méthodes de filtration rigoureuses employées, quelques modèles AWG génèrent de l'eau sans pratiquement aucun minéral inorganique (sodium, chlorure, etc.), impuretés et contaminants. L'eau de «rosée» est propre, naturelle et exempte de produits chimiques.

Le dessalement est largement utilisé dans le monde, en particulier dans les pays arides, les navires et les petites îles.

Le Moyen-Orient est toujours le plus grand utilisateur d'usines de dessalement. L'utilisation est de plus en plus répandue en Europe dans des pays comme l'Espagne et en Amérique du Nord, avec des installations d'une capacité supérieure à 100 Ml / j d'eau par jour dans les Caraïbes.

Le processus de dessalement est traditionnellement coûteux et à forte consommation d'énergie, avec des opérations de maintenance et d'exploitation élevées. Dans les cycles typiques de production et de distribution d'eau de toute installation de traitement de l'eau, d'importantes quantités d'énergie sont nécessaires pour extraire, pomper, transporter, traiter et distribuer de l'eau à tous les utilisateurs. On estime que 2 à 3% de la consommation mondiale d'énergie est utilisée pour pomper et traiter l'eau des citadins et de l'industrie.

Le dessalement produit également des flux concentrés de déchets de saumure, qui doivent être éliminés de manière responsable. Pour ces raisons, il s'agit généralement d'une dernière ressource, mise en œuvre lorsque toutes les autres ont échoué. Les options de dessalement les plus pratiques et les plus attrayantes sont pour l'eau qui ne contient pas beaucoup de sel, c'est-à-dire l'eau saumâtre ou l'eau recyclée. Néanmoins, la qualité de l'eau peut être inférieure à ce que l'on espérait.

Le volume élevé des rejets de saumure, qui peuvent également contenir des polluants toxiques, est menacé pour la vie marine, principalement en raison du contact avec des matériaux métalliques utilisés dans la construction des installations. Selon l'étude, les impacts environnementaux pourraient inclure une turbidité accrue, une réduction de la teneur en oxygène et une densité accrue des eaux usées rejetées.

Les coûts associés au dessalement comprennent la construction initiale, du matériel et des équipements sophistiqués, la maintenance et les opérations - elles peuvent aller de plusieurs centaines de milliers de dollars à des millions de dollars. Comme les usines de dessalement ont une durée de vie plus courte que celle des usines de traitement d'eau traditionnelles, le coût en capital doit être amorti sur une période plus courte, ce qui se traduit par une réduction des coûts.

4.7.6. Régler les problèmes d'eau en bouteille

Dans de nombreuses régions du monde, l'eau en bouteille est considérée comme une nécessité en raison de la production d'eau insalubre produite localement. Cela a été un facteur clé des ventes d'eau en bouteille dans les marchés émergents.

Partout dans le monde, les consommateurs ont dépensé 50 milliards de dollars cette année pour acheter de l'eau embouteillée. Les ventes mondiales d'eau embouteillée pourraient atteindre 160 milliards de litres par an et la consommation augmenter de 7% à 10% par an.

Les Européens de l'Ouest restent les plus gros consommateurs d'eau en bouteille, absorbant un peu plus du quart de la production mondiale. Sur certains marchés émergents tels que l'Inde, la consommation d'eau a triplé et a plus que doublé en Chine au cours des cinq dernières années. En fait, il est probable que le taux de croissance s'accélérera au cours des prochaines années, voire au-delà de 2010, et que l'Asie-Pacifique deviendra le plus grand marché régional au monde pour l'eau conditionnée.

Environ 12% des bouteilles en plastique «sur mesure», une catégorie dominée par l'eau, ont été recyclées en 2003, selon le consultant du secteur, R.W. Beck, Inc. Ce sont 40 millions de bouteilles (États-Unis) par jour qui sont jetées à la poubelle. En revanche, le taux de recyclage des bouteilles de boisson gazeuse en plastique est d'environ 30%. Des millions de tonnes de gaz à effet de serre sont générées lors de la fabrication et du transport de bouteilles en plastique. Les plastiques doivent être recyclés de manière à consommer moins de pétrole, un produit fini.

L'utilisation de AWG dans les secteurs du commerce, du tourisme, de l'hôtellerie et de la restauration où la majeure partie de l'eau en bouteille est consommée réduira l'offre de bouteilles en plastique étouffantes.

