



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE**  
**ET POPULAIRE**



**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de**  
**la Recherche Scientifique**

**Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –**

**Faculté des sciences**

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

**En : Physique**

**Spécialité : *Physique énergétique et énergie renouvelable***

**Par : Elhabiri Chahrazed**

**Sujet**

**Etude technico-économique d'un système de production d'eau potable à partir de l'humidité de l'air et de l'énergie solaire dans le désert Algérien dans des zones pauvres en ressources hydriques.**

Soutenu publiquement, le 26/06/2018, devant le jury composé de :

<b>Pr Chabane-Sari Nasreddine</b>	<b>Professeur</b>	<b>Univ. A.B de Tlemcen</b>	<b>Président</b>
<b>Dr Amara Sofiane</b>	<b>MCA</b>	<b>Univ. A.B de Tlemcen</b>	<b>Examineur</b>
<b>Dr Baghdadli Tewfik</b>	<b>MCA</b>	<b>Univ. A.B de Tlemcen</b>	<b>Examineur</b>
<b>Dr Benyoucef Abdellah</b>	<b>MCB</b>	<b>Univ. A.B de Tlemcen</b>	<b>Encadreur</b>

# DÉDICACES

*A mes chers parents qui ont toujours veillé sur moi,*

*A mes frères Sid Ahmed, Aziz et Aymen,*

*A tous mes chers amis,*

*A tous ceux qui me sont chers*

*A ceux qui m'ont tout donné sans rien en retour.*

## REMERCIEMENTS

**Ce** travail a été réalisé au sein de l'unité de recherche matériaux et énergies renouvelables «U.R.M.E.R» de l'Université Abou Bekr BELKAID de Tlemcen, sous la direction de monsieur **Benyoucef Abdellah**, MCB à l'Université de Tlemcen, qui a accordé une très grande importance à ce travail et la confiance qu'il m'a constamment témoigné ont été pour moi très motivantes. Je lui adresse ma gratitude pour l'attention, les conseils, les encouragements, la patience, la gentillesse pendant mes travaux.

**J'**adresse mes sincères remerciements à **Mr Chabane-Sari Nasreddine** Professeur à l'Université de Tlemcen qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider ce jury.

**Mes** remerciements s'adressent également à **Mr Amara Sofiane, MCA** à l'Université de Tlemcen, **Mr Baghdadli Tewfik, MCA** à l'Université de Tlemcen, pour l'intérêt qu'ils ont octroyé à ce travail en acceptant de le juger et pour avoir honoré de leur présence le jury de ce mémoire.

**Un** grand merci à tous mes **collègues**, pour leur encouragement et leur sympathie et les moments passés ensemble. Qu'ils trouvent ici l'expression de mes remerciements les plus distingués.

**Enfin**, je ne saurai quoi dire pour remercier ceux qui ont été l'origine de tout :  
**ma Mère, mon père et mon frère.**

*Merci*

# **SOMMAIRE**

# SOMMAIRE

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I</b>	<b>Eau potable à partir de l'humidité de l'air</b>
<b>I.1. Introduction</b>	<b>3</b>
<b>I.2. Qu'est-ce qu'une eau potable ?</b>	<b>3</b>
<b>I.3. Les risques sanitaires liés à l'eau</b>	<b>3</b>
<b>I.4. Les types d'eaux destinées à la consommation</b>	<b>4</b>
<b>I.5. Humidité relative ou degré hygrométrique</b>	<b>5</b>
<b>I.6. Les différentes techniques de mesure de l'Humidité</b>	<b>5</b>
<b>I.6. Les différentes techniques de production d'eau douce à partir de l'humidité de l'air</b>	<b>5</b>
<b>I.7.1. Faire de l'eau avec du vent (WMS de Eole Water®)</b>	<b>5</b>
<b>I.7.2. Le générateur qui produit l'eau potable pour l'armée</b>	<b>6</b>
<b>I.7.3. Production d'eau à partir de l'air (Atmosphere water generator) (AWG)</b>	<b>7</b>
<b>I.7.3.1. Mode de fonctionnement</b>	<b>8</b>
<b>I.7.3.2. Usages et avantages</b>	<b>8</b>
<b>I.7.4. Le panneau solaire qui produit de l'eau potable</b>	<b>9</b>
<b>I.7.5. La bouteille qui produit de l'eau potable</b>	<b>9</b>
<b>I.7.6. Produire de l'eau à partir de l'humidité et l'énergie solaire</b>	<b>10</b>
<b>I.8. Conclusion</b>	<b>11</b>
<b>Références</b>	<b>12</b>
<b>Chapitre II</b>	<b>La technologie Zero Mass Water</b>
<b>II.1. Introduction</b>	<b>14</b>
<b>II.2. Définition de la matière hygroscopique</b>	<b>15</b>
<b>II.3. Historique des matériaux de type MOF</b>	<b>15</b>
<b>II.4. Caractéristiques des MOFs</b>	<b>17</b>
<b>II.5. Synthèse des MOFs</b>	<b>18</b>
<b>II.6. Le MOF-801</b>	<b>19</b>
<b>II.7. Principe de fonctionnement</b>	<b>21</b>
<b>II.8. La recette pour préparer le MOF-801</b>	<b>22</b>
<b>II.9. La modélisation théorique</b>	<b>24</b>
<b>II.10. Conclusion</b>	<b>27</b>
<b>Références</b>	<b>28</b>
<b>Chapitre III</b>	<b>Ressources hydriques en Algérie</b>
<b>III.1. Introduction</b>	<b>31</b>
<b>III.2. Population</b>	<b>31</b>
<b>III.3. Le climat</b>	<b>32</b>
<b>III.4. Ressources hydriques en Algérie</b>	<b>33</b>
<b>III.4.1. L'eau en Algérie du nord</b>	<b>33</b>
<b>III.4.1.1 Les eaux superficielles en Algérie du nord</b>	<b>33</b>
<b>III.4.1.2. Eaux souterraines dans le Nord de l'Algérie</b>	<b>34</b>
<b>III.4.2. L'eau dans le Sud Algérien</b>	<b>35</b>
<b>III.4.2.1. Ressources superficielles dans la région hydrographique du Sahara</b>	<b>35</b>
<b>III.4.2.2. Les eaux souterraines dans le sud Algérien</b>	<b>36</b>
<b>III.4.3. Eaux non conventionnelles</b>	<b>38</b>

<b>III.4.3.1. Dessalement de l'eau de mer</b>	<b>38</b>
<b>III.4.3.2. Recyclage et réutilisation des eaux usées</b>	<b>39</b>
<b>III.4.4 Mega Projet de la ligne de transfert In Salah- Tamanraset</b>	<b>40</b>
<b>III.4.4.1. Impact</b>	<b>40</b>
<b>III.4.4.2. Description du système</b>	<b>40</b>
<b>III.5. Conclusion</b>	<b>41</b>
<b>Références</b>	<b>42</b>

**Chapitre IV Etude technico-économique de la production d'eau potable à partir de l'humidité de l'air et de l'énergie solaire pour la ville de Tindouf.**

<b>IV.1. Introduction</b>	<b>44</b>
<b>IV.2. Localisation géographique de Tindouf</b>	<b>44</b>
<b>IV.3. La démographie</b>	<b>45</b>
<b>IV.4. Le climat</b>	<b>45</b>
<b>IV.4.1. Température et précipitation annuelle mensuelles</b>	<b>45</b>
<b>IV.4.2. Humidité atmosphérique</b>	<b>47</b>
<b>IV.4.3. Le vent</b>	<b>48</b>
<b>IV.4.4 Indice d'aridité</b>	<b>49</b>
<b>IV.5. Les besoins en eau potable</b>	<b>50</b>
<b>IV.6. Dimensionnement de la technologie ZMW® et analyse économique</b>	<b>51</b>
<b>IV.7. Les maladies hydriques</b>	<b>54</b>
<b>IV.7.1. Les maladies aquatiques</b>	<b>54</b>
<b>IV.7.2. Les risques liés aux composés chimiques</b>	<b>55</b>
<b>IV.7.2.1. Le plomb</b>	<b>55</b>
<b>IV.7.2.2. Les nitrate</b>	<b>56</b>
<b>IV.8. Conclusion</b>	<b>56</b>
<b>Références</b>	<b>57</b>
<b>Conclusion générale</b>	<b>58</b>

**Liste des figures**

- Figure. I.1** Une éolienne WMS de Eole Water®.
- Figure. I.2** Le générateur AWG.
- Figure. I.3** La bouteille qui produit de l'eau potable.
- Figure. I.4** Le panneau Source® de la technologie Zero Mass Water.
- Figure. II.1** L'arracheuse d'eau.
- Figure. II.2** Structure type d'un réseau de MOF, les ligands organiques en bleu relient entre eux les ions métalliques ou cluster en vert (partie inorganique).
- Figure. II.3** Structure de la MOF-5.
- Figure. II.4** Isothermes d'absorption d'eau du MOF-801, mesurés à 25 ° et 65 ° C, à 20% HR.
- Figure. II.5** Isothermes d'adsorption d'eau des MOF à base de Zr (MOF-801, MOF-841, UiO66 et PIZOF-2) à 25 ° C.
- Figure. II.6** MOF-801. Les grandes boules jaunes, orange et vertes trois pores différents. Code de couleur: noir, C; rouge, O; polyèdres bleus, Zr.
- Figure. II.7** Système de collecte d'eau MOF.
- Figure. II.8** séchoir à point critique.
- Figure. II.9** images MEB de poudre MOF- 801. diamètre du cristal ~ 0.6 · m
- Figure. II.10** Expérimentalement caractérisé l'eau récoltée de plusieurs cycles de collecte de l'eau en utilisant MOF-801.
- Figure. III.1** Population algérienne entre 1950 et 2017.
- Figure. III.2** Répartition des ressources en eau dans l'Algérie du nord.
- Figure. III.3** Région hydrographique du Sahara.
- Figure. III.4** Limites hydrographiques des nappes Complexes Terminales (CT) et du Continental intercalaire (CI) dans la nappe Albienne.
- Figure. III.5** Coupe géologique du Sahara Septentrional
- Figure. III.6** Ligne de transfert d'eau d'In Salah à Tamanrasset totalisant 750 km.
- Figure. IV.2** Situation géographique de la wilaya de Tindouf.
- Figure. IV.2** l'augmentation géographique de la population de Tindouf.

- Figure. IV.3** Variation saisonnière des températures au site de Tindouf.
- Figure. IV.4** Les variations saisonnières de la précipitation et température moyennes mensuelles.
- Figure. IV.5** Variation de l'humidité relative moyenne mensuelle de l'air dans la région de Tindouf.
- Figure. IV.6** Variation mensuelle de la moyenne du vent pour le site de Tindouf.
- Figure. IV.7** La différence des frais d'eau pour une famille de 6 personnes.
- Figure. IV.8** La différence des frais d'eau pour une famille de 4 personnes.
- Figure. IV.9** La différence des frais pour une famille de 2 personnes.

### Liste des tableaux

- |                        |  |
|------------------------|--|
| <b>Tableaux. I.1</b>   | Différents paramètre microbiologiques et chimiques.                                  |
| <b>Tableaux. III.1</b> | Précipitations des quatre régions hydrographiques de l'Algérie du nord.              |
| <b>Tableaux. III.2</b> | Potentialité en eau superficielle du bassin du Sahara.                               |
| <b>Tableaux. III.3</b> | Barrage en exploitation (Bassin du Sahara).  |
| <b>Tableaux. III.4</b> | Nappes dans le sud algérien.   |
| <b>Tableaux. III.5</b> | Grandes stations de dessalement de l'eau de mer en Algérie réalisée entre 2003-2011. |
| <b>Tableaux. IV.1</b>  | Données climatique du site de Tindouf  |
| <b>Tableaux. IV.2</b>  | Les différents types de climat selon l'indice d'aridité de Demartone.                |
| <b>Tableaux. IV.3</b>  | Comparaison des frais pour différente famille.                                       |

# **INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

---

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ " وَجَعَلْنَا مِنَ الْمَاءِ كُلَّ شَيْءٍ حَيٍّ أَفَلَا يُؤْمِنُونَ "" (الأنبياء:30)

Allah dit dans le saint coran, « **Nous avons produit à partir de l'eau toute chose vivante** » sourate Al-Anbiya (21 :30). Apprivoiser les sources d'eau et les pérenniser, c'est toute l'histoire de l'humanité regardée sous l'angle le plus essentiel. En effet, l'eau c'est la vie, c'est l'agriculture, c'est la raison de la sédentarisation de l'homme dans des régions bien choisies du globe. Depuis toujours la règle fut pour chaque agglomération humaine sa source d'eau. Depuis un certain temps, les choses commencent à changer, il y a les barrages d'eau, le forage profond des nappes, le transfert de grandes quantités d'eau par canalisation, ensuite le dessalement de l'eau de mer, puis enfin et c'est tout récent, la production d'eau potable à partir de l'humidité de l'air.

Cette dernière technique peut passer inaperçu dans le flot des techniques de production et de stockage d'eau, de par sa quantité produite qui puisse paraître insuffisante vu l'engouement de plus en plus grand de l'humanité envers cette précieuse ressource, source de nouvelles tensions géopolitiques du nouveau millénaire. Mais en fait, elle a quelque chose d'assez particulier que toutes les autres techniques n'ont pas, elle est disponible n'importe où, n'importe quand, avec une pureté sans faille. C'est là son point fort, maintenant il faut juste voir si le projet d'extraction de l'eau potable à partir de l'humidité est un projet viable économiquement, à moyen et long terme.

Pour répondre à cette question, il faut d'abord définir de quelle technologie de production d'eau potable à partir de l'humidité on parle, car chacune a son coût et ses contraintes. Il y a des technologies qui fonctionnent à l'électricité, en récupérant l'eau de condensation d'une pompe à chaleur par exemple, mais ceci implique l'existence d'une source d'énergie disponible, donc d'agglomération humaine déjà préexistante, donc des sources d'eau présentes, ce qui rend le projet économiquement non-viable. Pour régler ce problème, certaines technologies utilisent des sources d'énergie renouvelables (solaires PV, éolienne) comme source d'électricité pour aboutir à la condensation, ce qui peut rendre le projet viable puisque décentralisé. Reste un dernier problème, l'humidité relative minimale requise pour le bon fonctionnement de ces technologies. La plupart fonctionnent bien avec des taux d'humidité minimum de 50%, ce qui veut dire qu'ils fonctionnent uniquement dans des endroits relativement humides, ce qui discrédite leur raison même d'exister, puisqu'une région humide a par nature assez de sources d'eau par pluviométrie. Heureusement que tout récemment (Avril 2017) une nouvelle technologie est apparue (Zero Mass Water®), exploitant un nouveau brevet

qui promet d'extraire de l'eau potable même dans les zones très secs et arides avec des taux d'humidité avoisinant les 20% grâce à l'énergie solaire et grâce à un matériau organo-métallique innovant : MOF-801. Ceci change complètement la donne, puisque justement c'est dans ces régions très sèches que le besoin en eau potable est le plus palpable, et où il faut user de moyens très onéreux pour acheminer l'eau dans ces régions. Par exemple, imaginons un endroit qui contient une denrée très rare (puit pétrole ou de gaz, mine d'or, ...) qui nécessite absolument une présence humaine continue pour son exploitation mais qui manque terriblement en eau et qui a un taux d'humidité très faible. Cette technologie est la solution économiquement viable pour résoudre ce genre de dilemmes.

Dans ce travail de mémoire nous nous proposons de faire une étude technico-économique de cette technologie ZMW® dans une région du Sud Algérien (Tindouf) choisie pour ses conditions de sécheresse très arides et son éloignement des grands projets hydrauliques du sud Algérien (Ligne de transfert In Salah-Tamanrasset).

Pour cela nous avons structuré notre mémoire en quatre chapitres. Le premier donnera un aperçu des différentes technologies de production d'eau à partir de l'humidité de l'air en donnant leurs caractéristiques les plus pertinentes. Le deuxième chapitre fera une focalisation sur la technologie Zero Mass Water® en expliquant en détail ses modes de fonctionnement en détaillant les principales phases de son fonctionnement (mode nocturne, mode solaire), et en analysant la structure MOF-801 et les raisons qui font de ce matériaux un concurrent sérieux aux autres technologies dans les conditions de faibles humidités, nous avons aussi donné les principales voies à suivre pour modéliser ce genre de dispositifs. Ensuite dans le troisième chapitre nous allons balayer toutes les ressources hydriques de l'Algérie en se focalisant sur les zones les moins desservies en eau et par la nature et par l'homme. Enfin, le quatrième et dernier chapitre, nous prenons cette zone ayant le moins de ressource hydrique (Tindouf) pour lui faire une étude technico-économique de cette technologie ZMW, et par là nous répondrons à la question de la viabilité économique de cette technologie à moyen et long terme en comparaison avec les couts des sources d'eau potables (comme les bouteilles d'eau minérale).

# **CHAPITRE I**

**Eau potable à partir de l'humidité  
de l'air**

## I.1. Introduction

Chaque jour, l'être humain a besoin de consommer l'eau pour que son organisme fonctionne correctement. Malheureusement, tout le monde n'a pas accès à l'eau potable au quotidien. Menacées par le changement climatique, par l'agriculture intensive ou les pollutions industrielles, l'état des ressources en eaux douces de la planète incite plutôt au pessimisme. D'autant plus que l'eau reste encore un bien rare pour un tiers de la population mondiale, soit 2,3 milliards d'individus qui n'ont pas accès à l'eau potable. En Afrique, 40% des habitants n'ont pas d'accès à l'eau potable. Un enfant meurt toutes les 21 secondes après avoir consommé une eau impropre à la consommation, et on lit souvent que le manque d'eau potable pourrait devenir la première cause de conflits armés au XXIème siècle. En réalité, une série d'innovations récentes laissent penser qu'il sera bientôt possible de produire de l'eau potable à volonté et parmi ces prouesses l'extraction de l'eau potable à partir de l'humidité de l'air en est le meilleur exemple. Dans ce chapitre nous allons présenter des généralités sur ces innovations.

## I.2. Qu'est-ce qu'une eau potable ?

L'eau n'est pas seulement un ensemble de molécules H<sub>2</sub>O (deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène). Elle contient en réalité naturellement une très grande variété de matières dissoutes, inertes ou vivantes : des gaz, des substances minérales ou organiques, des microorganismes (bactéries, virus, plancton), ainsi que des particules en suspension (fines particules d'argiles, limons et déchets végétaux).