4.8. Cas pratiques et développements récents

Un exemple pratique notable est la machine développée par la société Home Atmospheric Water dans le Var, en France. Cette machine utilise la condensation de l'air ambiant pour produire jusqu'à 1000 litres d'eau par jour. Ce système est actuellement utilisé pour l'arrosage des espaces verts et le nettoyage urbain. En outre, une usine d'embouteillage d'eau atmosphérique, la première du genre au monde, est prévue pour ouvrir dans cette région, démontrant ainsi le potentiel de cette technologie à grande échelle. Cette initiative souligne non seulement la faisabilité technique de la récupération de l'eau atmosphérique, mais également son potentiel commercial et environnemental.

La machine de Home Atmospheric Water est un exemple emblématique des progrès réalisés dans ce domaine, illustrant comment la technologie peut être appliquée de manière pratique et rentable. Les projets comme celui-ci montrent que la récupération de l'eau atmosphérique peut non seulement répondre aux besoins locaux en eau, mais aussi contribuer à des solutions

globales pour les pénuries d'eau. En établissant des usines d'embouteillage et en intégrant ces systèmes dans les infrastructures urbaines, il est possible de créer des sources d'eau durable qui bénéficient à la fois aux communautés locales et à l'environnement. [59].

Des techniques plus modernes peuvent être envisagées. Un récupérateur d'eau atmosphérique ou un générateur d'eau atmosphérique (AWG) est un appareil alimenté à l'électricité qui utilise le principe de déshumidification pour transformer l'eau de boisson en humidité de l'air. Avec une quantité d'eau renouvelable dans l'atmosphère de la planète estimée à environ 12 504 kilomètres cube, il existe certainement une source illimitée d'eau à exploiter.

AWG peut être utilisé pratiquement n'importe où si de l'eau potable est nécessaire, mais il convient surtout dans les endroits très humides. L'endroit idéal pour cela est la bande autour de l'équateur (40 ° de latitude nord à 40 ° de latitude sud). Il se trouve également que la plupart des gens se trouvent dans le monde. Fait intéressant, c'est dans cette bande que la plupart des problèmes de pénurie d'eau ont été identifiés.

Les appareils AWG sont conçus pour générer de l'eau à des températures relativement modérées mais à une humidité relative élevée. Ils ont tendance à produire plus d'eau dans les endroits où la température est élevée et le climat humide, et moins d'eau dans les régions plus froides ou sèches.

Absolument aucune source d'eau conventionnelle ou secondaire n'est nécessaire dans un AWG. La seule ressource dont AWG a besoin pour fonctionner est l'air avec son humidité emprisonnée, car le processus imite la formation de la pluie. L'électricité alimente l'appareil, qui peut être obtenu à partir du réseau électrique principal ou de sources d'énergie propres telles que panneaux solaires, éoliennes, convertisseur d'ondes, etc.

Cette technologie est un système décentralisé de collecte d'eau atmosphérique qui n'était pas considérée auparavant comme une source d'eau potable pour les masses. Il est durable, fiable et produit de l'eau potable sans installation massive et complexe.

4.9. Applications et Avantages

❖ Régions Arides

Les AWG peuvent fournir une source d'eau potable fiable dans des régions arides où l'accès à l'eau douce est limité. Par exemple, dans le Moyen-Orient et certaines parties de l'Afrique, ces systèmes peuvent significativement améliorer la disponibilité de l'eau, réduisant la dépendance aux sources traditionnelles comme les nappes phréatiques et les rivières. Ces régions, souvent confrontées à des défis liés à la gestion de l'eau et aux changements climatiques, peuvent bénéficier grandement de la mise en œuvre de cette technologie.

Les AWG sont particulièrement utiles dans des contextes où les infrastructures d'approvisionnement en eau sont insuffisantes ou inexistantes. En fournissant une source d'eau localisée et renouvelable, ces systèmes peuvent aider à stabiliser l'approvisionnement en eau et à améliorer les conditions d'utilisation dans les Régions Arides

Les générateurs d'eau atmosphérique (AWG) offrent une source d'eau potable fiable dans les régions arides où l'accès à l'eau douce est limité. Par exemple, dans le Moyen-Orient et certaines parties de l'Afrique, ces systèmes peuvent améliorer significativement la disponibilité de l'eau, réduisant la dépendance aux sources traditionnelles comme les nappes phréatiques et les rivières. Ces régions, souvent confrontées à des défis liés à la gestion de l'eau et aux changements climatiques, peuvent bénéficier grandement de la mise en œuvre de cette technologie.

Les AWG sont particulièrement utiles dans des contextes où les infrastructures d'approvisionnement en eau sont insuffisantes ou inexistantes. En fournissant une source d'eau localisée et renouvelable, ces systèmes peuvent aider à stabiliser l'approvisionnement en eau et à améliorer les conditions de vie des populations locales. Par exemple, dans les zones rurales isolées, les AWG peuvent être installés pour fournir de l'eau potable directement aux communautés, réduisant ainsi le besoin de transporter l'eau sur de longues distances et diminuant les risques sanitaires associés à l'utilisation de sources d'eau non sécurisées. [60]



Figure 4.3 : une région Aride [58]

❖ Applications en Milieu Urbain

En milieu urbain, les AWG peuvent être intégrés dans les bâtiments pour fournir une source d'eau indépendante, réduisant ainsi la pression sur les infrastructures municipales et contribuant à une gestion plus durable de l'eau. Par exemple, dans les grandes villes confrontées à des pénuries d'eau périodiques, ces systèmes peuvent être utilisés pour compléter l'approvisionnement en eau, assurant une disponibilité continue pour les besoins domestiques et industriels. Les bâtiments verts et les projets de construction durable commencent à intégrer les AWG comme une composante clé de leurs stratégies de gestion de l'eau.

En outre, les AWG peuvent être utilisés pour des applications spécifiques telles que l'arrosage des espaces verts, la climatisation et les systèmes de refroidissement, réduisant ainsi la consommation d'eau potable pour ces usages. Cela permet de conserver les ressources en eau douce pour des besoins essentiels, tout en assurant le maintien de l'habitabilité et de l'attractivité des environnements urbains. En intégrant des technologies de récupération d'eau

atmosphérique, les villes peuvent progresser vers des modèles plus résilients et durables de gestion des ressources hydriques. [55]

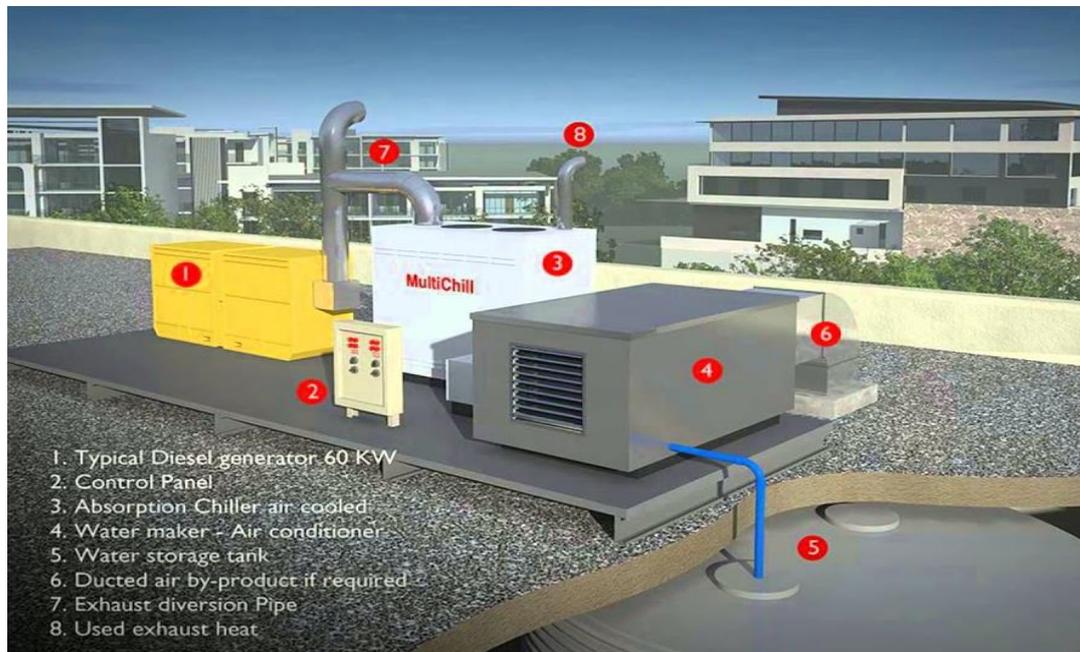


Figure 4.4 : AWG en milieu urbain [55]

❖ Situations d'urgence et zones de conflit

Dans les situations d'urgence, telles que les catastrophes naturelles ou les conflits, les AWG peuvent fournir une source d'eau potable rapidement déployable, aidant ainsi à prévenir les crises humanitaires. Par exemple, après un tremblement de terre ou une inondation, les infrastructures traditionnelles d'approvisionnement en eau peuvent être détruites ou contaminées, rendant l'accès à l'eau potable difficile. Les AWG peuvent être transportés et installés sur le terrain pour fournir immédiatement de l'eau potable, aidant ainsi à sauver des vies et à prévenir les maladies hydriques.