En effet, l'eau est un excellent solvant qui se charge en composés solides ou gazeux tout au long de son cycle, suivant les milieux (rivières, zones humides, roches, atmosphère, etc.) dans lesquels elle circule ou séjourne :

- quand elle tombe en pluie, elle se charge des poussières atmosphériques,
- quand elle ruisselle sur les sols (lessivage),
- quand elle s'infiltré dans le sous-sol, elle se charge des produits d'altération des roches [1].

## I.3. Les risques sanitaires liés à l'eau

Parmi les principaux éléments toxiques pour les nourrissons et les femmes enceintes liés à l'eau, les nitrates en sont le meilleur exemple. Ces derniers, provoquent une mauvaise irrigation de l'oxygène vers les cellules lorsqu'ils sont transformés en nitrites. Leur rôle potentiellement cancérigène fait l'objet d'études épidémiologiques.

Les pesticides sont aussi les autres éléments potentiellement présents dans les différentes sources d'eau et qui sont suspectés dans les pathologies comme les troubles de la fertilité, neuro dégénératifs, mais aussi dans certains cancers [2] (leucémies, rein, cérébraux...).

Les perturbateurs endocriniens et les résidus de médicaments peuvent aussi se trouver dans les sources d'eau et sont suspecté poser des troubles.

Le fluor est un oligo-élément aux effets supposés bénéfiques (protection contre les caries), d'où son introduction dans les circuits d'eau urbains, mais des études ont montré qu'à forte dose il peut provoquer des fluoroses dentaires (tache sur l'émail et lésions). L'eau n'est qu'une des voies d'exposition aux nitrates pesticides, aluminium, radioactivité. Les résidus dans l'air ou dans les aliments de ces éléments constituent aussi des sources d'exposition [3].

Il est facile de constater que le mode d'extraction de l'eau à partir de l'humidité de l'air évite tous ces risques sanitaires, puisqu'on obtient une eau pure par condensation qui est ensuite minéralisée avec un dosage contrôlé.

#### I.4. Les types d'eaux destinées à la consommation

L'eau potable ou plus précisément « eau destinée à la consommation humaine » peut être désignée sous différentes appellations selon son origine ou son mode de distribution : eau potable, eau du réseau public, eau du robinet, eau distribuée, eau d'alimentation, eau de boisson, ... Les eaux fournis par un réseaux de distribution publique et les eaux en bouteille constituent les principales sources d'approvisionnement.

Cette catégorie d'eau concerne toutes les eaux qui, soit après traitement, soit en l'état, sont destinées à la boisson, à la préparation d'aliments, à la cuisson, ou à d'autres usages domestiques. Mais aussi elle peut concerner toutes les eaux utilisées dans les entreprises alimentaires, qui peuvent influencer sur la propreté de la denrée alimentaire finale, aussi bien la glace alimentaire [4]. Le tableau.I.1 récapitule quelque exemple des paramètres microbiologique et chimique :

**Tableau.I.1.** Différents paramètre microbiologiques et chimiques [5].

Paramètres	Limites de qualité	Unité
<b>Paramètres microbiologiques</b>		
<b>Escherichia Coli (E. Coli)</b>	0	/100ml
<b>Paramètres chimiques</b>		
<b>Fluorures</b>	1,5	mg/l
<b>Nitrates*</b>	50	mg/l
<b>Nitrites</b>	0,5	mg/l
<b>Pesticides (par substance)**</b>	0,1	µg/L
<b>Pesticides (total)</b>	0,5	µg/L
<b>Plomb</b>	10	µg/L

### **I.5. Humidité relative ou degré hygrométrique**

L'humidité relative de l'air, ou degré hygrométrique, qui s'exprime en pourcentage (%), représente le ratio entre la quantité de vapeur d'eau dans l'air et la capacité maximale que ce dernier peut en contenir à température et pression donnée. En effet, puisqu'une masse d'air ne peut contenir une quantité infinie de vapeur d'eau, en fonction des conditions de température et de pression, il existe un seuil de saturation au-delà duquel une partie de la vapeur d'eau retourne à l'état liquide. L'humidité relative de l'air a plusieurs conséquences météorologiques. En effet, une masse d'air se refroidit lorsqu'elle monte en altitude (chute de pression), de ce fait, son humidité relative augmente, puis atteint le seuil de saturation qui condense la vapeur en gouttelettes qui forment des précipitations. Aussi, la température extérieure ressentie peut être influencé par l'humidité de l'air, puisque qu'en interférant avec les processus de transpiration, des degrés hygrométriques faibles ou élevés vont accentuer réciproquement la sensation de froid ou de chaleur.

### **I.6. Les différentes techniques de mesure de l'Humidité**

- ✓ Mesure absolue du contenu en eau.
- ✓ Mesure de la température du point de rosée.
- ✓ Mesure de la température du thermomètre mouille (psychrométrie).
- ✓ Mesure de l'humidité relative (hygrométrie).
- ✓ Mesures par adsorption et par absorption.
- ✓ Mesures par diffusion gazeuse [6].

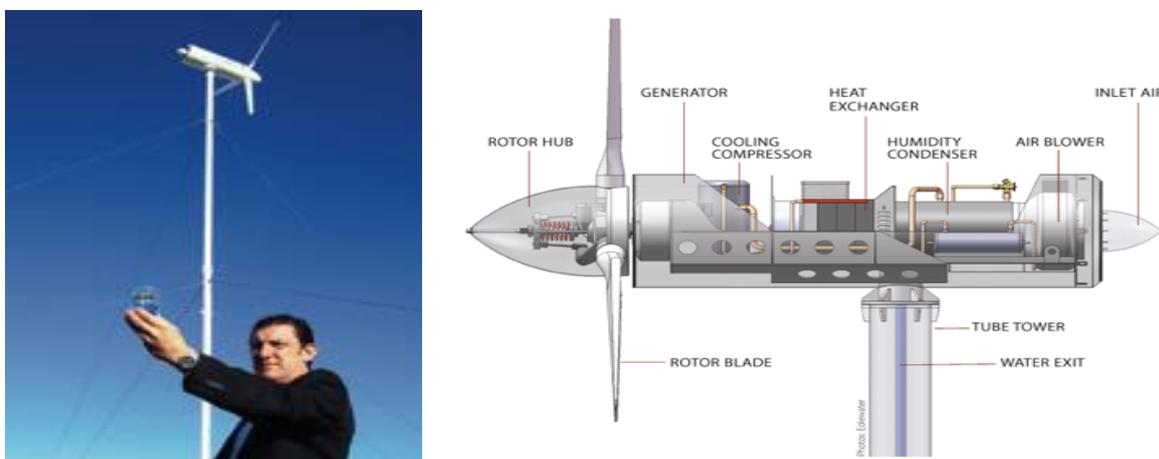
### **I.7. Différentes technologies de production d'eau douce à partir de l'humidité de l'air**

#### **I.7.1. Faire de l'eau avec du vent (WMS de Eole Water®)**

Le principe de base se résume à créer une condensation à partir de l'humidité de l'air, cette condensation se produit par le même principe que celle produite dans un climatiseur de refroidissement. En effet, l'électricité produite par une génératrice éolienne permet le fonctionnement d'un système de climatisation dans lequel l'humidité de l'air est condensée en produisant de l'eau. Le principe physique est très simple et assez connu depuis longtemps, mais l'innovation réside dans l'idée d'utiliser ce système pour produire de l'eau et non de l'électricité comme usage final.

L'éolienne WMS (Water Making System) de la société Eole Water® aspire de l'air dans un système qui refroidit une série de plaques sur lesquelles l'humidité de l'air se condense et se transforme en eau qui s'écoule dans un réservoir.

Dans de nombreuses régions du monde, les précipitations et les ressources en eau douce sont limitées, mais le taux d'humidité est élevé et le vent régulier. Ce sont des conditions idéales pour l'éolienne WMS. Une machine peut produire environ 1000 litres par jour si le vent est de 35 km/h [7] et le taux d'humidité moyen. Cette technologie n'a besoin d'aucun apport extérieur excepté le vent, et ne produit aucun déchet. Elle est donc complètement écologique et autonome.



**Fig.I.1.** Une éolienne WMS de Eole Water®.

### I.7.2. Le générateur qui produit l'eau potable pour l'armée

Ce système s'appelle Watergen, il utilise comme le projet d'éolienne français, le potentiel de condensation des systèmes de climatisation pour capter l'humidité ambiante. Mais contrairement au système d'éolienne, il est alimenté par un générateur installé sur un char [8], on suppose donc qu'il marche au gazoil et rejette des gaz à effet de serre. Toujours est-il que ses résultats sont spectaculaires : l'un des modèles proposés par la société permet de produire 450 litres d'eau par jour, à une température ambiante de 25°C et dans des conditions d'humidité de 55%. Il pourrait également être utilisé en cas d'urgence humanitaire après des catastrophes humanitaires.

### I.7.3. Production d'eau à partir de l'air (Atmosphere water generator) (AWG)

Le produit AWG, permet de produire une eau potable à partir de l'air. En effet, l'atmosphère contient 10 fois plus d'eau que toutes les rivières du monde réunies, et cette eau est distribuée dans toutes les régions du monde. De ce fait, ce procédé est original puisqu'il permet d'en extraire cette ressource illimitée.

Le secteur minier est à l'origine de cette technologie AWG qui utilise l'humidité contenue dans l'air pour produire de l'eau potable au moyen de la condensation. Au départ l'eau produite était un produit secondaire suite au refroidissement de l'air dans les mines. Maintenant, ce procédé AWG part de l'idée inverse où l'eau potable produite est la raison principale du procédé. Dans ce procédé, la machine aspire un très grand volume d'air, l'amène jusqu'au point de condensation en le refroidissant et collecte ensuite l'eau de condensation qui est filtrée puis minéralisée. A partir de ce procédé, nous obtenons une eau potable de qualité qui répond aux normes de l'OMS. Une seule machine a une capacité de production qui peut aller, dans des régions où la température et les taux d'humidité sont assez élevés, jusqu'à 40 000 litres d'eau par jour, ce qui peut assurer à des villages entiers un approvisionnement régulier en eau, moyennant la disponibilité d'une source d'énergie, puisque cette machine est assez énergivore [9].



**Fig.I.2.** Le générateur AWG.

**I.7.3.1. Mode de fonctionnement**

Le processus de production d'eau :

- ✓ Utilisation de l'atmosphère comme un réservoir d'eau.
- ✓ Production d'eau grâce à l'utilisation d'une technologie de réfrigération à très haut rendement pour condenser l'humidité contenue dans l'air.
- ✓ Usage multiple de l'eau ainsi produite grâce à l'utilisation de la technologie de traitement de l'eau – recyclage de l'eau.

Autres utilisations potentielles du processus :

- ✓ Utilisation de la chaleur résiduelle provenant du système pour produire de l'électricité.
- ✓ Utilisation de l'air refroidi pour de la climatisation.
- ✓ La capacité de produire de l'eau à partir de l'air est d'une importance majeure partout où l'eau potable se fait rare.

---

Les groupes de clients sont donc principalement les organismes et les entreprises suivantes :

- ✓ Gouvernement de pays pauvres en eau.
- ✓ Organisations humanitaires.
- ✓ Force armée, sur des missions mobiles.
- ✓ Hôtels dans des régions pauvres en eau.
- ✓ Industrie du bâtiment (alimentation en eau autonome pour les bâtiments).
- ✓ Ferme.

**I.7.3.2. Usages et avantages**

La technologie AWG rend possible la production d'eau dans n'importe quelle partie humide du monde. Elle est indépendante des ressources en eaux stationnaires. L'avantage économique est renforcé par le fait que l'air froid produit durant le processus de condensation peut être utilisé pour l'air conditionné des bâtiments. Grâce à la production centralisée d'eau, les maladies transmises par eau contaminée ne sont pas en mesure de se propager. Le processus a l'avantage de ne pas avoir d'impact négatif sur l'environnement. Il n'y a pas besoin de transporter et de stocker l'eau à grands frais puisque l'eau est produite quand et où cela est nécessaire [10].

#### I.7.4. Le panneau solaire qui produit de l'eau potable

C'est l'un des projets les plus enthousiasmants pour créer de l'eau potable, du fait de son accessibilité et de sa simplicité. Imaginé par le designer italien Gabriele Diamanti, il permet de transformer de l'eau de mer salée en une eau douce et potable, par le simple jeu de la condensation. Il cible les populations – notamment africaines – qui vivent sur le littoral sans accès à une eau potable. On place l'eau de mer dans une chaudière, elle-même alimentée par un système de panneau solaire. L'eau chauffe pendant la journée et s'évapore progressivement. Puis la vapeur d'eau passe par un tuyau, avant de se transformer en eau douce issue de la condensation, dans le bac inférieur.

L'appareil, appelé Eliodomestico, permet de produire 5 litres d'eau par jour. Il est présenté par son auteur en open-source, c'est à dire que chacun est libre de produire ce système ou de l'adapter, sans risquer de procès [11].

#### I.7.5. La bouteille qui produit de l'eau potable

Matt Damon réussit à récupérer de l'eau sous l'effet de la condensation. On pourra même réaliser à peu près la même expérience "Seul chez Soi" grâce à la bouteille Fontus, du designer industriel autrichien Kirstof Retezàr. Le designer a imaginé deux versions de ces bouteilles étonnantes qui sont reliées à des petits panneaux solaires. La première est destinée à la randonnée, l'autre pour le vélo. Retezàr a expliqué à Live Science qu'elles peuvent créer de l'eau tout simplement, en récupérant autour de vous « la condensation de l'humidité contenue dans l'air ». Celles-ci fonctionnent grâce à un condenseur, connecté à une série de petites « dents » hydrophobiques qui repoussent l'eau dans la bouteille.



**Fig.I.3. La bouteille qui produit de l'eau potable.**

Ces bouteilles, selon le designer, pourraient sauver des vies dans les pays qui n'offrent pas un accès facile à l'eau [12]. Dans de bonnes conditions climatiques (entre 30 et 40 °C et avec une humidité de 80 % à 90 %, tout de même), Fontus pourrait récupérer jusqu'à 0,47 litre par heure.

Cependant, même pour Retezàr, le prototype n'est pas encore exempt de défaut. Il peut filtrer les gros contaminants, comme les insectes et la poussière, mais a un peu plus de mal avec les petits, comme les sédiments. Un problème que le designer compte résoudre en installant un filtre carbone. Quand le prototype sera fonctionnel.

### **I.7.6. Produire de l'eau à partir de l'humidité et l'énergie solaire**

Zero Mass Water c'est l'entreprise qui produit des panneaux, appelée Source®, produisant de l'eau à partir de l'humidité de l'air par le biais de l'énergie solaire. Ces panneaux ressemblent à des panneaux solaires photovoltaïque (voir figure I.10), mais la bande du milieu est la seule partie qui est de technologie photovoltaïque standard. Cette partie entraîne les ventilateurs et les communications à l'intérieur de l'unité. Le reste de la surface contient un matériau révolutionnaire, qui justement fait l'originalité de ce dispositif, il s'agit d'un matériaux organométallique poreux, il s'agit du MOF-801 dans le cas de cette technologie (MOF : Metal Organic framework) . C'est un matériau qui fonctionne en deux phases : la phase nuit où il

absorbe l'air humide nocturne et le stock dans sa porosité comme une éponge, puis la phase diurne où l'énergie solaire expulse cette humidité de la porosité pour se condenser ensuite puis l'eau finit dans un réservoir de 30 litres ou il est minéralisé et PH équilibré et à ce moment-là, il est potable [13]. Le grand mérite de cette technologie, contrairement à toutes les autres c'est qu'elle réussit à extraire de l'eau même dans les conditions d'humidité les plus minimales (20%), là où les autres technologies ne sont pas capable de produire aucune goutte d'eau, et ce grâce aux propriétés très intéressantes du MOF-801. Dans le chapitre suivant, nous allons voir plus en détail comment fonctionne ce matériau MOF-801 pour générer de l'eau en montrant ses principales caractéristiques, et en donnant les principes physiques qui gouvernent son mode d'action, par le biais d'un modèle.



**Fig.I.4.** Le panneau Source® de la technologie Zero Mass Water.

## I.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons passé en revue les principales technologies de production d'eau potable à partir de l'humidité de l'air. La plupart de ces technologies nécessite un taux d'humidité minimum de 50% pour pouvoir fonctionner correctement, ceci prive les endroits désertiques secs de ces technologies qui sont pourtant les plus demandeur de ce types de technologies. Heureusement que tout récemment une nouvelle technologie est apparue à base d'un Organométallique MOF-801 aux propriétés très intéressantes qui réussit à extraire de l'eau même dans les conditions d'humidités les plus basses (20%). Ceci ouvre une voie prometteuse pour l'exploitation de cette technologie dans les zones pauvres en ressources hydriques. De ce fait, nous verrons d'abord dans le chapitre suivant le détails de cette technologie, et dans le chapitre 3, nous identifierons une région du Sahara Algérien qui est assez pauvre en ressources hydriques pour pouvoir faire une étude technico-économique de l'introduction de cette technologie, ce qui fera l'objet du dernier chapitre.