Dans les zones de conflit, où les infrastructures sont souvent ciblées et détruites, les AWG peuvent offrir une source d'eau sûre et indépendante. En réduisant la dépendance à des infrastructures vulnérables, ces systèmes peuvent aider à stabiliser l'approvisionnement en eau et à soutenir les efforts de reconstruction et de réhabilitation. En outre, en fournissant de l'eau potable directement sur le terrain, les AWG peuvent réduire la nécessité de transporter l'eau sur de longues distances dans des zones dangereuses, diminuant ainsi les risques pour les travailleurs humanitaires et les populations locales. [61]

4.10. Défis et Perspectives Futures

❖ Coût et Accessibilité

Malgré leurs avantages, les AWG présentent encore des défis, notamment en termes de coût et d'accessibilité. Les systèmes actuels peuvent être coûteux à installer et à entretenir, ce qui limite leur adoption dans les régions à faible revenu. De plus, l'efficacité de ces systèmes peut varier en fonction des conditions climatiques, ce qui nécessite des ajustements et des innovations technologiques pour garantir une production d'eau constante et fiable. Les recherches en cours visent à développer des matériaux et des méthodes plus efficaces pour capter et condenser l'humidité, réduisant ainsi les coûts et augmentant l'efficacité énergétique.

Pour rendre ces technologies plus accessibles, il est crucial de continuer à investir dans la recherche et le développement, en explorant de nouvelles solutions pour améliorer la performance et réduire les coûts. Les partenariats entre le secteur privé, les gouvernements et les organisations non gouvernementales peuvent jouer un rôle clé dans la promotion et le déploiement de ces technologies à grande échelle. En outre, l'intégration de sources d'énergie renouvelable, comme l'énergie solaire, peut contribuer à rendre les AWG plus durables et économiquement viables dans des contextes variés. [62]

❖ Innovations technologiques

Les progrès dans les matériaux et les méthodes de condensation continuent d'améliorer l'efficacité des AWG. Par exemple, les recherches sur les matériaux nanostructures et les surfaces superhydrophobes visent à maximiser la collecte de l'eau en augmentant la surface de contact et en améliorant la capture de l'humidité. Ces innovations pourraient permettre de développer des systèmes plus compacts et plus efficaces, adaptés à une variété de conditions environnementales. De plus, l'intégration de technologies intelligentes, telles que les capteurs et les systèmes de contrôle automatisés, peut optimiser le fonctionnement des AWG en ajustant les paramètres en temps réel pour maximiser la production d'eau.

Les développements futurs pourraient également inclure l'utilisation de nouvelles sources d'énergie, comme les batteries à haute densité et les dispositifs de stockage d'énergie, pour rendre les AWG plus autonomes et fiables. Par exemple, en combinant des technologies de condensation avancées avec des systèmes de stockage d'énergie renouvelable, il serait possible de créer des solutions d'approvisionnement en eau résilientes et durables, capables de fonctionner indépendamment des infrastructures traditionnelles. Ces innovations pourraient transformer les AWG en une technologie clé pour répondre aux défis mondiaux liés à l'eau, en particulier dans les contextes où l'accès à l'eau potable reste un enjeu majeur. [59]

4.10. Exemple d'un AWG local

Nous avons travaillé sur la création d'un Atmospheric Water Generator (AWG) en Algérie (précisément à Guelma). Notre objectif principal était d'apporter une solution novatrice aux défis persistants d'accès à l'eau potable dans certaines régions de l'Algérie. En concevant et en mettant en œuvre cet AWG, nous visons à fournir une source d'eau durable et accessible, exploitant l'humidité atmosphérique abondante de la région pour produire de l'eau potable de

haute qualité. En collaborant avec des partenaires locaux et en tirant parti des technologies de pointe, nous nous efforçons de répondre aux besoins essentiels en eau tout en contribuant au développement économique et social de la région.

4.10.1. Le nom

On a choisi le nom **AtmoDrink** qui est soigneusement sélectionné pour captiver l'attention et susciter la curiosité, tout en étant en harmonie avec le secteur d'activité de l'entreprise et en mettant en avant les initiales "AWG". Il est inspiré par des mots ou des concepts liés à cette technologie, créant ainsi une identité forte et mémorable.

4.10.2. Le logo

Notre logo pour une machine AWG nommée "AtmoDrink" transmet les caractéristiques suivantes :

❖ **Nature environnementale et durable**

Le logo évoque la durabilité et l'impact positif sur l'environnement, en mettant en avant l'idée de produire de l'eau à partir de l'air, une ressource renouvelable.

❖ **Modernité et technologie avancée**

Il reflète l'innovation et la technologie de pointe utilisées dans la conception de l'AWG, avec des éléments graphiques qui évoquent la sophistication et la modernité.

❖ **Accessibilité et simplicité**

Le logo est facile à comprendre et à mémoriser, avec une conception simple et des symboles clairs qui représentent l'idée de fournir de l'eau potable à partir de l'air ambiant.

❖ **Confiance et fiabilité**

Il inspire confiance et fiabilité, en utilisant des couleurs et des formes qui évoquent la sécurité et la qualité de l'eau produite par la machine AtmoDrink.

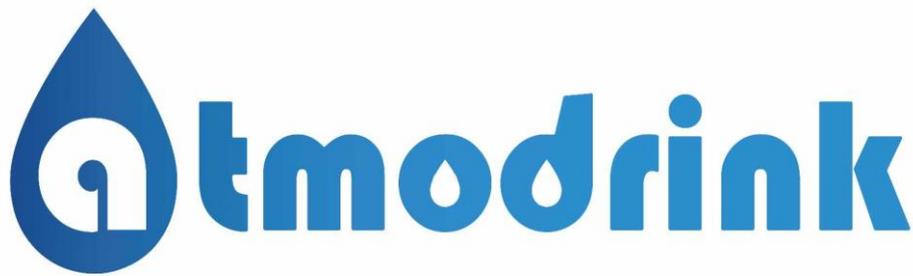


Figure 4.5 : Logo AtmoDrink

4.10.3 Description

AtmoDrink est un générateur d'eau atmosphérique innovant conçu pour produire de l'eau potable à partir de l'humidité de l'air ambiant. Avec une technologie avancée de condensation et de filtration, AtmoDrink offre une solution durable et autonome pour répondre aux besoins en eau potable dans divers environnements.

Ce petit générateur d'eau atmosphérique est largement utilisé pour la maison, le bureau. Il donne la sécurité et de l'eau potable pure.

Sa technologie extrait la vapeur d'eau distillée et la convertit en eau potable cristalline. L'air est aspiré à travers un filtre à air anti-bactérien à double couche et ionisé avant d'être «capturé» dans de l'eau pure. L'eau collectée est ensuite scientifiquement purifiée par filtration avant et après le charbon, par filtration à membrane nanométrique sans produits chimiques et par stérilisation aux rayons ultraviolets pour éliminer les substances organiques nocives.

4.10.4. Caractéristiques techniques

❖ Capacité de production

AtmoDrink sera disponible dans plusieurs modèles avec des capacités de production variant de 30 à 500 litres par jour, adaptées à différentes échelles d'utilisation, des ménages aux installations commerciales.

❖ Efficacité énergétique

Grâce à son système de récupération d'énergie et à son utilisation de technologies de pointe, AtmoDrink garantit une efficacité énergétique optimale, réduisant ainsi la consommation électrique.

❖ **Technologie de condensation avancée**

Le générateur utilise un processus de condensation avancé pour extraire l'humidité de l'air et la convertir en eau liquide propre et potable, même dans des environnements à faible humidité.

❖ **Filtration intégrée**

AtmoDrink est équipé d'un système de filtration multi-étapes qui élimine les impuretés, les contaminants et les particules de l'eau produite, garantissant ainsi une qualité d'eau optimale conforme aux normes sanitaires.

❖ **Conception modulaire**

La conception modulaire d'AtmoDrink permet une installation facile et une maintenance pratique, avec la possibilité d'ajouter des modules supplémentaires pour augmenter la capacité de production selon les besoins.

❖ **Contrôle intelligent**

Doté d'un système de contrôle intelligent, AtmoDrink surveille en temps réel les conditions environnementales et ajuste automatiquement ses paramètres de fonctionnement pour une performance optimale et une conservation énergétique.

❖ **Matériaux durables**

Construit avec des matériaux de haute qualité et durables, AtmoDrink est conçu pour résister aux conditions environnementales difficiles et offrir une durabilité à long terme.

4.10.5. Applications

- Résidences privées
- Écoles et institutions éducatives
- Bureaux et espaces de travail
- Installations médicales et de santé
- Camps de réfugiés et situations d'urgence



Figure 4.6 : Affiche publicitaire pour la machine AtmoDrink

4.11. Conclusion

La récupération de l'eau atmosphérique par condensation émerge comme une solution révolutionnaire et durable pour répondre aux défis critiques de l'eau à l'échelle mondiale. Grâce à des progrès technologiques incessants et à une gestion avisée des enjeux environnementaux et économiques, ces systèmes ont le pouvoir de devenir une source inestimable d'eau potable à travers le monde. Leur adoption généralisée pourrait véritablement métamorphoser la manière dont nous gérons les ressources en eau, offrant un nouvel espoir aux régions confrontées à la rareté de l'eau. En renforçant la résilience des communautés face aux impacts des changements climatiques et aux crises de l'eau, la récupération de l'eau atmosphérique par condensation promet un avenir plus sûr et plus durable pour notre planète et ses habitants.