**Références**

- [1] <http://www.eau-poitou-charentes.org>
- [2] Fewtrell, L., & Bartram, J. (Eds.). (2001). *Water Quality: Guidelines, Standards & Health*. IWA publishing.
- [3] Hébert, S., Légaré, S., & du Québec, G. (2000). *Suivi de la qualité de l'eau des rivières et petits cours d'eau*. Direction du suivi de l'état de l'environnement, Ministère de l'environnement.
- [4] Hébert, S., Légaré, S., & du Québec, G. (2000). *Suivi de la qualité de l'eau des rivières et petits cours d'eau*. Direction du suivi de l'état de l'environnement, Ministère de l'environnement.
- [5] Lye, D. J. (2002). Health risks associated with consumption of untreated water from household roof catchment systems. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 38(5), 1301-1306
- [6] Gaudu, J. C., Mathieu, J. M., Fumanal, J. C., Bruckler, L., Chanzy, A., Bertuzzi, P., ... & Guennelon, R. (1993). Mesure de l'humidité des sols par une méthode capacitive: analyse des facteurs influençant la mesure. *Agronomie*, 13(1), 57-73.
- [7] [http://www.wipo.int/wipo\\_magazine/fr/2010/04/article\\_0005.html](http://www.wipo.int/wipo_magazine/fr/2010/04/article_0005.html)
- [8] <https://eaumondieu.wordpress.com/2014/09/09/6-inventions-qui-revolutionnent-laces-a-leau-potable>
- [9] <http://www.aquaosmo.net/> et <http://www.coroflot.com/apok/Atmospheric-Water-Generator1>
- [10] <http://www.aquaosmo.net/>

- [11] <https://www.agoravox.fr/actualites/technologies/article/6-inventions-qui-revolutionnent-l-156649>
- [12] <https://www.agoravox.fr/actualites/technologies/article/6-inventions-qui-revolutionnent-l-156649>
- [13] [https://www.youtube.com/channel/UCddiUEpeqJcYeBxX1IVBKvQ?sub\\_confirmation=1](https://www.youtube.com/channel/UCddiUEpeqJcYeBxX1IVBKvQ?sub_confirmation=1)

# **CHAPITRE II**

**La technologie Zero Mass Air**

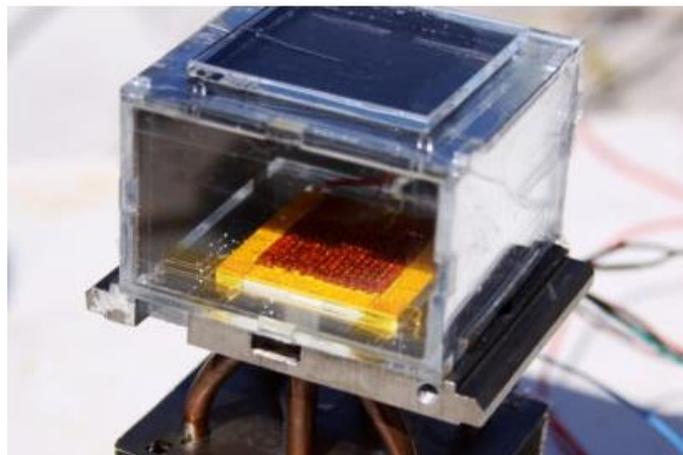
## II.1. Introduction

Le système zéro mass water est une nouvelle technologie qui produit de l'eau potable, dans laquelle on n'est pas besoin d'une matière première pour alimenter ce système.

Une température diurne naturelle oscille thermiquement aide le processus (adsorption de l'eau pendant la nuit plus fraîche et libération pendant le jour plus chaud). Cette stratégie est beaucoup plus efficace sur le plan énergétique que les systèmes de récupération de la rosée basés sur la réfrigération parce que la chaleur est directement utilisée pour la désorption. La quantité d'eau qui peut être récoltée avec les MOF peut être beaucoup plus grande que celle des systèmes de récolte de rosée, et ne nécessite pas des conditions d'humidité relative élevée.

Dans cette technologie on crée un différentiel de chaleur dans le système, cela permet ensuite au matériau hygroscopique du système d'adsorber la vapeur d'eau, puis de la minéraliser pour la boire.

Les matériaux hygroscopiques utilisés dans cette technologie sont des matériaux organiques Framework de 801 (MOF-801).



**Fig.II.1.** L'arracheuse d'eau.

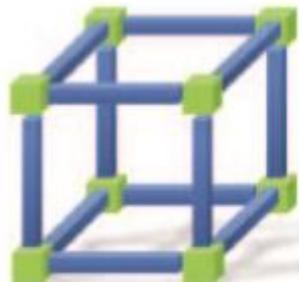
## II.2. Définition de la matière hygroscopique

Un matériau hygroscopique possède la propriété de fixer une certaine quantité de l'humidité contenue dans l'air ou d'eau liquide (à son contact).

Le fait expérimental qui met en évidence ce phénomène est la variation de sa masse lorsqu'il est mis en présence d'humidité.

## II.3. Historique des matériaux de type MOF

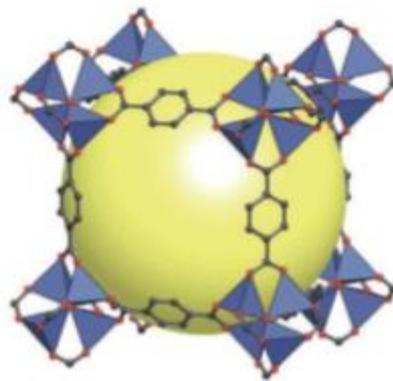
Les solides poreux hybrides désignent une classe de matériau dont le réseau cristallin est composé d'une partie organique et d'une partie inorganique.



**Fig.II.2.** Structure type d'un réseau de MOF, les ligands organiques en bleu relient entre eux les ions métalliques ou cluster en vert (partie inorganique).

Le développement de ces matériaux qui sont donc issus de l'association de la chimie de coordination à celle du solide combinée à la richesse de la chimie organique a commencé très lentement. Le terme de polymère de coordination a été proposé en 1964 [1] pour désigner ces matériaux hybrides dont la porosité a été démontrée dans les années 1970. Ce n'est qu'à partir de 1989 que renaît l'intérêt pour ces composés avec notamment les travaux de Hoskins et Robson[2] qui démontrent la possibilité de générer des structures tridimensionnelles par coordination à partir de l'association de ces deux entités organiques et inorganiques. Le développement dans les années 90 des solides hybrides a été possible grâce aux efforts conjugués de divers groupes à travers le monde dont ceux de Yaghi et O'keeffe [3], Kitagawa [4] et Ferey [5]. A partir de cette période, le terme de MOF [6], [7] (acronyme de Metal Organique Framework) désigne ces solides hybrides poreux qui sont également appelés PCP

(acronyme de Porous Coordination Polymers). La synthèse de la première structure portant la terminologie MOF, nommé MOF-5 (Fig.II.3) a été synthétisée par Yaghi et publiée en 1999 [8]. L'engouement aussi bien sur le plan académique qu'industriel pour ces matériaux est matérialisé par la croissance exponentielle depuis les années 90 des publications au sujet de ces adsorbants. Ces travaux mettent en avant aussi bien la synthèse de nouvelles structures que les propriétés d'adsorption de molécules d'intérêt industriel [9]. Il faut également souligner que dans la littérature, ces matériaux hybrides poreux portent les noms du laboratoire de conception. Les plus connus d'entre eux sont les MIL pour Matériaux de l'Institut Lavoisier [10], [5]. l'article d'origine [11] ayant été cité 1400 fois dans les dix ans qui ont suivi son apparition [6]. Dans cette période, l'augmentation du nombre d'articles publiés sur la chimie des MOFs a été exponentielle, atteignant jusqu'à 1000 publications par an [12]. Cette croissance témoigne de l'engouement suscité par ces matériaux et de leur intérêt, sur un plan académique comme un point de vue industriel. Par bien des côtés, les MOFs constituent une "génération" de matériaux qui succède à celle des zéolithes, également poreuses et cristallines mais purement inorganiques. Les MOFs sont caractérisées par des stabilités thermiques et mécaniques importantes, bien qu'inférieures à celles des zéolithes en raison de la présence des ligands organiques qui se dégradent à trop haute température. Un bon nombre de MOFs sont donc stables jusqu'à des températures de 300°C à 400°C, quand les zéolithes peuvent supporter des températures qui dépassent les 1000°C.



**Fig.II.3.** Structure de la MOF-5.

#### II.4. Caractéristiques des MOFs

Les entités organiques/inorganiques ainsi coordonnées forment un réseau avec un vide à l'intérieur, ce sont les cavités formant la porosité du matériau avec différentes géométries (tunnels, cages,...) [5]. La possibilité de varier la taille des ligands permet d'obtenir des matériaux de grandes surfaces spécifiques et de tailles de pores variables et contrôlées. La modulation de la taille des pores est matérialisée par la synthèse de matériau dit iso réticulaire (concept de la chimie d'échelle). Les travaux de Yaghi [13], [14], ont permis une meilleure connaissance des réseaux organométalliques en montrant qu'il est possible de moduler la taille des pores sans changer la topologie de la structure. Le principe est de partir d'une structure de MOF existante et de substituer le ligand par un autre espaceur organique de taille différente. Parmi ces familles de MOFs, on peut citer celle des IRMOF (pour Iso Reticular MOF) élaborés à partir du MOF-5 par Yaghi en remplaçant l'acide téréphtalique par des ligands carboxylate de plus grande taille. Partant de ce concept, les différents groupes travaillant sur l'élaboration de nouveaux MOFs, ont pu synthétiser des adsorbants avec des tailles de pores allant jusqu'à 30 à 40 Å dans le cas des MIL-100 et 101 [15] et des surfaces BET élevées, comprises entre 500 et 4500m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>. Par opposition, cette recherche de pore de grandes dimensions a également abouti à la découverte de MOFs dont les réseaux se croisent l'un dans l'autre, ils sont nommés MOFs interpénétrés [10]. Les adsorbants de type MOFs sont donc le plus souvent microporeux, ils possèdent des surfaces spécifiques et des volumes poreux élevés comparables et dans certains cas supérieurs aux zéolithes ou aux charbons actifs. De plus la structure cristalline régulière des MOFs, leurs confère une distribution de dimension des pores remarquablement uniforme. Cette propriété, peut conduire à une sélectivité élevée en adaptant le choix de la taille des pores des matériaux selon les dimensions des molécules à exclure pour des séparations par tamis moléculaire. Les cavités des MOFs peuvent également être adaptées à l'usage visé par fonctionnalisation des ligands par différentes fonctions (de type amine, nitro, chloro.....). Celle-ci peut être réalisée au cours de la synthèse ou en post-synthèse et permet de moduler les affinités vis-à-vis des molécules cibles à adsorber [15].

Une propriété surprenante que présentent certains de ces solides est la flexibilité de leur structure [5]. La structure de certains MOFs peut évoluer en fonction de divers stimuli qui leurs sont imposés. Cette flexibilité réversible se manifeste par différentes formes de mouvements comme la rotation des ligands, l'extension, la « respiration » de la structure. Ce phénomène a pour origine la jonction entre la partie organique et inorganique. Dans le cas de la rotation des

ligands, on peut citer les ZIF [16] dont la rotation des ligands autour de leur axe témoigne de cette flexibilité. Cette dynamique des ligands peut être induite par chauffage dans le cas des IRMOF [17], provoquant une contraction du volume de maille (phénomène appelé dilatation thermique négative). La flexibilité se manifeste en présence de certains adsorbats et de certains matériaux. Dans le cas du  $[\text{Cu}(\text{bipy})(\text{BF}_4)_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})_2 \cdot (\text{bipy})]_n$  qui est non poreux au début de l'adsorption [18], il devient pour une certaine pression relative de l'adsorbable avec la création de canaux unidimensionnels. Dans le cas du MIL-88, la transformation de la structure est matérialisée par le gonflement continu qui augmente avec la quantité d'adsorbat. Cette expansion de la maille permet d'observer une augmentation du volume de 220% en présence d'adsorbables comme la pyridine.

La porosité des MOFs à l'issue de l'étape de synthèse peut être occupée par les molécules de solvants, des réactifs de départ ou des produits de la synthèse. L'accès aux pores se fait en éliminant par activation thermique sous atmosphère contrôlée ces molécules. Cependant, tous les matériaux ne réagissent pas de façon analogue à ce retrait. Ces différences de comportement des MOFs au cours de l'élimination de ces molécules hôtes est la base de la classification des MOFs proposée par Kitagawa en 1998 [19].

## II.5. Synthèse des MOFs

Ces matériaux hybrides sont synthétisés à partir d'un précurseur métallique (sels métalliques généralement) dissout en solution en présence de la forme acide du ligand. Cette synthèse est obtenue par chauffage progressif, sous pression autogène de ces réactifs. Dans ces conditions, si le milieu réactionnel contient de l'eau la synthèse est dite hydrothermale ou solvothermale dans le cas contraire. En milieu non aqueux, différents solvants tels que le DMF, le THF sont utilisés. Les réactifs sont introduits dans un insert en téflon (autoclave). Différents paramètres tels que la température et le temps de chauffage, la concentration, les quantités de solvant, la nature du précurseur, le pH sont à faire varier pour obtenir le matériau désiré. Après la cristallisation, les étapes de filtration et de séchage sont mises en œuvre pour obtenir le produit final avec le moins d'impuretés résiduelles. Généralement le temps nécessaire à l'obtention de MOFs par ces méthodes solvothermales ou hydrothermales est de l'ordre de 4 jours pour certains matériaux.

D'autres méthodes de synthèse se sont développées ces dernières années telles que la synthèse assistée par micro-onde [20] permettant de réduire la durée de chauffage et également

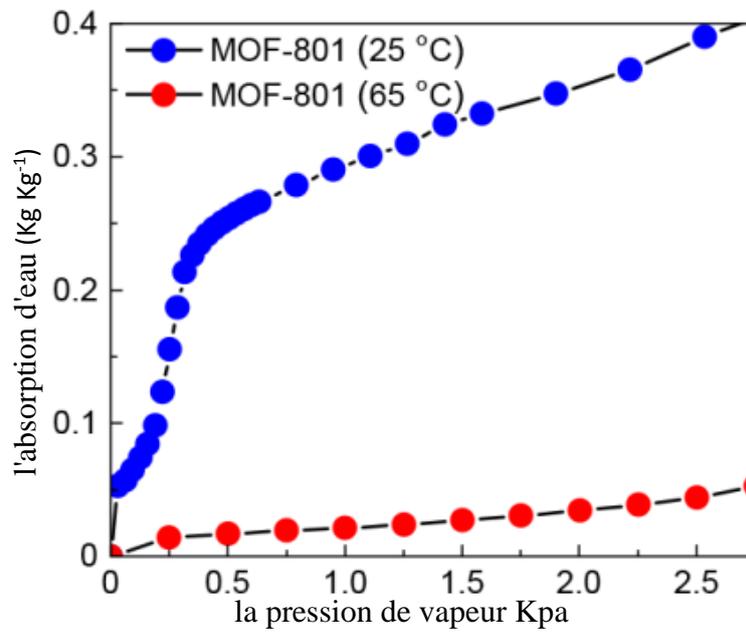
d'augmenter le rendement. La synthèse par voie électrochimique [9] a pour avantage l'absence de contre-ions, elle permet d'obtenir des MOFs avec très peu d'impuretés. Plus récemment est apparue la synthèse par broyage mécanique [21].

## II.6. Le MOF-801

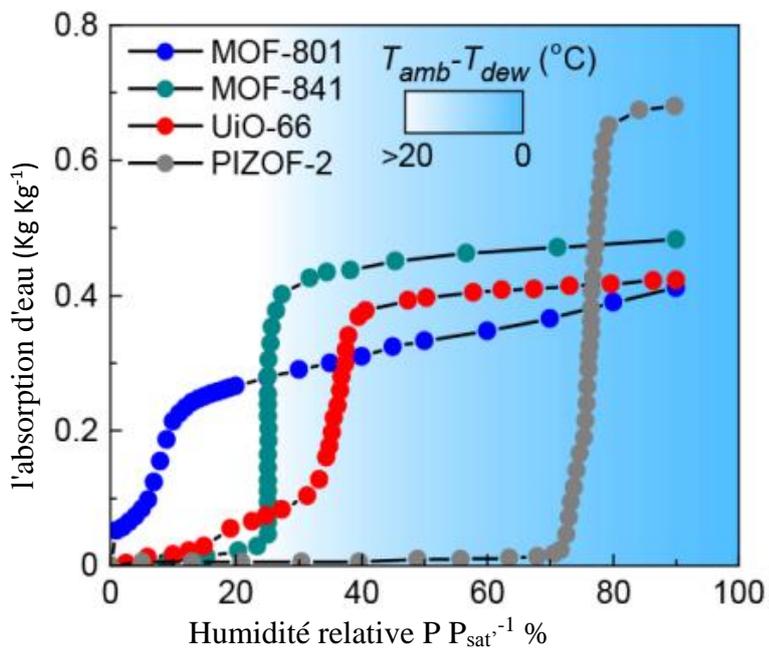
Pour le MOF-801, une variation de température entre 25 ° C et 65 ° C permet de récolter plus de 0,25 L kg<sup>-1</sup> d'eau à une pression de vapeur supérieure à 0,6 kPa (20% HR à 25 ° C, Fig.II.4). Cette stratégie de collecte de l'eau est complètement passive, ne reposant que sur la capacité d'absorption d'eau élevée, les besoins en chaleur de faible qualité pour la désorption, et la température ambiante pour condenser et recueillir l'eau. (Fig.II.5). Pour notre approche, le MOF-801 présente plusieurs avantages en ce qu'il a:

- un comportement d'adsorption de l'eau bien étudié au niveau moléculaire;
- une bonne performance due à l'agrégation de molécules d'eau en amas dans les pores du MOF;
- une stabilité et un recyclage exceptionnels;
- la grande disponibilité et le faible coût de ses composants.