Conclusion générale

Conclusion générale

La technologie de récupération des eaux atmosphériques est un sujet fascinant et en constante évolution. Elle représente une solution innovante et prometteuse pour pallier le manque d'accès à l'eau potable dans de nombreuses régions du globe. Elle fait référence à la collecte et à l'utilisation des eaux de pluie, de brouillard et de rosée pour répondre aux besoins en eau potable, agricole et industrielle. Cette approche durable permet de réduire la pression exercée sur les ressources en eau douce et souterraine, tout en offrant une solution alternative aux régions confrontées à des pénuries d'eau. En exploitant une source renouvelable et largement disponible que constitue l'humidité atmosphérique, ces systèmes permettent de s'affranchir des contraintes liées aux ressources en eau conventionnelles.

La technologie de récupération des eaux atmosphériques est un domaine très prometteur, notamment dans le contexte actuel de changement climatique et de pression sur les ressources en eau.

Il existe plusieurs technologies de récupération des eaux atmosphériques, telles que les générateurs d'eau atmosphérique qui condensent la vapeur d'eau présente dans l'air, les systèmes de collecte des eaux de pluie, et les filets de brouillard qui capturent l'eau à partir de la brume.

Au terme de cette étude, il apparaît clairement que la technologie de REA recèle un potentiel considérable pour contribuer à la sécurité hydrique, en particulier dans les zones arides et semi-arides où les précipitations sont rares et irrégulières. Leur impact environnemental réduit, leur caractère décentralisé et leur capacité à s'adapter à différents contextes géographiques en font des solutions hautement pertinentes dans une perspective de développement durable.

Cependant, malgré leurs atouts indéniables, les défis à relever pour une mise en œuvre généralisée des techniques de récupération des eaux atmosphériques restent nombreux. Les limitations techniques inhérentes à ces technologies, comme leur dépendance aux conditions météorologiques locales, doivent être surmontées pour garantir leur efficacité et leur fiabilité en toutes circonstances. Les coûts d'investissement et d'exploitation représentent également un frein majeur qu'il conviendra d'abaisser par des innovations technologiques et des économies d'échelle.

Par ailleurs, au-delà des enjeux purement techniques, les dimensions économiques, environnementales et sociétales liées au déploiement de ces techniques devront être soigneusement évaluées et anticipées. Un cadre réglementaire et des politiques publiques favorables seront indispensables pour stimuler leur adoption à large échelle. La sensibilisation et l'implication des populations locales seront également cruciales pour assurer l'acceptabilité sociale et la durabilité de ces nouvelles solutions d'approvisionnement en eau.

En définitive, bien que les TREA ne représentent pas une panacée universelle, elles constituent une pièce essentielle du puzzle pour relever les défis liés au stress hydrique mondial. Combinées à d'autres approches complémentaires de gestion durable des ressources en eau, ces technologies peuvent contribuer de manière significative à garantir un accès équitable à l'eau pour tous.

Des efforts de recherche et développement soutenus, mobilisant l'ensemble des acteurs concernés, seront nécessaires pour surmonter les obstacles actuels et libérer tout le potentiel des TREA. Nul doute que cette voie mérite d'être explorée activement, tant les enjeux liés à la sécurité hydrique sont cruciaux pour l'avenir de l'humanité et de la planète.

Pour surmonter les défis rencontrés dans cette technologie il faut :

- Poursuivre le développement de technologies de TREA plus efficaces, moins coûteuses et durables.
- Explorer des modèles économiques innovants pour rendre les TREA plus accessibles aux communautés défavorisées.
- Promouvoir les avantages et les applications des TREA auprès des décideurs politiques et du grand public.
- Mener des recherches approfondies pour mieux comprendre les impacts environnementaux et optimiser l'efficacité des TREA.