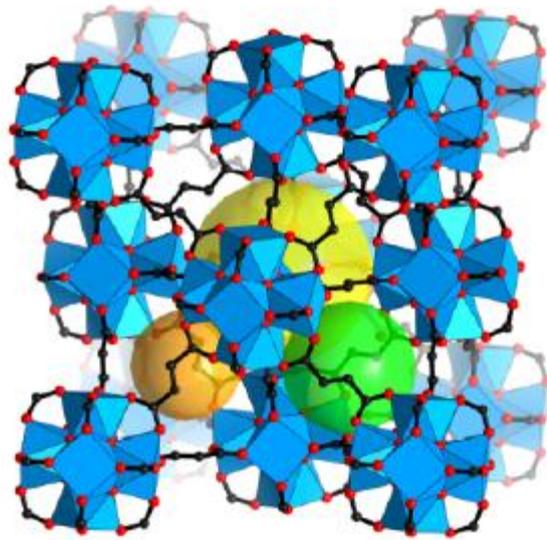
Il est composé de  $Zr_6O_4(OH)_4(-COO)_{12}$  à base de Zr reliés par 12 et reliés par des lieurs de fumarate dans un cadre poreux étendu tridimensionnel de topologie fcu. La structure du MOF-801 contient trois cavités symétriquement indépendantes dans lesquelles les molécules d'eau peuvent être captées et concentrées (Fig.II.6)



**Fig.II.4.** Isothermes d'absorption d'eau du MOF-801, mesurés à 25 ° et 65 ° C, à 20% HR [22].



**Fig.II.5.** Isothermes d'adsorption d'eau des MOF à base de Zr (MOF-801, MOF-841, UiO66 et PIZOF-2) à 25 ° C [22].

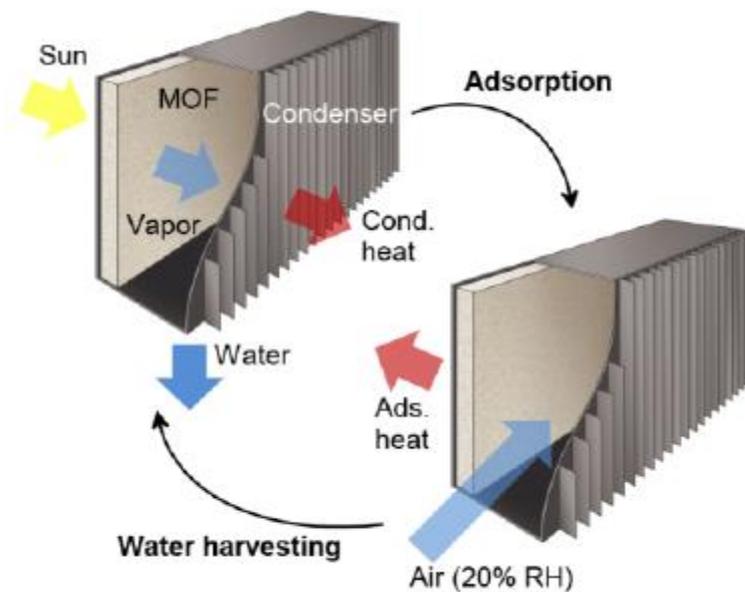


**Fig.II.6.** MOF-801. Les grandes boules jaunes, orange et vertes trois pores différents. Code de couleur: noir, C; rouge O; polyèdres bleus, Zr.

### II.7. Principe de fonctionnement

Idéalement, un système de collecte de l'eau devrait fonctionner avec un matériau capable d'absorber et de rejeter de l'eau avec des besoins énergétiques minimaux et alimenté par des sources d'énergie de faible qualité, telles que la lumière du soleil, afin de permettre son déploiement dans les foyers, régions ensoleillées. Ici, nous démontrons la collecte de l'eau par adsorption de vapeur en utilisant un cadre organométallique poreux (poudre microcristalline MOF-801,  $[\text{Zr}_6\text{O}_4(\text{OH})_4(\text{fumarate})_6]$  [22] dans l'air ambiant avec HR faible, typique des niveaux trouvés dans la plupart des régions sèches du monde (jusqu'à HR de 20%). Nous rapportons également un dispositif basé sur ce MOF qui peut récolter et livrer de l'eau ( $2,8 \text{ L kg}^{-1} \text{ jour}^{-1}$  à 20% HR) sous un flux solaire non concentré inférieur à  $1 \text{ kW m}^{-2}$ , sans entrée de puissance pour produire de l'eau à température ambiante à l'extérieur. Les matériaux poreux, tels que les zéolithes, les gels de silice et les MOF, peuvent récolter l'eau de l'air par adsorption sur une large gamme de valeurs d'humidité [23]. Cependant, ces matériaux souffrent d'une faible absorption d'eau ou d'une consommation d'énergie élevée pour sa libération. Bien que les MOF aient déjà été pris en compte dans de nombreuses applications, notamment le stockage, la séparation et la catalyse du gaz [24], la pompe à chaleur [25], et déshumidification [26].

Système de collecte d'eau MOF, composé d'une couche de MOF et d'un condenseur, soumis à des processus de collecte et d'adsorption d'eau assistés par l'énergie solaire. Lors de la récolte de l'eau (à gauche), la vapeur désorbée est condensée à la température ambiante et délivrée par un puits thermique passif, ne nécessitant aucune énergie supplémentaire. Pendant la capture d'eau, la vapeur est adsorbée sur la couche de MOF, rejetant la chaleur à l'ambiante (à droite). Ads et Cond représentent l'adsorption et la condensation, respectivement, Fig.II.7.



**Fig.II.7.** Système de collecte d'eau MOF.

### II.8. La recette pour préparer le MOF-801 :

Les MOF ont été préparés de manière solvothermique en chauffant des solutions contenant des sels de zirconium, la forme acide correspondante du lieur organique et un agent de modulation (acide formique ou acide acétique). DUT-67 [27], MOF-804 [28], UiO-66 [28], et PIZOF-2 [29] ont été préparés selon des procédures publiées avec de légères modifications. Pour l'activation du CO<sub>2</sub> supercritique [30], les MOF échangés par solvant ont été immergés dans du CO<sub>2</sub> liquide, maintenus sous atmosphère de CO<sub>2</sub> supercritique, puis saignés à l'aide d'un séchoir à point critique Tousimis Samdri PVT-3D.



**Fig.II.8.** séchoir à point critique.

Cristaux simples de  $Zr_6O_4(OH)_4(\text{fumarate})_6$ , MOF-801-SC :

De l'acide fumarique (0,081 g, 0,70 mmol) et du  $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$  (0,23 g, 0,70 mmol) ont été dissous dans un mélange solvant de DMF / acide formique (35 ml / 5,3 ml) dans un bocal en verre à bouchon fileté de 60 ml. Le mélange a été chauffé à 120 ° C pendant 24 heures. Des cristaux incolores octaédriques ont été recueillis et lavés trois fois avec 5 ml de DMF frais (rendement: 0,10 g, 63% par rapport à l'acide fumarique). On a rincé un échantillon de MOF-801-SC tel qu'il est synthétisé avec 10 mL de DMF anhydre trois fois par jour pendant 3 jours et on l'a immergé dans 10 mL de méthanol pendant 3 jours, période au cours de laquelle on a le méthanol a été remplacé trois fois par jour. Le solide a ensuite été séché à 150 ° C sous vide pendant 24 h pour donner un échantillon activé.

EA de l'échantillon activé: calculé pour  $Zr_6C_{24}H_{16}O_{32} = [Zr_6O_4(OH)_4(\text{fumarate})_6]$ : C, 21,14; H, 1,18%; Trouvé: C, 19,40; H, 1,77%. Calculé pour  $Zr_6C_{24}H_{28}O_{38} = [Zr_6O_4(OH)_4(\text{fumarate})_6] \cdot 6(H_2O)$ : C, 19,59; H, 1,92% [22]

✚ Echantillon de poudre microcristalline de  $Zr_6O_4(OH)_4(\text{fumarate})_6$ , MOF-801-P :

De l'acide fumarique (5,8 g, 50 mmol) et du  $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$  (16 g, 50 mmol) ont été dissous dans un mélange solvant de DMF / acide formique (200 mL / 70 mL) dans un pot à bouchon à vis de 500 mL, qui était chauffé à 130 ° C pendant 6 h. Le précipité blanc a été filtré en utilisant des filtres à membrane en Nylon (taille de pores 0,2 um) et lavé trois fois avec 20 ml de DMF frais et trois fois avec 50 ml de méthanol (rendement: 10 g, 90% par rapport à l'acide fumarique). Le MOF-801-P ainsi synthétisé a été rincé avec 50 ml de DMF anhydre trois fois par jour pendant 3 jours, et immergé dans 100 ml de méthanol pendant 3 jours, pendant lequel le

méthanol a été remplacé trois fois par jour. Le solide a ensuite été séché à 150°C sous vide pendant 24 h pour donner un échantillon activé. EA de l'échantillon activé: calculé pour  $Zr_6C_{24}H_{16}O_{32} = [Zr_6O_4(OH)_4(\text{fumarate})_6]$ : C, 21,14; H, 1,18%; Trouvé: C, 19,25; H, 1,05%. Calculé pour  $Zr_6C_{24}H_{28}O_{38} = [Zr_6O_4(OH)_4(\text{fumarate})_6] \cdot 6(H_2O)$ : C, 19,59; H, 1,92% [22]

## II.9. La modélisation théorique

Un modèle théorique basé sur la conservation de la masse et de l'énergie a été développé pour comprendre et prédire les dynamiques adsorption-desorption du MOF-801:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (uC) = \nabla \cdot D_v \nabla C - \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \frac{\partial C_\mu}{\partial t} \quad (\text{II.1})$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot k \nabla T + h_{ad}(1 - \varepsilon) \frac{\partial C_\mu}{\partial t} \quad (\text{II.2})$$

L'équation (II.1) représente la conservation de la masse de la vapeur due à la diffusion dans l'adsorbant empaqueté, où  $C$ ,  $\varepsilon$ , et  $\frac{\partial C_\mu}{\partial t}$  où sont la concentration de vapeur ( $\text{mol.m}^{-3}$ ), la porosité de l'adsorbant tassé, et le taux moyen d'adsorption, respectivement. On peut utiliser la loi des gaz parfait pour calculer la concentration de la vapeur ( $\text{mol.m}^{-3}$ )  $C = PR^{-1}T^{-1}$  où  $P, R$  et  $T$  correspondent à la pression (Pa), la constante de gaz universelle ( $\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) et la température (K) de l'échantillon.  $D_v$  est la diffusivité intercrystalline de la vapeur ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ) à travers les cristaux MOF-801 emballés. Le facteur de compressibilité de la vapeur d'eau à la pression atmosphérique est proche de l'unité. Le transport de la vapeur dû à l'advection ( $\nabla \cdot (uC)$  de l'équation (II.1)) peut être négligé en mettant en échelle l'advection au transport par diffusion en utilisant le nombre de Péclet,  $Pe = L_c u \cdot D_v^{-1}$ . Ici,  $L_c$  est l'échelle de longueur caractéristique (épaisseur de la couche), et la vitesse de vapeur Darcian,  $u = -K \nabla P / \mu$ , peut être calculé en utilisant la perméabilité,  $K$ , du milieu poreux (adsorbant empaqueté),  $k = (2r_c)^2 \varepsilon^3 (36k_k (1 - \varepsilon)^2)^{-1}$ , où  $\mu$ ,  $r_c$ , et  $k_k$  sont la viscosité dynamique de la vapeur, rayon cristallin du Mof-801 (Figure.II.9), et le constant de Kozeny, respectivement. Le nombre de Péclet estimé pour les expériences de collecte d'eau dans des conditions de vapeur pure est de l'ordre de  $10^{-2}$ . Pour le cas du mélange air-vapeur où  $D_v$  est beaucoup plus faible que le cas de la vapeur pure, l'advection peut être négligée car la présence de molécules d'air peut équilibrer les gradients de pression au cours des processus d'adsorption et de désorption. L'équation d'énergie montrée dans l'équation (II.2) représente la conservation d'énergie dans l'adsorbant emballé, en négligeant la contribution de l'advection, où  $\rho C_p$ ,  $k$ , et  $h_{ad}$  sont la

capacité thermique localement moyennée ( $J m^{-3}k^{-1}$ ), conductivité thermique ( $W m^{-1}k^{-1}$ ), et enthalpie d'adsorption ( $J mol^{-1}$ ),  $\sim 55 KJ mol^{-1}$  [31]. En raison de la forte conductance thermique du liant métallique (mousse de cuivre), l'advection peut être négligée. Basé sur le nombre de Knudsen pour le transport de vapeur,  $D_v$  peut être approché comme la diffusion de Knudsen, la diffusion moléculaire ou une combinaison des deux. Le nombre de Knudsen pour la vapeur peut être calculé en utilisant le libre parcours moyen de la vapeur et la taille des vides caractéristiques des milieux poreux (II.3). La diffusivité intercrystalline de vapeur efficace,  $D_v$  dans une vapeur d'air mélange avec considération de Knudsen et des diffusions moléculaires dans des milieux poreux tortueux peut être estimé comme [32].

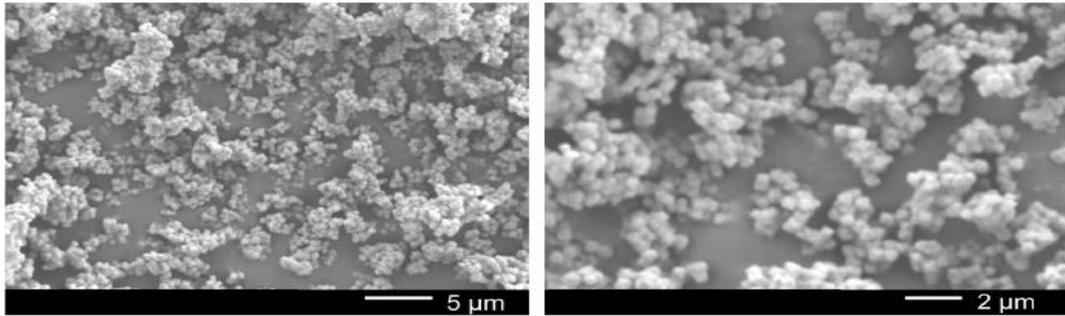
$$D_V = \varepsilon^{3/2} \left( \frac{1}{D_{Vap}} + \frac{1}{D_{k,Vap}} \right)^{-1} \quad (II.3)$$

Où  $D_{Vap}$ ,  $D_{K,Vap}$ , et  $\varepsilon$  sont la diffusivité moléculaire de la vapeur dans l'air, Knudsen diffusivité de la vapeur, et porosité de l'adsorbant tassé, respectivement. Comme les expériences de récupération de l'eau (figure II.11) ont été conduites dans des conditions de vapeur pure à basse pression ( $\sim 1,2$  kPa), la diffusivité intercrystalline dans ce cas est exprimée comme  $D_v = \varepsilon^{3/2} \cdot D_{K,Vap}$ .

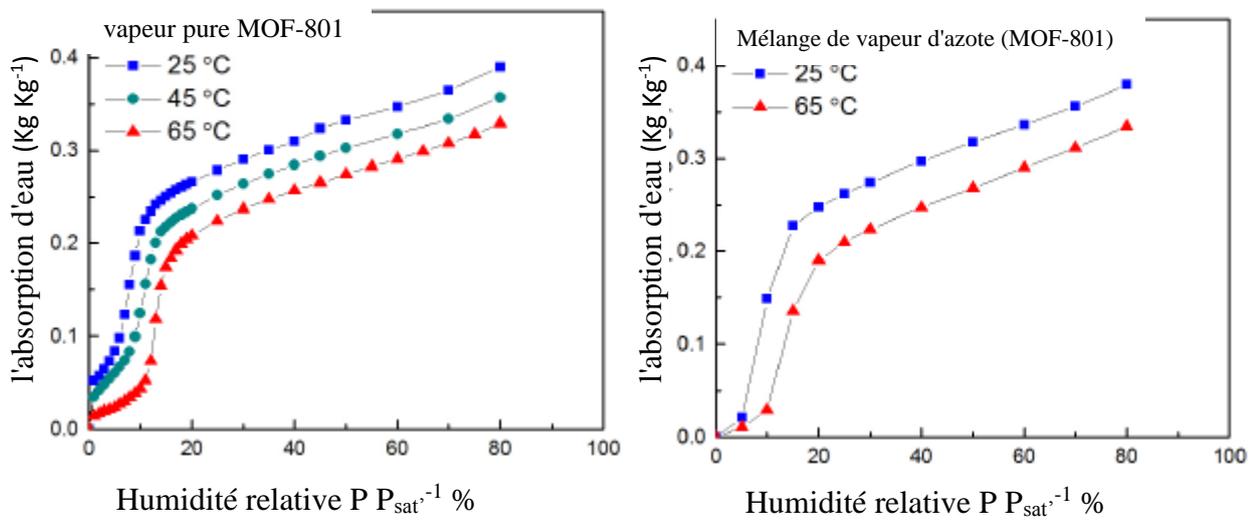
Dans les équation (II.1) et (II.2),  $C_\mu$  est la concentration de vapeur dans un cristal d'adsorbant, et le taux d'adsorption instantané moyen,  $\partial C_\mu / \partial t$ , peut être approché avec le modèle de force d'entraînement linéaire.

$$\frac{\partial C_\mu}{\partial t} = \frac{15}{r_c^2} D_\mu (C_{eq} - C_\mu) \quad (II. 4)$$

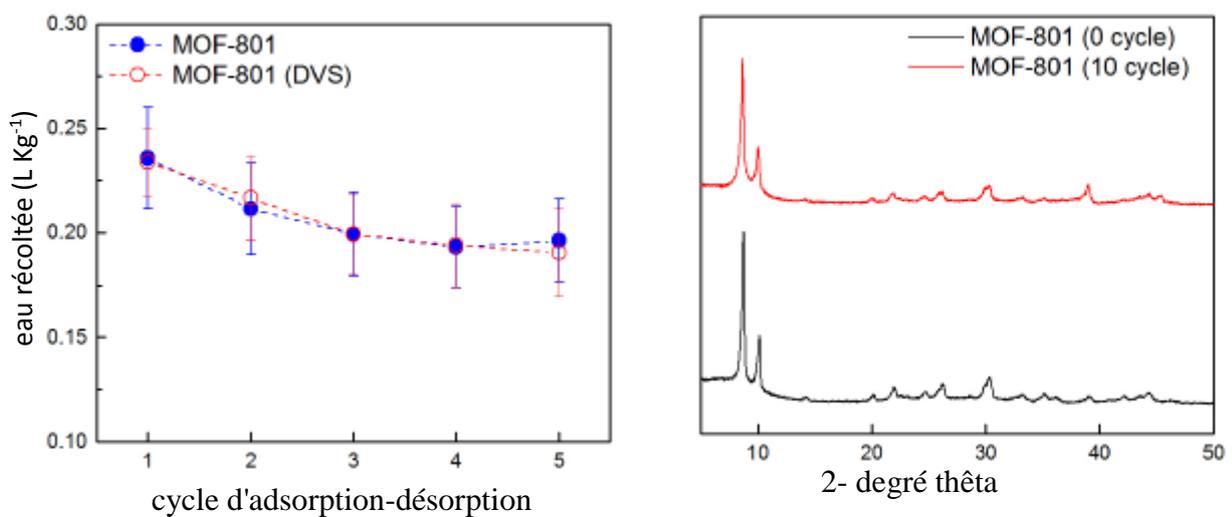
A l'équation (II.4),  $r_c$ ,  $D_\mu$ , et  $C_{eq}$ , sont le rayon de cristal d'adsorbant (m), la diffusivité intracrystalline de la vapeur dans les cristaux d'adsorbant, et la concentration de vapeur d'équilibre basée sur le local température et pression de vapeur, respectivement.  $r_c$  et  $D_\mu$  ont été caractérisés expérimentalement [33], et  $C_{eq}$  peut être estimé à partir d'une interpolation linéaire des isothermes d'adsorption, mesurée dans la plage de températures considérée dans cette étude (figure II.10.).