Bibliographies

Bibliographies

- [1] « Estimation et comparaison de l'évapotranspiration de référence les différents » (2017). Mémoire de Master en Aménagement Ouvrages Hydraulique présenté par MESSAOUDI Wafa et HAMMAMI Mounira -université Badji Mokhtar Annaba-
- [2] « Mobilisation des ressources en eau en Algérie : stratégies et perspectives » - Article publié en 2020 dans la revue Territoires d'Afrique par Abdesslam Zahri.
- [3] « Les ressources en eau en Algérie : stratégies, enjeux et vision » - Article publié en 2017 dans la revue Larhyss Journal par M. Maihi et al.
- [4] « L'eau et Nous Revue Science et Vie ». HARROIS MONIN F. 1977, Hors-série, Décembre, pp 108-1180
- [5] "The United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater - Making the Invisible Visible" – UNESCO
- [6] AGENCE NATIONAL DES RESSOURCES HYDRAULIQUES 1996. Inventaire des études Hydrologique. Alger, 47 pages.
- [7] "The World's Water Volume 9" par Peter H. Gleick et al. (2022) - Rapport du Pacific Institute
- [8] CNES – l'eau en Algérie: le grand défi de demain, Rapport du conseil national économique et social; 15^{ième} session Mai 2000.
- [9] FAO (2015), « Calcul des ressources en eau renouvelables (RER) par pays. Algérie », Rome : AQUASTAT 2015.
- [10] Anonyme (2009), « Problématique du secteur de l'eau et impacts liés au climat en Algérie », PNUD, Algérie.
- [11] « La problématique de l'eau en Algérie du Nord » par Boualem Remini (2010) University of Blida 1 Algeria
- [12] « État des lieux du secteur de l'eau en Algérie », Mozas. M & Ghosn. A (2013), Paris : IPEMED, études et analyses, pp.01-27.
- [13] « L'eau en Algérie » par Boualem Remini (2023)
- [14] Bourara, K. et al. (2020). Water resources in the Algerian Sahara: Availability, quality and sustainability challenges. Journal of Hydrology: Regional Studies, 31.
- [15] Daoudi, L., & Fatemi, S. S. (2017). Érosion hydrique et érosion éolienne en Algérie. Étude nationale de la biodiversité.
- [16] DEMMAK.A.,1982. Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse du Dr-Ing, Univ de pierre et Marie Curie. Paris XI.

- [17] Lahouati, R., Lahouati, G., Ait Mouhoub, D., & Lahmar, R. (2015). Évaluation quantitative de l'érosion éolienne dans la région de Biskra (Algérie). *Études et Gestion des Sols*, 22(2), 109-125.
- [18] Bouguerra, H., Bouanani, A., Khiari, L., Vidal, L., Ruellan, A., & Daudin, D. (2019). L'érosion hydrique des sols en Algérie : causes, manifestations et lutte antiérosive. *Étude et Gestion des Sols*, 24(3), 185-195.
- [19] Remini, B., & Hallouche, W. (2018). L'envasement des barrages en Algérie: État des lieux et perspectives. *Larhyss Journal*, (33), 7-29.
- [20] Haraza, T. (2019). Envasement des barrages en Algérie: causes et conséquences. Mémoire de Master, Université de Bouira.
- [21] Bouchettra, A. (2006). L'évaporation des lacs de barrages en Algérie. *Sécheresse*, 17(1), 97-100.
- [22] Remini, B., & Kettab, A. (2014). L'envasement des barrages en Algérie : véritable catastrophe oubliée. *Larhyss Journal*, (19), 37-48.
- [23] Remini, B. (2005). La problématique des fuites dans les barrages en Algérie. *Larhyss Journal*, (4), 143-153.
- [24] Bouguerra, A., Remini, B., & Brahmi, R. (2009). Les fuites du barrage de Zardezas (Algérie) : Causes et traitement. *Revue des Sciences de l'Eau*, 22(3), 347-358.
- [25] Bouguerra, H., Benosmane, S., & Hadjseyd, A. (2017). Eutrophisation des retenues des barrages en Algérie : Ampleur et conséquences. *TSM*, 9, 34-47.
- [26] Ouahid, Y., & Oualkia, K. (2015). Eutrophisation du barrage d'Oued El Aneb (Algérie). *LARHYSS Journal*, 21, 129-146.
- [27] Mekkia, L., Benmansour, D., & Remini, B. (2019). Prolifération des algues dans les retenues algériennes : problèmes et solutions. *Synthèse*, 2, 84-95.
- [28] Étude de l'évolution de l'intrusion marine dans l'aquifère côtier de Nador (Tipaza, Algérie)
- [29] **Actu-Environnement:** <https://www.actu-environnement.com/eau/>
- [30] Postel, S.L. (1999). *Pillar of Sand: Can the irrigation Miracle last?* W.W.Norton and Company
- [31] IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge University Press.
- [32] World Bank. (2019). *Quality Unknown: the invisible water crisis*. The World Bank group.
- [33] UNESCO. (2012). *Managing Water under Uncertainty and risk*. United Nations World Water Development Report 4.