**Fig.II.9.** images MEB de poudre MOF- 801. diamètre du cristal ~ 0.6 µm



**Fig.II.10.** Isothermes d'adsorption du MOF-801 mesurés dans un mélange de vapeur pure (A) et de mélange (B) azote-vapeur à la pression atmosphérique à diverses températures[33].



**Fig.II.11.** Expérimentalement caractérisé l'eau récoltée de plusieurs cycles de collecte de l'eau en utilisant MOF-801[33].

**II.10. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les principales caractéristiques de la technologie Zero Mass Air, en définissant d'abord les matériaux hygroscopiques tout en donnant un aperçu historique de la famille des matériaux Organométallique. Les principales caractéristiques des matériau MOF-801 ont été donné ainsi qu'un modèle théorique régissant leur fonctionnement a été reporté.

Ce matériau MOF-801 est finalement un matériau révolutionnaire dans le domaine des technologies d'exctartion d'eau potable à partir de l'humidité de l'air, puisqu'il permet d'extraire de l'eau même dans les conditions d'humidités les plus défavorables (20%), ceci ouvre la voie d'utilisation de cette technologie dans les endroits les plus secs et arides au monde. Allons voir dans le chapitre suivant quelle est la région désertique intéressante en Algérie qu'on pourra identifier pour utiliser cette technologie.

## Références

- [1] Baue, A. E. (2000). History of MOF and definitions of organ failure. In *Multiple Organ Failure* (pp. 3-13). Springer, New York, NY.
- [2] Baue, A. E., & Faist, E. (2000). *Multiple organ failure: pathophysiology, prevention, and therapy*. Springer Science & Business Media.
- [3] Rowsell, J. L., & Yaghi, O. M. (2004). Metal–organic frameworks: a new class of porous materials. *Microporous and Mesoporous Materials*, 73(1-2), 3-14.
- [4] Seo, J. S., Whang, D., Lee, H., Im Jun, S., Oh, J., Jeon, Y. J., & Kim, K. (2000). A homochiral metal–organic porous material for enantioselective separation and catalysis. *Nature*, 404(6781), 982.
- [5] Férey, G. (2008). Hybrid porous solids: past, present, future. *Chemical Society Reviews*, 37(1), 191-214.
- [6] Telfer, S. G. (2010). What are these things called MOFs?. *ChemInform*, 41(48).
- [7] Lu, J. Y. (2003). Crystal engineering of Cu-containing metal–organic coordination polymers under hydrothermal conditions. *Coordination chemistry reviews*, 246(1-2), 327-347.
- [8] Millward, A. R., & Yaghi, O. M. (2005). Metal–organic frameworks with exceptionally high capacity for storage of carbon dioxide at room temperature. *Journal of the American Chemical Society*, 127(51), 17998-17999.
- [9] Mueller, U., Schubert, M., Teich, F., Puetter, H., Schierle-Arndt, K., & Pastre, J. (2006). Metal–organic frameworks—prospective industrial applications. *Journal of Materials Chemistry*, 16(7), 626-636.
- [10] Guillerm, V. (2011). *Synthèse, fonctionnalisation et propriétés d'adsorption de nouveaux solides hybrides poreux* (Doctoral dissertation, Versailles-St Quentin en Yvelines).
- [11] Li, H., Eddaoudi, M., O'Keeffe, M., & Yaghi, O. M. (1999). Design and synthesis of an exceptionally stable and highly porous metal-organic framework. *nature*, 402(6759), 276.
- [12] Kitagawa, S., Kitaura, R., & Noro, S. I. (2004). Functional porous coordination polymers. *Angewandte Chemie International Edition*, 43(18), 2334-2375.
- [13] Yaghi, O. M., & Li, H. (1995). Hydrothermal synthesis of a metal-organic framework containing large rectangular channels. *Journal of the American Chemical Society*, 117(41), 10401-10402.
- [14] Eddaoudi, M., Kim, J., Rosi, N., Vodak, D., Wachter, J., O'keeffe, M., & Yaghi, O. M. (2002). Systematic design of pore size and functionality in isorecticular MOFs and their application in methane storage. *Science*, 295(5554), 469-472.

- [15] Férey, G., Serre, C., Mellot-Draznieks, C., Millange, F., Surblé, S., Dutour, J., & Margiolaki, I. (2004). A hybrid solid with giant pores prepared by a combination of targeted chemistry, simulation, and powder diffraction. *Angewandte Chemie*, 116(46), 6456-6461. *Angewandte Chemie International Edition* 2004, 43, (46), 6296-6301.
- [16] Ma, S., Sun, D., Ambrogio, M., Fillinger, J. A., Parkin, S., & Zhou, H. C. (2007). Framework-catenation isomerism in metal–organic frameworks and its impact on hydrogen uptake. *Journal of the American Chemical Society*, 129(7), 1858-1859.
- [17] Wang, B., Côté, A. P., Furukawa, H., O’Keeffe, M., & Yaghi, O. M. (2008). Colossal cages in zeolitic imidazolate frameworks as selective carbon dioxide reservoirs. *Nature*, 453(7192), 207.
- [18] Dubbeldam, D., Walton, K. S., Ellis, D. E., & Snurr, R. Q. (2007). Exceptional negative thermal expansion in isorecticular metal–organic frameworks. *Angewandte Chemie*, 119(24), 4580-4583.
- [19] Fletcher, A. J., Cussen, E. J., Prior, T. J., Rosseinsky, M. J., Kepert, C. J., & Thomas, K. M. (2001). Adsorption Dynamics of Gases and Vapors on the Nanoporous Metal Organic Framework Material Ni<sub>2</sub>(4,4’-Bipyridine)<sub>3</sub>(NO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>: Guest Modification of Host Sorption Behavior. *Journal of the American Chemical Society*, 123(41), 10001-10011.
- [20] Jhung, S. H., Lee, J. H., & Chang, J. S. (2005). Microwave synthesis of a nanoporous hybrid material, chromium trimesate. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 26(6), 880-881.
- [21] Braga, D., Giuffreda, S. L., Grepioni, F., Pettersen, A., Maini, L., Curzi, M., & Polito, M. (2006). Mechanochemical preparation of molecular and supramolecular organometallic materials and coordination networks. *Dalton transactions*, (10), 1249-1263.
- [22] Kim, H., Yang, S., Rao, S. R., Narayanan, S., Kapustin, E. A., Furukawa, H., ... & Wang, E. N. (2017). Water harvesting from air with metal-organic frameworks powered by natural sunlight. *Science*, 356(6336), 430-434.
- [23] Canivet, J., Fateeva, A., Guo, Y., Coasne, B., & Farrusseng, D. (2014). Water adsorption in MOFs: fundamentals and applications. *Chemical Society Reviews*, 43(16), 5594-5617.
- [24] Lee, J., Farha, O. K., Roberts, J., Scheidt, K. A., Nguyen, S. T., & Hupp, J. T. (2009). Metal–organic framework materials as catalysts. *Chemical Society Reviews*, 38(5), 1450-1459.
- [25] de Lange, M. F., Verouden, K. J., Vlugt, T. J., Gascon, J., & Kapteijn, F. (2015). Adsorption-driven heat pumps: the potential of metal–organic frameworks. *Chemical reviews*, 115(22), 12205-12250.

- [26] Seo, Y. K., Yoon, J. W., Lee, J. S., Hwang, Y. K., Jun, C. H., Chang, J. S., ... & Bourrelly, S. (2012). Energy-Efficient Dehumidification over Hierarchically Porous Metal–Organic Frameworks as Advanced Water Adsorbents. *Advanced materials*, 24(6), 806-810.
- [27] Bon, V., Senkowska, I., Baburin, I. A., & Kaskel, S. (2013). Zr-and Hf-based metal–organic frameworks: tracking down the polymorphism. *Crystal Growth & Design*, 13(3), 1231-1237.
- [28] Cunha, D., Gaudin, C., Colinet, I., Horcajada, P., Maurin, G., & Serre, C. (2013). Rationalization of the entrapment of bioactive molecules into a series of functionalized porous zirconium terephthalate MOFs. *Journal of Materials Chemistry B*, 1(8), 1101-1108.
- [29] Cavka, J. H., Jakobsen, S., Olsbye, U., Guillou, N., Lamberti, C., Bordiga, S., & Lillerud, K. P. (2008). A new zirconium inorganic building brick forming metal organic frameworks with exceptional stability. *Journal of the American Chemical Society*, 130(42), 13850-13851.
- [30] Schaate, A., Roy, P., Preuße, T., Lohmeier, S. J., Godt, A., & Behrens, P. (2011). Porous interpenetrated Zirconium–organic frameworks (PIZOFs): A chemically versatile family of metal–organic frameworks. *Chemistry-A European Journal*, 17(34), 9320-9325.
- [31] Kim, H., Cho, H. J., Narayanan, S., Yang, S., Furukawa, H., Schiffres, S., ... & Wang, E. N. (2016). Characterization of adsorption enthalpy of novel water-stable zeolites and metal-organic frameworks. *Scientific reports*, 6, 19097.
- [32] Moldrup, P., Olesen, T., Gamst, J., Schjønning, P., Yamaguchi, T., & Rolston, D. E. (2000). Predicting the gas diffusion coefficient in repacked soil water-induced linear reduction model. *Soil Science Society of America Journal*, 64(5), 1588-1594.
- [33] [www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.aam8743/DC1](http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.aam8743/DC1)

# **CHAPITRE III**

**Ressources hydriques en Algérie**

### III.1. Introduction

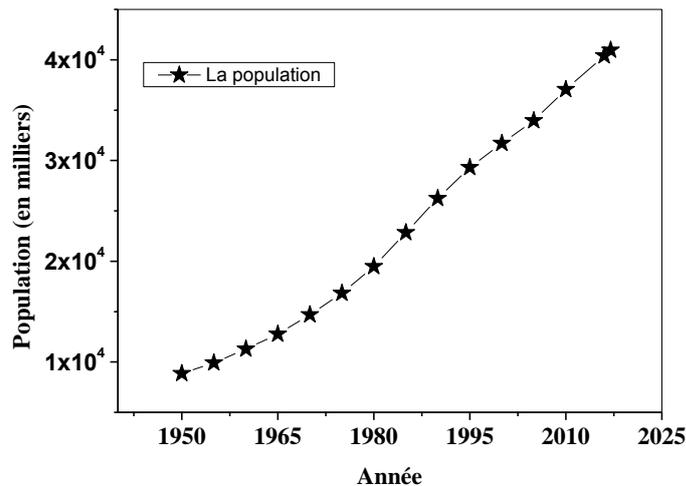
Les ressources en eau proviennent des eaux de surface et des eaux souterraines renouvelables et non renouvelables. Il est à noter que ces ressources sont très variables notamment celles qui proviennent des nappes tributaires des aléas climatiques. L'exploitation de ces ressources est très intense avec les besoins grandissants. L'utilisation de l'eau est liée aux activités économiques, la démographie. La connaissance des ressources en eau est la condition nécessaire pour une bonne gestion [1].

La ressource hydrique ou ressource en eau comprend, au sens large, toutes les eaux accessibles comme ressources, c'est-à-dire utiles et disponibles pour l'homme et les écosystèmes, à différents points du cycle de l'eau. Cette ressource est limitée en quantité et en qualité (surtout en zone sèche). Elle est indispensable à la vie et à la plupart des activités humaines, telles que l'agriculture, l'industrie et aux usages domestiques (alimentation en eau potable). Elle est vitale pour le fonctionnement des écosystèmes terrestres. Elle est localement menacée ou très dégradée par la pollution et l'eutrophisation. Il existe dans un nombre croissant de régions une surexploitation de la ressource, c'est la raison pour laquelle il faut trouver d'autres sources hydriques non-conventionnelles pour palier à ces insuffisances.

L'objet de ce chapitre consiste à identifier les besoins hydriques de l'Algérie en prenant en compte sa démographie, son climat, ses ressources hydriques naturelles ainsi que les nouvelles infrastructures de production et de distribution d'eau (dessalement, ligne de transfert In Salah-Tamanrasset). Le but de cette partie est d'identifier une région du Sahara Algérien très pauvre en ressources hydriques, assez éloignée de la Méga ligne de transfert In Salah-Tamanrasset tout en étant assez riche en énergie solaire pour tester la viabilité technico-économique de l'implémentation d'une nouvelle technologie de production d'eau potable à partir de l'humidité de l'air et de l'énergie solaire.

### III.2. Population

On observe une augmentation rapide de la population algérienne depuis l'indépendance. D'après la Figure III.1, les précédents recensements montrent que l'Algérie a connu un accroissement rapide de la population, passant de 8,8 millions d'habitants en 1950, à 40,9 millions actuellement [2], On a: 9 algériens sur 10 vivent dans le nord du pays sur 13% de la superficie du territoire, et 6 algériens sur 10 vivent dans 579 agglomérations urbaines.



**Fig.III.1.** Population algérienne entre 1950 et 2017.

Cet accroissement de la population entraîne une demande en eau importante. A cette situation que l'on qualifie de normale, on doit ajouter les effets de la sécheresse qui touche le pays. Cet état de fait a amené les décideurs à opter pour plusieurs solutions: L'augmentation du nombre de forages, donc une sollicitation plus accrue des nappes littorales, d'où une perturbation de l'équilibre de l'interface eau salée-eau douce, Le dessalement de l'eau de mer, Augmentation du nombre de barrage [3].

### III.3. Le climat

Les aires climatiques sont très diversifiées et le climat varie du type méditerranéen au type saharien. L'Est algérien est une région plus pluvieuse que l'Ouest, avec ses 2 mètres de pluie par an et des sommets enneigés d'octobre à juillet. Le pied sud de l'Atlas tellien marque la limite du climat aride : sec et tropical, avec de grands écarts de températures en hiver : la température moyenne est de 36°C le jour et 5°C la nuit.

Le Nord de l'Algérie est essentiellement méditerranéen avec un contrepoids continental, dû au barrage opposé par les chaînons côtiers aux influences maritimes. La combinaison des traits méditerranéens avec les caractéristiques continentales se développe d'avantage au fur et à mesure que l'on avance à l'intérieur des hautes terres. L'hiver y est alors rigoureux et l'été chaud et sec. [18]

Les pluies insuffisantes et irrégulièrement réparties sont absentes en été et assez fréquentes en hiver dans le Tell, et au printemps dans les hauts plateaux. Elles sont abondantes dans le Tell oriental et dans les hautes plaines constantinoises, tandis qu'elles sont plus rares au sud des Aurès, et dans les hautes plaines oranaises.

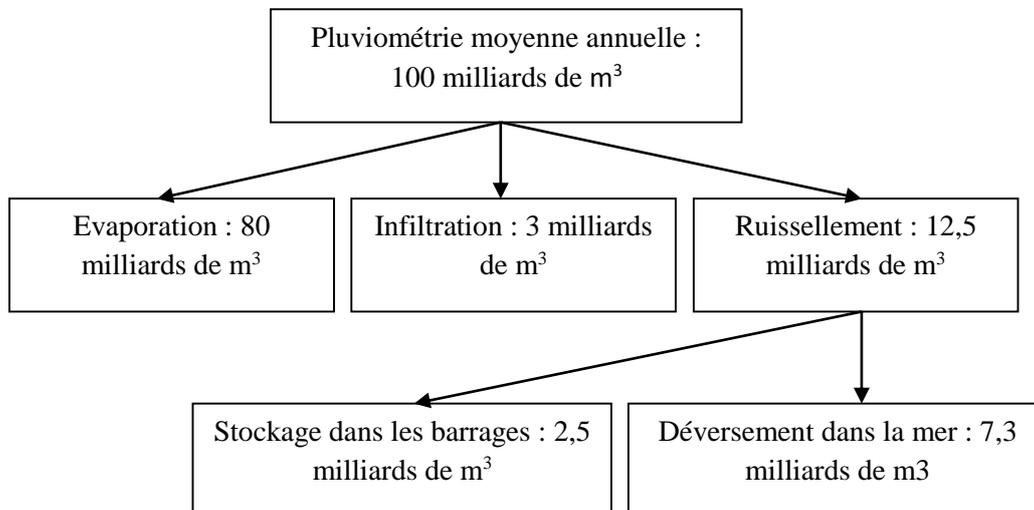
Les températures sont très élevées le jour et très basses la nuit (0°) et l'aridité des sols est extrême.

### III.4. Ressources hydriques en Algérie

Dans cette partie nous présentons un aperçu général des différentes ressources hydriques naturelles (ou conventionnelle) en Algérie (superficielle et sous terrain) , en commençant par faire un bilan des ressources du nord Algérien puis celles du sud, ensuite nous présentons les sources d'eau dites non-conventionnelles (dessalement, recyclage), et c'est dans cette catégorie que se situera la technologie de production d'eau à partir de l'humidité de l'air. L'intérêt de cette partie réside à identifier un site au sud Algérien qui a très peu de ressources à la fois en eaux superficielles et sous-terraine mais aussi de sources non-conventionnelles pour proposer la solution de production d'eau à partir de l'humidité de l'air et de l'énergie solaire comme solution économiquement viable et ayant un intérêt certain pour la population locale.

#### III.4.1. L'eau en Algérie du nord

En Algérie, l'eau est une ressource de plus en plus précieuse. La concurrence que se livrent l'agriculture, l'industrie, l'AEP, pour avoir accès à des disponibilités limitées en eau grève d'ores et déjà des efforts de développement de nombreux pays [4].



**Fig.III.2.** Répartition des ressources en eau dans l'Algérie du nord.

#### III.4.1.1 Les eaux superficielles en Algérie du nord

Les eaux sont constituées, par opposition aux eaux souterraines, de surface, également appelées eaux superficielles, de l'ensemble des masses d'eau courantes ou stagnantes, douces, saumâtres ou salées qui sont en contact direct avec l'atmosphère [5]. Par conséquent, l'eau de

surface est l'eau qui se trouve à la surface ou proche de la surface du sol. Il s'agit pour l'essentiel des cours d'eau, des océans, des mers, des lacs et des eaux de ruissellement [6].

Sa température varie en fonction du climat et de ses saisons. Ses matières en suspension sont variables selon la pluviométrie la nature et relief des terres à son voisinage. Sa composition en sels minéraux est variable en fonction du terrain, de la pluviométrie et des rejets ; elle retient peu les nitrates [7]. Une eau de surface est ordinairement riche en oxygène et pauvre en dioxyde de carbone.

Les données hydrométriques recueillies au moyen des réseaux d'observation 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 de leur précision. L'ANRH dispose à cet effet 220 stations hydrométriques, 800 postes pluviométriques et 60 stations complètes. Les premières stations du réseau hydrométriques algérien ont été installées en 1924 ; puis ce réseau s'est développé progressivement pour atteindre leur niveau actuel. Le tableau III.1 permet de donner la répartition de la pluviométrie et l'apport annuel en Algérie du nord.

**Tableau.III.1** . Précipitations des quatre régions hydrographiques de l'Algérie du nord.

Régions Désignations	Oranie Chott Chergui	Cheliff Zahres	Algérois soummam Hodna	Constantinois Seybouse Mellègue	Total Algérie du nord
Superficie en (Km <sup>2</sup> )	76000	56200	50000	43000	225200
Pluviométrie (milliards m <sup>3</sup> /an)	24,5	23,5	21	26	95
Apport annuel moyen (millions m <sup>3</sup> /an)	958	1974	4300	5595	12827

#### III.4.1.2. Eaux souterraines dans le Nord de l'Algérie

Les eaux souterraines en Algérie constituent un capital essentiel en ce que concerne les réserves d'eau, parallèlement à leurs surexploitation en débit, la pollution des principes nappes d'eau souterraines de nord de pays atteint un seuil critique au point de devenir un source de périls. Pour la santé humaines ces pollutions définissent des risques de maladies infectieuses d'origine bactérienne ou virale, ainsi que des risques de toxicité chronique ou aiguë. Pour ce prémunir des effets de ces pollutions, la législation Algérienne s'est dotée d'un arsenal de la loi et de réglementations. Néanmoins, la mise en œuvre effective sur terrain de ses lois reste

inefficace pour différentes raisons. Le danger de cette situation est évidemment préoccupant car une prise de conscience collective est nécessaire afin de redresser une situation alarmante.

Les ressources en eau souterraine dans l'Algérie du Nord sont évaluées à plus de 2 milliards de m<sup>3</sup>. Elles sont exploitées à plus de 90%, soit 1,9 milliards de m<sup>3</sup> et beaucoup de nappes se trouvent actuellement en état de surexploitation. Cette évaluation est effectuée à partir de 50 000 points d'eaux (forage et puits) recensés par l'ANRH [15].

#### III.4.2. L'eau dans le Sud Algérien

Quant au Sud de l'Algérie, il couvre 85% du territoire global du pays (voir figure III.2). 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. Pour ce grand espace, l'essentiel de ses ressources en eau est localisé dans deux grands systèmes aquifères ; la nappe du continental intercalaire qui est un grand réservoir d'eau fossile qui s'étend sur tout le Sahara septentrional et la nappe du complexe terminal qui est un aquifère peu profond.

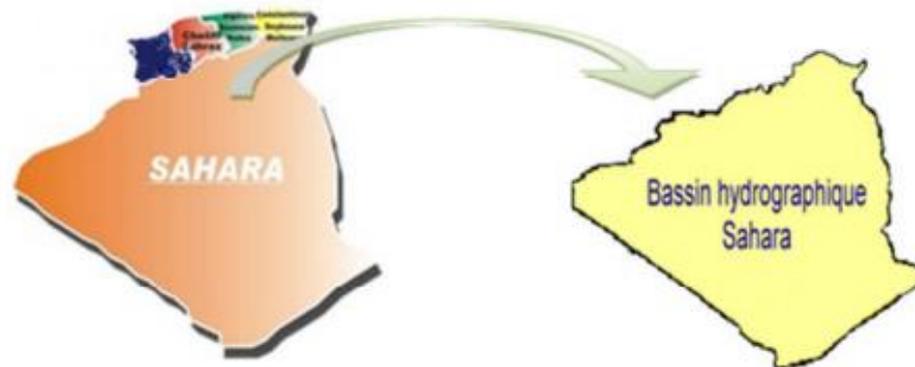


Fig.III.3. Région hydrographique du Sahara.

##### III.4.2.1. Ressources superficielles dans la région hydrographique du Sahara

Le bassin hydrographique du Sahara couvre une superficie de 2 018 054 km<sup>2</sup> (Figure III.3) et une population de 3,5 millions habitants regroupés dans 264 communes.

Les températures élevées peuvent dépasser les 45°C, accusant des amplitudes thermiques significatives et également par une faible humidité relative de l'air. L'eau au Sahara est un facteur primordial pour tout développement des activités humaines. L'agriculture dans les

régions sahariennes constitue l'activité principale, elle implique la valorisation des ressources hydrauliques (voir Tableau III.2).

**Tableau.III.2.** Potentialité en eau superficielle du bassin du Sahara.

Bassins versants	Superficie	Apport période globale (hm <sup>3</sup> /an)	Apport période sèche (hm <sup>3</sup> /an)
Sahara	100000	320	200
Chott Melrhir	68750	300	240

Les barrages en exploitation de la région hydrographique du Sahara [14], sont illustrés au niveau du Tableau.III.3.

**Tableau.III.3.** Barrage en exploitation (Bassin du Sahara).

Barrage	Wilaya	Type ouvrage	Année mise en service	Capacité initiale (Hm3)
Djorf-Torba	Bechar	Poids	1969	350
Brézina	El Bayadh	Poids	2000	122,5
F.E.Gherza	Biskra	Poids	1950	47
F.D.Gazelles	Biskra	Terre	2000	55,5

#### III.4.2.2. Les eaux souterraines dans le sud Algérien

Le sud du pays se caractérise par la présence des nappes phréatiques, souvent saumâtres, localisé dans les lits d'Oueds (Oued Ghir, M'zab, Saoura etc.) dont le potentiel se trouve dans les nappes du Sahara septentrional. Le système aquifère du Sahara septentrional désigne la superposition de deux principales couches aquifères profondes: La nappe Albienne du complexe terminal et la nappe Albienne du continental intercalaire qui est la plus étendue et la plus profondes. Cette dernière couvre une superficie de plus de 10 millions de km<sup>2</sup>, répartie entre les trois pays (Algérie–Tunisie et la Libye) (voir figure III.4 et III.5). C'est une nappe fossile appelée nappe Albienne estimée à 60 000 milliards de m<sup>3</sup>, soit l'équivalent de 12 000 fois la capacité de nos barrages actuels mais malheureusement ces eaux ne sont pas renouvelables.

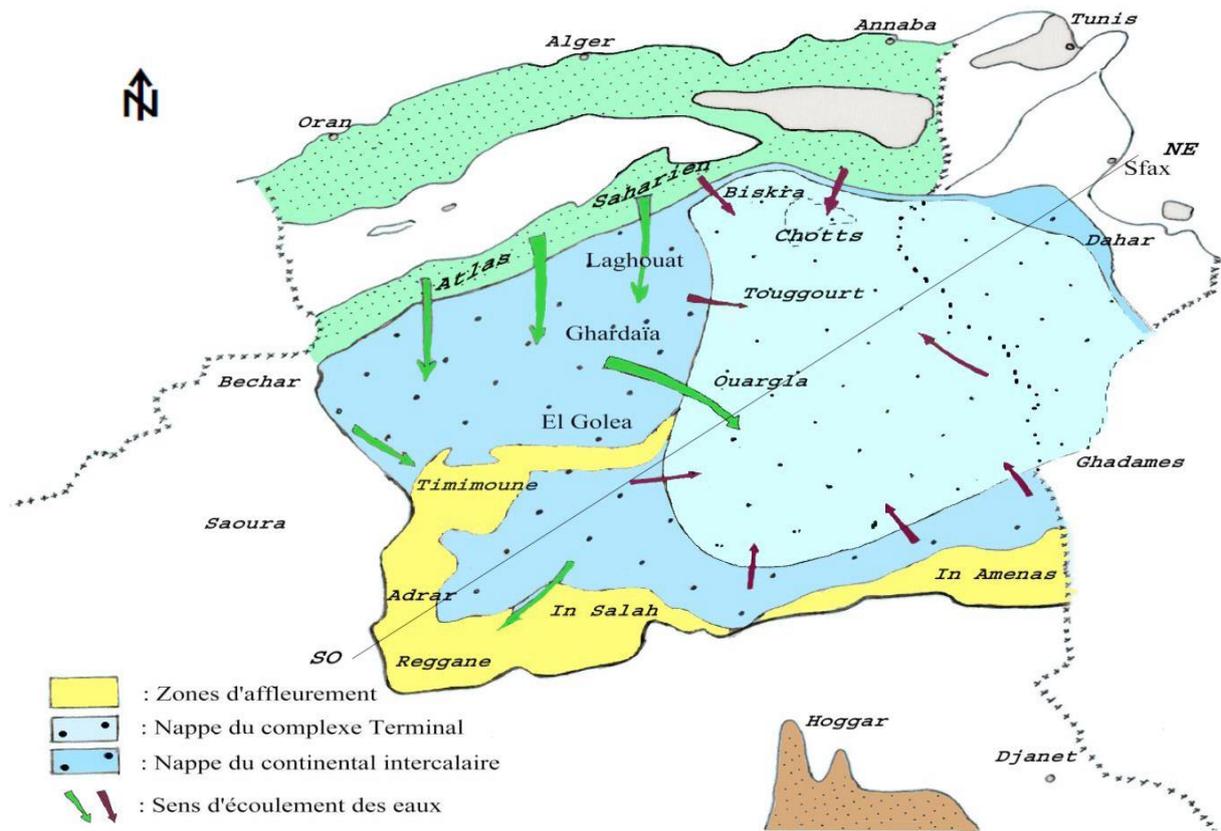


Fig.III.4. Limites hydrographiques des nappes Complexes Terminales (CT) et du Contiental intercalaire (CI) dans la nappe Albienne.[16]

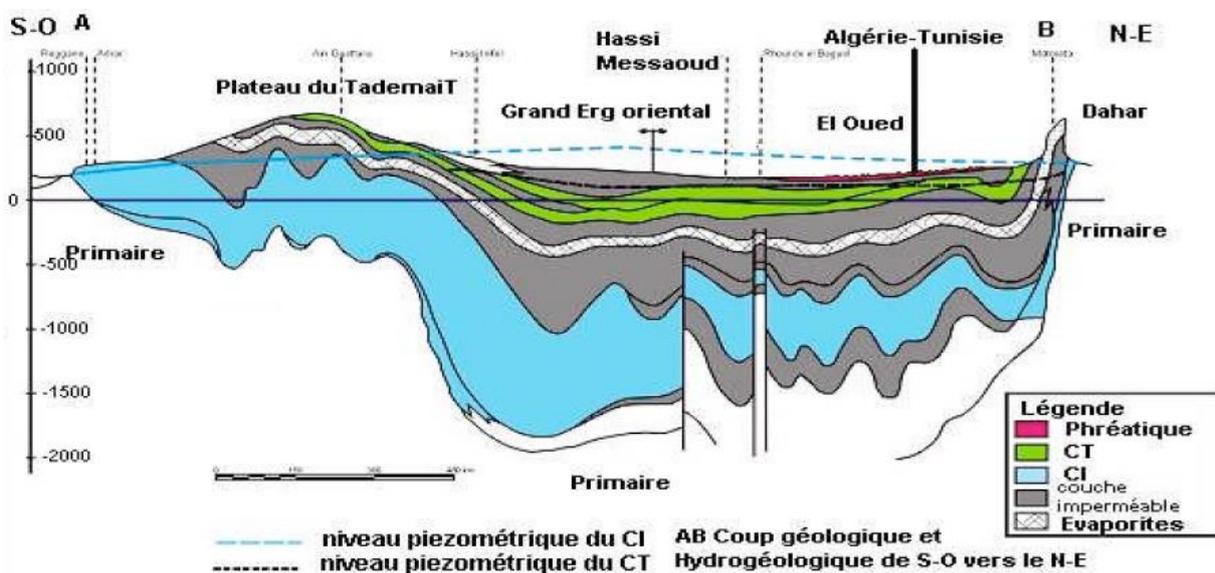


Fig.III.5. Coupe géologique du Sahara Septentrional [16]

On note l'existence d'autres nappes dans le sud, de capacités moins importantes par rapport a celles du complexe terminal du continental intercalaire. On cite comme exemple (Tableau.III.4).

**Tableau.III.4.** Nappes dans le sud algérien [17].

Région	Nappes
<b>Adrar</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nappe de Combro- Ordovicien (30 à 130m).</li> <li>- Nappe de Devonien inferieur Leur alimentation est assurée par l'oued Imraguen.</li> </ul>
<b>Biskra</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nappe phréatique du quaternaire (30 a 40m) : Constituée de sable ; galets et argiles.</li> <li>- Nappe des calcaires de l'Eocène (40 a 50m) : Ils sont alimentés par précipitation et la nappe une est alimentée par la nappe des calcaires sous -jacents (la nappe de Tolga).</li> <li>- Nappe alluviale (bonne perméabilité (40m).</li> <li>- Nappe artésienne de l'Éocène (150m)</li> </ul>
<b>Ilizi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nappe des alluvions de l'oued Illizi.</li> <li>- Nappe des grés du Dévonien Inferieur (400m).</li> </ul>

### III.4.3. Eaux non conventionnelles

La technologie de production d'eau potable à partir de l'humidité de l'air se positionne dans cette famille de sources d'eau non-conventionnelle. Dans cette partie, nous présentons les autres sources d'eau non-conventionnelles qui sont utilisés actuellement en Algérie.

#### III.4.3.1. Dessalement de l'eau de mer

Le dessalement de l'eau (également appelé dessalage ou désalinisation) est un processus qui permet d'obtenir de l'eau douce (potable ou, plus rarement en raison du coût, utilisable pour l'irrigation) à partir d'une eau saumâtre ou salée (eau de mer notamment).

L'Algérie a développé un programme ambitieux dans le domaine de dessalement des eaux de mer en mettant en place, en premier lieu, 23 stations «Monobloc» avec une capacité de 57,5 m<sup>3</sup>/d, réparties sur un littorale qui s'étale sur plus de 1200 Km de long. Ajouté à cette phase d'essai, 14 grandes stations avec une capacité totale de 1,940,000 m<sup>3</sup>/j ont été réalisées entre 2003 et 2011 (voir Tableau III.5). Notons que la plus grande station a été mise en service en Avril 2015 avec une capacité de 500,000 m<sup>3</sup>/j, il s'agit de la station de Magtaâ (Mostaganem province). Selon les experts, la production d'eau par dessalement de l'eau de mer en Algérie, passe de 500,000 m<sup>3</sup>/j en 2008, 1.1 million m<sup>3</sup>/j en 2009 et 2.26 million m<sup>3</sup>/j en 2011 à 2.580.000 en 2020 [18].

**Tableau.III.5.** Grandes stations de dessalement de l'eau de mer en Algérie réalisée entre 2003-2011.

Nom	Wilaya	Année de mise en service	Capacité (m <sup>3</sup> /j)
<b>Kahrama Arzew</b>	Oran	2005	90000
<b>El Hamma</b>	Alger	2008	200000
<b>Skikda</b>	Skikda	2009	100000
<b>Beni-Saf</b>	Ain Temouchent	2009	200000
<b>Mostaganem</b>	Mostaganem	2010	200000
<b>Honaine</b>	Tlemcen	2010	200000
<b>Ouled Ben Ayad</b>	Tlemcen	2010	200000
<b>Douaouda</b>	Alger	2010	120000
<b>Cap Djenet</b>	Boumerdes	2010	100000
<b>Mactaa</b>	Oran	2010	500000
<b>Oued Sebt</b>	Tipaza	2010	100000
<b>Tenès</b>	Chlef	2010	200000
<b>Echatt</b>	Taraf	2011	500000

#### III.4.3.2. Recyclage et réutilisation des eaux usées

Actuellement, l'eau usée traitée provenant des stations d'épuration existantes, lorsque celles-ci sont opérationnelles, est rejetée dans les oueds, mais dans les régions où les besoins en eau ne sont pas satisfaits. Il serait donc illogique de continuer de déverser l'eau traitée dans les oueds. Actuellement le parc d'installation d'épuration se compose de 77 stations (secteur urbain 35, secteur industriel 34, secteur du tourisme 8). Les capacités de traitement installées sont estimées à la fin 1987 à près de 140 millions de m<sup>3</sup>/an. Actuellement, la plupart des stations d'épuration sont à l'arrêt pour diverses raisons, notamment celle concernant la maintenance. Etant donnée la situation critique que vit l'Algérie en matière de ressources en eau, nous sommes dans l'obligation de trouver des solutions rapides à ces stations, car, si dans un passé non lointain, la ressource en eau non conventionnelle en Algérie était évoquée très timidement, aujourd'hui elle devient une solution alternative aux ressources conventionnelles qui se font de plus en plus rares. En considérant les rejets en milieu urbain, de l'ordre de 75% des débits consommés, les volumes d'eaux usées rejetées à travers les réseaux d'assainissement ont été évalués à 350 millions de m<sup>3</sup> en 1979 et 660 millions de m<sup>3</sup> en 1985. Les prévisions de rejet d'eaux usées des agglomérations urbaines sont évaluées à près de 1300 millions de m<sup>3</sup> en 2020.

### III.4.4 Mega Projet de la ligne de transfert In Salah- Tamanraset [19]

Dans le cadre de notre étude, il est également très important de connaître les nouveaux projets structurants dont l'Algérie s'est dotée ces dernières années en termes de distribution d'eau, parmi lesquels le Méga Projet de la ligne de transfert In Salah-Tamanraset qui fut un véritable challenge à l'échelle mondiale (inauguré en 2011) et qui permet actuellement d'acheminer de grandes quantités d'eau sur une distance de 750 kilomètre traversant les zones les plus chaudes de la planète (voir figure III.6). De ce fait le choix du lieu de notre cas d'étude doit être assez éloignée de cette ligne de transfert pour rentabiliser l'investissement, c'est pour cette raison que nous prenons comme cas d'étude la ville de Tindouf située au sud-ouest.