- [34] Gleick, P.H. (1993). Water and conflicts: Fresh Water Ressources and International security.
- [35] FAO. (2016). State of the World's Forests 2016. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [36] Kalogirou, S. A. (2005). Seawater desalination using renewable energy sources. Progress in energy and combustion science, 31(3), 242-281.
- [37] Wahlgren, R. V. (2001). Atmospheric water vapour processor designs for potable water production: a review. Water resources development, 17(1), 53-79.
- [38] Kogan, A., & Fridkin, V. (2019). Atmosphere Water Recovery. In Encyclopedia of Water (pp. 1-8). Wiley.
- [39] Khalil.A et ql (2019). « Technologies for atmophéric water generation ». Renewable and Sustainable Energy Reviews, 99, 398-421.DOI : 10.1016/j.rser.2018.10.033.
- [40] Clarke,R., et King, J. (2004). The Atlas of water. University of California Press.
- [41] UNEP. (2009). The environmental food crisis. United Nations Environment Programme.
- [42] WHO. (2019). Drinking Water Health Organization.
- [43] Schnoor, J.L.(2010). Water Sustainability in Changing World. Environmental Science and Technology.
- [44] Wichelns, D. (2002). The role of Virtual Water in Efforts to achieve food security and other national goals, with an example from Egypte. Agricultural water management.
- [45] Hamer, M Water (2008): the Epic Struggle for Wealth, Power, and Civilization. HarperCollins.
- [46] Atmosphéric Water Harvesting: Pathways to commercialization- lapotin, A, Kim H., Rao, S. R., Wang, E. N. (2020)
- [47] Utilization of Dew Water: Asolution for Water Scarcity-Sharan, G.,and Clus, O. (2012). Water resources Management.
- [48] For collection: State of the Art and future perspectives Klemm, H (2016)
- [49] Kleingled, M., and Olivier, J., (2001). "Atùosphéric water harvesting: concepts and systems". Desalination, 143(2), 183-189.
- [50] Clus, O., Ortega, P. Muselli, M., Milimouk, I., and Beysens, D. (2008). « Benefits of dew water in arid coastal areas (Namibia) ». Atmospheric Research, 87(3-4), 385-392.
- [51] Lee, D., Lee, S., Lee, J and Kim, S. (2003). "experimental investigation of a thermoelectric dehumidifier". International journal of refrigeration, 26 (3), 247-253.
- [52] **A. Ait Ichou et al. (2019). « Récupération des eaux atmosphériques par adsorption sur membrane : une revue »**

- [53] O. Issoufou et al. (2018). **"Etude de la faisabilité de la récolte de rosée pour l'approvisionnement en eau potable dans les zones arides : cas du Niger"**.
- [54] Khalil, A. (2021). Water harvesting from air: an all-inclusive review. *Sustainability Science*, 16(3), 955-986.
- [55] Zaragoza, G., Ruiz-Aguirre, A., & Guillen-Burrieza, E. (2022). Fundamentals of atmospheric moisture condensation processes. *Environmental Research Letters*, 17(8), 083001.
- [56] Bagheri, F. (2018). Passive atmospheric water harvesting systems: Advances and challenges. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 22, 1-7.
- [57] Kumari, J., & Samanta, A. (2021). Surface design strategies for enhancing atmospheric water harvesting. *Chemical Engineering Science*, 240, 116710.
- [58] Chen, Z., Liu, D., & Wei, J. (2022). Nanoengineered surfaces for atmospheric water harvesting. *Nano Research*, 15(1), 11-29.
- [59] Loveless, K. J., Ghoreishi, D., & Koza, D. F. (2023). Modeling and optimization of atmospheric water harvesting systems. *Environmental Science: Atmospheres*, 3, 29-48.
- [60] Sharan, G. (2021). Air to water harvesting systems: A review. *Journal of Cleaner Production*, 316, 128272.
- [61] Miljkovic, N., & Wang, E. N. (2013). Condensation heat transfer on superhydrophobic surfaces. *MRS Bulletin*, 38(5), 397-406.
- [62] Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Thermodynamique : Une approche pragmatique* (8e éd.). Chenelière Éducation.
- [63] Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change* (3e éd.). John Wiley & Sons.
- [64] Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (7e éd.). John Wiley & Sons.
- [65] Rose, J. W. (2002). Condensation. Dans W. M. Haynes (Éd.), *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (83e éd., p. 6-1 à 6-21). CRC Press.