**Fig.III.6.** Ligne de transfert d'eau d'In Salah à Tamanraset totalisant 750 km.

#### III.4.4.1. Impact

Alimentation en eau potable de In Salah – Tamanraset ainsi que des localités situées sur le couloir qui comprend les localités suivantes : Arak, Tesnou/Moulay Lahsen, In Ecker, Imlaoulaoune, In Amguel, Tit, Outoul, Tilak, Carfour Abalessa, Abalessa, Silet et Amsel. Population ciblée à l'horizon 2050 : 400 000 habitants. Production d'eau à l'horizon 2050 : 100 000 m<sup>3</sup>/j. [19]

#### III.4.4.2. Description du système [19]

Le système de transfert In Salah-Tamanraset, inauguré le 5 avril 2011, est constitué d'amont en aval des ouvrages suivants :

- Un champ captant n°1, situé à 70 km au Nord de In Salah, comprenant 24 forages de 600 mètres de profondeur chacun et étalé sur une superficie de 15 Km<sup>2</sup>. Ce champ est en exploitation depuis avril 2011 avec un débit moyen de 25 000 m<sup>3</sup>/jour sur un potentiel de 70 000 m<sup>3</sup> /jour;

- Un champ captant n°2, comprenant 24 forages de 450 mètres de profondeur chacun : en cours de réalisation
- 25 piézomètres pour la surveillance de la nappe ;
- Un réservoir de tête d'une capacité de 50.000 m<sup>3</sup> ;
- Une station de déminéralisation implantée au niveau du champ captant n°1 avec une capacité de 50.000 m<sup>3</sup>/jour extensible à 100.000 m<sup>3</sup>/j (en cours de lancement) ;
- Une adduction de plus de 1.200 Km de conduites de diamètres compris entre 1.400 mm et 700 mm, reliant le champ captant n°1 au réservoir terminal de Tamanrasset sur une distance de 750 km ;
- Six (6) stations de pompage comprenant chacune : – Trois (03) groupes motopompes (2 de service et 1 de secours), d'une capacité unitaire de refoulement de 2.080 m<sup>3</sup>/h (578 l/s) ; – Deux (02) groupes électrogènes de puissance 1.000 KVA chacun ; – Deux (02) réservoirs d'une capacité de 2.000 m<sup>3</sup> chacun ; – Une (01) installation de stockage de carburant, assurant une autonomie de 28 jours pour une production d'eau de 100.000 m<sup>3</sup>/jour.
- Un (01) réservoir terminal d'une capacité de 50.000 m<sup>3</sup>.
- Un système de télégestion hautement automatisé reliant toutes les installations au centre de contrôle situé à Tamanrasset via des câbles en fibre optique.

### III.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes informations nécessaires au bon choix pour l'emplacement de l'étude technico-économique de l'utilisation de la technologie de production d'eau à partir de l'humidité de l'air par énergie solaire. De ce fait, l'objectif était de trouver une région à la fois très pauvre en ressources hydriques et riche en rayonnement solaire. En effet, nous avons constaté que le nord Algérien présentait assez de ressources hydriques à la fois conventionnelles et non-conventionnelles qui rendent la viabilité du projet sans intérêt. Par contre au sud Algérien, mis à part la grande nappe Albienne qui a un potentiel d'exploitation très important, et la ligne centrale In Salah-Tamanrasset qui achemine les eaux de la nappe Albienne, la région du Sud-Ouest s'avère très pauvre en ressources hydriques et assez éloignée de cette ligne de distribution, tout en ayant un gisement solaire des plus importants. De ce fait, le choix de notre étude s'est fait pour la région de Tindouf (sud-ouest frontalière), comme ville test pour l'implantation de cette nouvelle technologie, et cette étude fera l'objet du chapitre suivant.

## Références

- [1] Kadi, A. (1997). La gestion de l'eau en Algérie. *Hydrological sciences journal*, 42(2), 191-197.
- [2] United Nations. (2010). Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat. *World Population Prospects*.
- [3] KHELIL, M. (2015). Changements climatiques et ressources en eau en Algérie Vulnérabilité, impact et stratégie d'adaptation. *LARHYSS Journal ISSN 1112-3680*, (21), 15-23.
- [4] Remini, B. (2010). La problématique de l'eau en Algérie du Nord. *LARHYSS Journal ISSN 1112-3680*, (8).
- [5] Bordet, J. (2007). L'eau dans son environnement rural. *Assainissement des agglomérations. Paris: Johanet*.
- [6] Derradji, F., Bousnoubra, H., Kherici, N., Romeo, M., & Caruba, R. (2007). Impact de la pollution organique sur la qualité des eaux superficielles dans le Nord-Est algérien. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 18(1), 23-27.
- [7] Curmi, P., Bidois, J., Bourrié, G., Cheverry, C., Durand, P., Gascuel-Oudou, C., & Mérot, P. (1997). Rôle du sol sur la circulation et la qualité des eaux au sein de paysages présentant un domaine hydromorphe. *Etude et gestion des sols*, 4, 95-114.
- [8] Dahmani, B., & Bithorel, C. (2001). Déminéralisation des eaux saumâtres de Brédéah dans la région du bassin hydrographique Oranie—Chott—Chergui Partie I: Hydrogéologie de la nappe de Brédéah. *Desalination*, 137(1-3), 297-309.
- [9] Agence du Bassin Hydrographique Oranie – Chott Chergui (2006) « Cadastre hydraulique du Bassin Macta, Tafna et du côtier Dahra quatrième partie ».
- [10] Agence du Bassin Hydrographique Cheliff Zahrez (2004). « Cadastre hydraulique du bassin hydrographique du Cheliff aval du barrage de Boughzoul (Bas Cheliff et Mina) et Chellif-amont de Boughzoulç)».
- [11] Agence du Bassin Hydrographique Cheliff Zahrez (Mars 2010) « Rapport de synthèse abrégé du plan directeur d'aménagement des ressources en eaux».
- [12] Agence du Bassin Hydrographique Algérois -Hodna – Soummam (N° 01 Mai 2002). « Les carnets de l'agence'.Le bassin de l'Algérois , Le bassin du Hodna et Le bassin de la Soummam».
- [13] Agence de Bassin Hydrographique, A. A. Constantinois-Seybouse-Mellegue (2009).

- [14] Agence du Bassin Hydrographique Sahara (Décembre 2006), «Cadastre hydraulique du bassin hydrographique du Sahara septentrional».
- [15] ANRH, (Année 84/85) « Annuaire hydrologique de l'Algérie ».
- [16] Cherghi, S., Lamnia, A., (2014). *Cartographie de la Nappe du Complexe Terminal (CT) et celle de la Nappe Continental Intercalaire(CI) avec mise en place d'un réseau de surveillance sous (SIG)* (Master en Forage des puits d'eau ).
- [17] Kettab, A. (2001). Les ressources en eau en Algérie: stratégies, enjeux et vision. *Desalination*, 136(1-3), 25-33.
- [18] Amitouche, M., (2016) *Impact des rejets des stations de dessalement sur le milieu récepteur*. (Thèse de Doctorat en Hydraulique-Biskra).
- [19] Ministère des ressources en eau : <http://www.mree.gov.dz/>
- [20] Saïdi, F. C. (2001). Alger: des inégalités dans l'accès à l'eau. *Revue Tiers Monde*, 305-315.
- [21] Bouguerra, M. L. (2003). *Les batailles de l'eau: pour un bien commun de l'humanité* (Vol. 7). Editions d'en bas.
- [22] Remini, B. (2010). La problématique de l'eau en Algérie du Nord. *LARHYSS Journal ISSN 1112-3680*, (8).

# **CHAPITRE IV**

**Etude technico-économique de la  
production d'eau potable à partir de  
l'humidité de l'air et de l'énergie solaire  
pour la ville de Tindouf.**

### IV.1. Introduction

Les sources en eau potable sont, dans la région de Tindouf, très rares à cause de la très faible pluviométrie de la région (climat très chaud et sec) , de son éloignement de la nappe Albienne mais aussi de son éloignement de la ligne de transfert d'eau In Salah-Tamanrasset (voir conclusion du chapitre III). De ce fait, dans ce chapitre nous proposons de faire une étude technico-économique de la production de l'eau potable à partir de l'humidité de l'air et de l'énergie solaire par le biais d'une technologie déjà sur le marché qui est *Zero Mass Water®* (**ZMW®**) et qui est justement adaptée pour les conditions d'humidité très basse. Le but final est de savoir, en l'état actuel du marché de cette technologie, si son implémentation pour la population s'avère être un choix viable économiquement au regard du confort qu'elle procure au quotidien.

### IV.2. Localisation géographique de Tindouf

La Wilaya de Tindouf occupe une position géostratégique sur la partie Sud- Ouest de l'Algérie et s'étend sur une superficie de 158,874 km<sup>2</sup> [1] représentant 6,67 % de la superficie totale du Territoire National. Elle est limitée au nord par le Maroc, au nord-est par la wilaya de Béchar, à l'ouest par le territoire du Sahara occidental, à l'est par la wilaya d'Adrar et au sud par la Mauritanie.



**Fig.IV.1.** Situation géographique de la wilaya de Tindouf.

### IV.3. La démographie

La population de Tindouf augmente rapidement et est estimée à 83314 habitants en 2018 [2], la Figure IV.2 montre son évolution dans le temps.

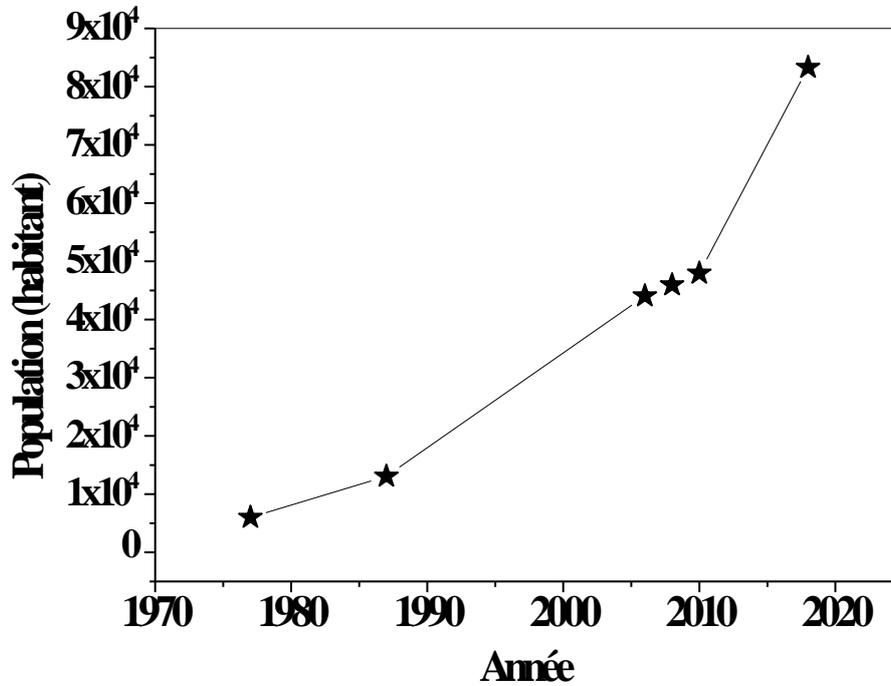


Fig.IV.2. Augmentation démographique de la population de Tindouf.

### IV.4. Le climat

La pluie et la température constituent la charnière du climat. Afin de caractériser le climat de notre zone d'étude, nous avons exploité des données météorologiques.

#### IV.4.1. Température et précipitation annuelle mensuelles

Les précipitations constituent avec la température les éléments les plus importants qui définissent le climat. Le tableau IV.1, ci-dessous, donne la pluviométrie moyenne mensuelle et la température de la région de Tindouf.

Tableau.IV.1. Données climatique du site de Tindouf [3].

Mois	Température minimale moyenne (°C)	Température moyenne (°C)	Température maximale moyenne (°C)	Précipitations (mm)
Janvier	6,2	14	21,7	3
Février	9,9	17,7	25,6	5
Mars	13,4	20,9	28,3	2
Avril	16,6	24,4	32,2	1
Mai	21,7	29,7	37,7	0
Juin	26,8	34,9	42,9	0
Juillet	28,1	36,8	45,5	0
Aout	27,5	36,1	44,6	1
Septembre	24,3	32,5	40,8	6
Octobre	18,8	26,8	34,7	2
Novembre	12,2	19,1	26,1	3
Décembre	6,8	14,3	21,8	4
Année	17,69	25,59	33,49	27

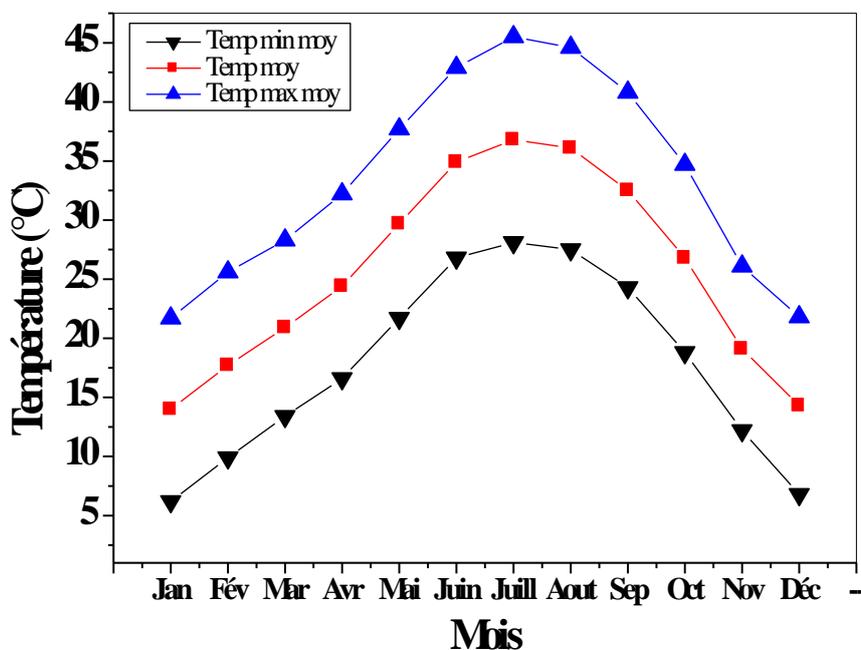
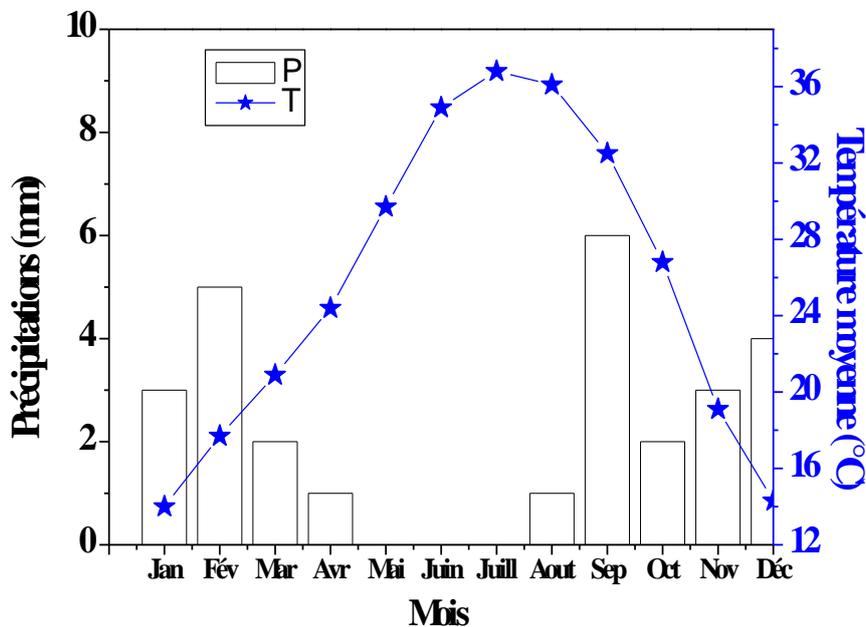


Fig.IV.3. Variation saisonnière des températures au site de Tindouf.

Les courbes de température présentées à la Figure III.3, montrent les variations saisonnières de la température moyenne, Température minimale moyenne, et Température maximale moyenne à Tindouf.

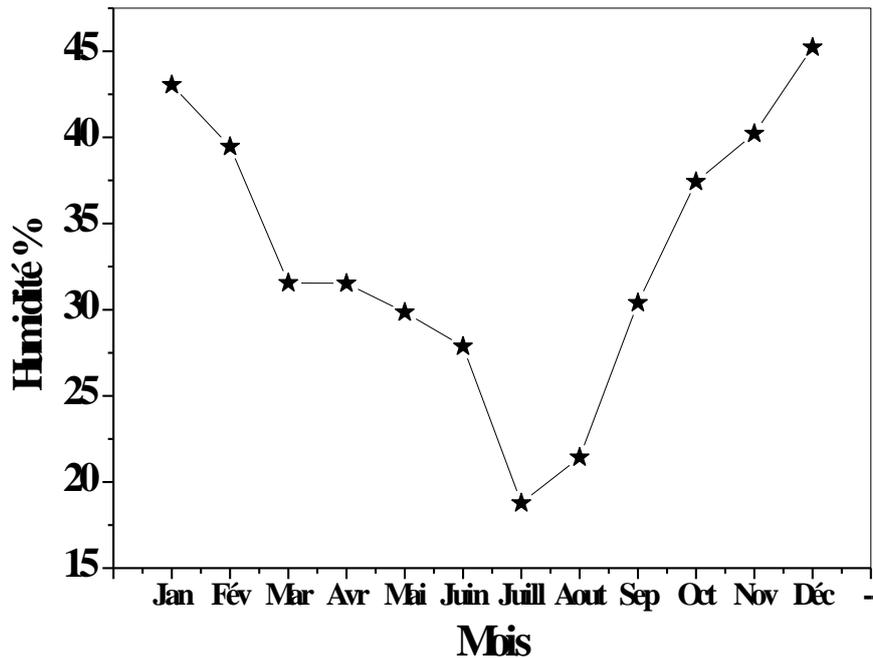
Une période est considérée sèche lorsque  $P \leq 2T$ , sachant que : P, Précipitations moyennes mensuelles en mm et T, températures moyennes mensuelles en °C. La Fig.IV.4 est une représentation graphique qui permet de déterminer la suite successive des mois secs, donc les périodes sèches et humides de l'année.



**Fig.IV.4.** Les variations saisonnières de la précipitation et température moyennes mensuelles.

#### IV.4.2. Humidité atmosphérique

L'humidité relative de l'air, reste très faible dans la région de Tindouf. L'analyse des Mois données de la Figure (IV.5), fait ressortir un maximum en humidité moyenne en hiver, durant le mois de décembre avec 45,23% et un minimum en été, durant le mois de juillet avec 18,78%. Cette valeur peut tomber jusqu'à 4 %. D'après le même auteur, l'humidité relative de l'air est naturellement plus forte en hiver qu'en été et la nuit que le jour. Nous signalons également que, la région de Tindouf enregistre un taux d'humidité annuel aux alentours de 30% [4].

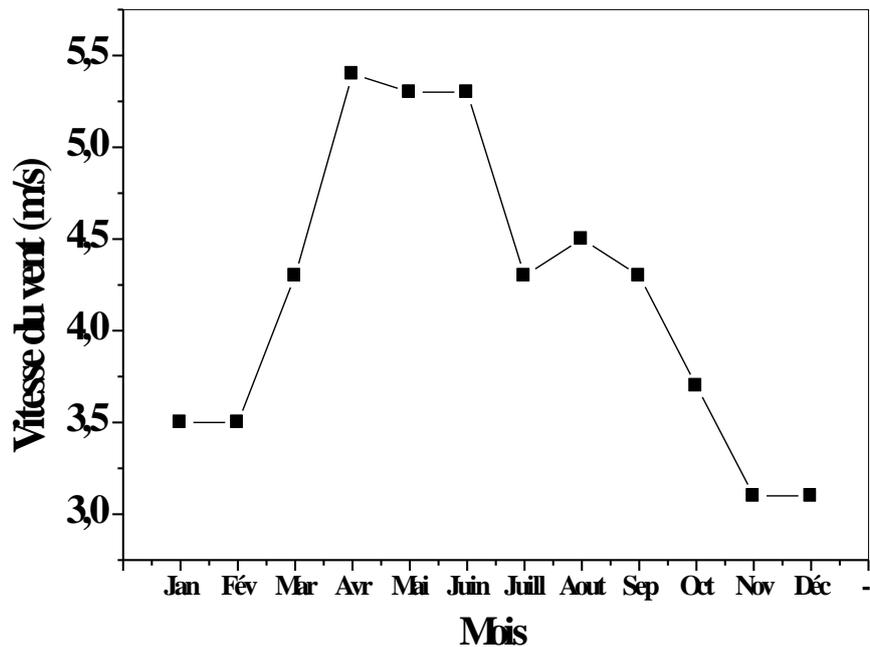


**FigIV.5.** Variation de l'humidité relative moyenne mensuelle de l'air dans la région de Tindouf.

De telles courbes et diagrammes aident à dimensionner le système à base de la technologie ZMW® puisque le rendement de production de l'eau dépend fortement de l'humidité. Il est toutefois à noter que le point fort de cette technologie, contrairement à toutes les autres qui tirent l'eau à partir de l'humidité de l'air, c'est qu'elle réussit à produire de l'eau avec un rendement respectable dans les conditions d'humidités les plus sèches (3 litres par jour par panneau pour une humidité relative de 20% seulement).

#### IV.4.3. Le vent

La figure IV.6 représente la distribution moyenne mensuelle de la vitesse du vent sur le site de Tindouf [5], à une hauteur de 10 m du sol. On remarque, sur cette figure, que le site de Tindouf est caractérisé par des variations mensuelles énormes



**FigIV.6.** Variation mensuelle de la moyenne du vent pour le site de Tindouf.

#### IV.4.4 Indice d'aridité

Le géographe DEMARTONE a défini en 1929 son indice d'aridité (I) en se basant sur la combinaison des régimes thermique et hygrométrique selon la formule suivante :

$$I = P / (T+10) \quad (IV.1)$$

P : la pluviosité moyenne annuelle en (mm) et T : la température moyenne annuelle en (°C). Cet indice est compris entre 0 et 55 (Tableau ci-dessous).

**Tableau.IV.2** Les différents types de climat selon l'indice d'aridité de Demartone [6].

Valeur de l'indice	Type de climat
$0 < I < 5$	Hyper aride
$5 < I < 10$	Aride
$10 < I < 20$	Semi-aride
$20 < I < 30$	Semi-humide
$30 < I < 55$	Humide

Pour la région de Tindouf ( $P = 27$  mm et  $T = 25$  °C), l'indice d'aridité de DEMARTONE est égal à 0,77. Selon cet indice, le climat de Tindouf est hyper aride (désert absolu).

Tindouf a un climat désertique chaud typique de la zone saharienne hyperaride, c'est-à-dire du cœur du Sahara, avec des étés très longs et extrêmement chauds et des hivers courts et modérément chauds. Le climat y est largement hyperaride avec un indice d'aridité égale à 0,77. La sécheresse y est encore plus accentuée durant l'été où l'on enregistre 0 mm de précipitations entre mai et juillet.

À des occasions exceptionnelles, des orages violents peuvent se produire à cause de masses d'air plus frais venant du nord qui rencontre les masses d'air brûlant venues directement du désert surchauffé pendant la journée. En été, la chaleur est extrême et prend un caractère persistant : Les températures sont très agréables et élevées en hiver mais seulement la journée car dans les étendues désertiques, il n'y a rien pour retenir la chaleur, et les températures minimales moyennes avoisinent 5 °C. Le ciel est dégagé et clair toute l'année et les journées couvertes restent très rares, si existantes. La température moyenne journalière annuelle avoisine 25 °C à Tindouf.

La différence de précipitations entre le mois le plus sec et le mois le plus humide est de 6 mm. Entre la température la plus basse et la plus élevée de l'année, la différence est de 21.8 °C. Le mois le plus chaud de l'année est celui de Juillet avec une température moyenne de 36.2 °C. Au mois de Janvier, la température moyenne est de 14°C. Janvier est de ce fait le mois le plus froid de l'année.

Pour toutes ces raisons, le choix de la technologie ZMW® est le mieux adapté parmi toutes les technologies de production de l'eau à partir de l'humidité, puisque cette technologie est capable de produire de l'eau avec un rendement respectable même dans les conditions de sécheresses les plus fortes, alors que d'autres technologies ne sont même pas capable de produire de l'eau dans ces mêmes conditions.

#### **IV.5. Les besoins en eau potable**

L'eau est le principal constituant du corps humain. La quantité d'eau contenue dans un organisme adulte est d'environ 65 % de notre poids. La teneur en eau du corps humain varie en fonction de la corpulence, du sexe et de l'âge.

Le corps humain élimine sans cesse de l'eau par : les excréments (principalement l'urine), la respiration (au moment de l'expiration), et par la transpiration. Les quantités d'eau perdues varient en fonction de la chaleur extérieure et des activités physiques.

Pour remplacer ces pertes et éviter la déshydratation, l'être humain doit donc boire régulièrement environ de 2, 5 litres par jour [7]: un litre par les aliments et 1,5 litre par les boissons.

#### IV.6. Dimensionnement de la technologie ZMW® et analyse économique

Dans le chapitre II on a vu que chaque panneau nous donne à peu près 3L/jours dans les faibles conditions d'humidité (20%).

D'après ces données et les besoins en eau potable on a calculé les besoins pour chaque maison de ces panneaux. Le tableau ci-dessus montre le nombre des panneaux nécessaires.

**Tableau.IV.3.** Comparaison des frais pour différente famille.

Nombre de membres de la famille	Les besoins de l'eau par jours	Les frais par jours	Les frais par année	Le nombre des panneaux nécessaires	Les frais des panneaux en dollars	Les frais des panneaux en dinars
Une famille de 6 personnes	9L	315 DA	114975 DA	3 panneaux	6000 dollars	698672.67 DA
Une famille de 4 personnes	6L	210 DA	76650 DA	2 panneaux	4000 dollars	465781.78 DA
Une famille de 2 personnes	3L	105 DA	38325 DA	1 panneau	2000 dollars	232890.89 DA

Au vu du prix assez cher du panneau qui coûte 2000 US\$, on est tenté de penser que le choix d'acheter de l'eau en bouteille coûte moins cher à long terme que l'investissement pour un tel panneau. Allons voir de plus près de quoi il en est en traçant les frais en fonction du temps pour les deux sources d'eaux potables (en bouteille et par le panneau ZMW®), et voyant quelle est la source la plus économique à long terme.

A première vue quand on constate que chaque panneau coûte 2000 dollars, on a tendance à penser qu'il est très cher et que le choix d'acheter l'eau en bouteille sera plus économique que d'installer ce panneau, mais cette étude nous montre de quoi il en est réellement, quelle est la source d'eau potable la plus économique à long terme, comme il est montré dans les figures IV.7, IV.8 et IV.9.

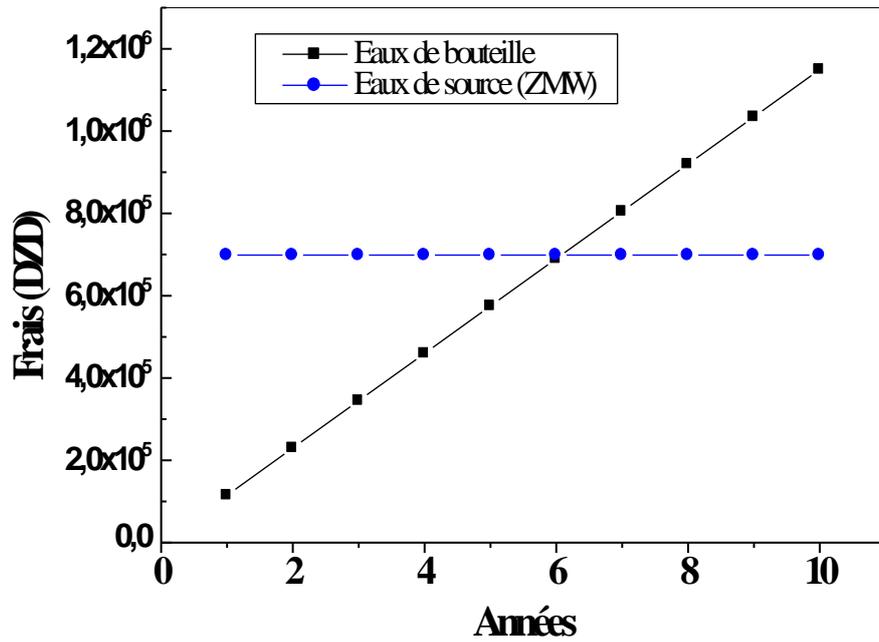


Fig.IV.7. La différence des frais d'eau pour une famille de 6 personnes.

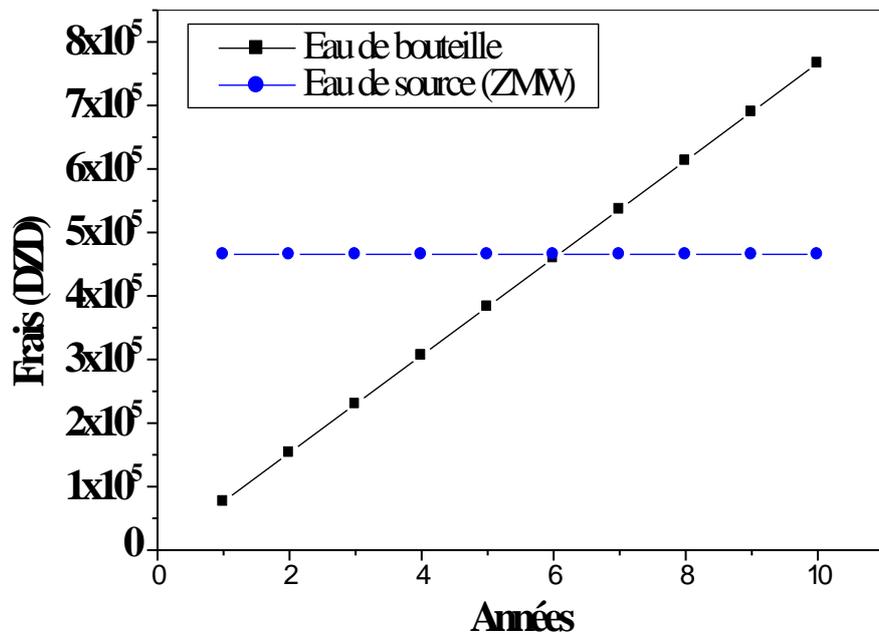
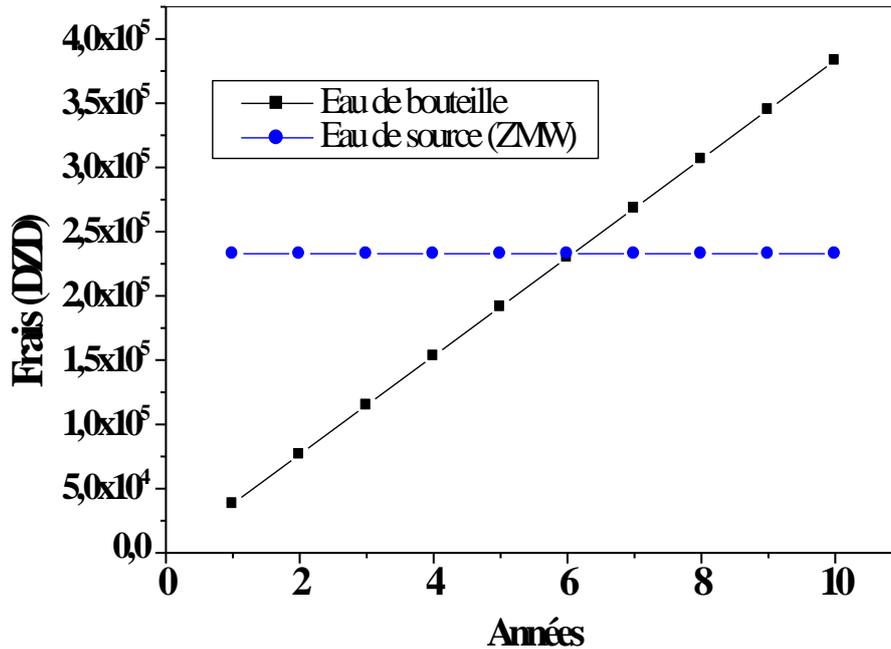


Fig.IV.8. La différence des frais pour une famille de 4 personnes.



**Fig.IV.9.** La différence des frais pour une famille de 2 personnes

D'après les Figures IV.7, IV.8 et IV.9, on remarque que malgré que la technologie ZMW® soit chère au début, au bout de six ans elle deviendra beaucoup moins chère et vous aurez sur votre toit une source d'eau gratuite de « zéro mass water » après les six premières années, et ceci dans les conditions d'humidité minimale (20%). Donc cette étude comparative des frais de l'eau potable nous montre que l'installation du panneau ZMW® est beaucoup mieux du côté économique. Ajouté à cela un argument de taille, cette durée d'amortissement calculée à 6 ans pour le coût actuel de cette technologie (2000US\$) peut être beaucoup moins si le marché de cette technologie connaîtra une maturation qui amènera naturellement le prix du panneau vers le bas. Supposant qu'après un certain temps, le prix du panneau tombe à 1000\$ (divisé par 2) par l'effet de démocratisation de cette technologie, par conséquent la courbe horizontale des figures IV.7, IV.8 et IV.9 va être plus basse donnant un point d'intersection avec la courbe des frais de l'eau en bouteille aux alentours de 3 ans, donc le temps d'amortissement sera lui aussi directement proportionnel au prix de cette technologie et sera lui aussi divisé par 2 (3 ans).

Ajouté à cela, ne pas oublier que cette étude a été menée pour des conditions d'humidité minimale (20%) dans lesquelles les performances du panneau ont été communiqué par le

fabriquant, alors que nous avons vu que le taux d'humidité annuelle de la région de Tindouf est de 30% , ce qui amènera une production d'eau plus grande que 3L/jours par panneau, hélas nous n'avons pas la courbe d'étalonnage exact du rendement avec l'humidité, pour l'avoir il faut soit que le fabriquant les communique ou bien faire des simulations à partir du modèle présenté dans le chapitre II, chose que nous n'avons pas eu le temps de faire. De ce fait, ceci se répercutera lui aussi sur le temps d'amortissement qui sera encore plus court.

Enfin ne pas oublier que cette étude comparative avec l'eau en bouteille a été effectuée avec le prix d'une bouteille minérale en Algérie qui est nécessairement moins cher que le prix réel, vu les subventions de toutes natures, notamment celles du carburant qui est nécessaire au transport de ces bouteilles jusqu'au lieu de consommation (Tindouf).

Cette technologie permet de produire des molécules de H<sub>2</sub>O pure puis les minéralise pour les rendre comestibles, en les dotant que des minéraux nécessaires au corps humain. Vous pouvez modifier la concentration des minéraux dans l'eau, tout dépend de votre demande, contrairement aux eaux des bouteilles et les eaux des robinets qui ont une composition en minéraux qui n'est pas forcément celle dont notre corps a besoin, en plus du problème de sa pollution. En effet, l'argument fort de cette technologie par rapport aux eaux du réseau publique et des eaux en bouteille plastique, nous somme assurée d'avoir une eau de qualité exempte de métaux lourds, de fluor, de bis-phénole A ou de pesticides, ce qui assure une bonne santé au consommateur à long terme. Dans la partie suivante nous énumérons les maladies hydriques qui peuvent être tous évitées en faisant le choix de cette technologie.

#### **IV.7. Les maladies hydriques**

Il s'agit en premier lieu des « maladies hydriques » qui sont provoquées par de l'eau contaminée par des déchets humains, animaux ou chimiques. Elles comprennent entre autres le choléra, la typhoïde, la polio, la méningite, l'hépatite A et E, et la diarrhée.

##### **IV.7.1. Les maladies aquatiques**

Elles sont transmises par des organismes aquatiques qui passent une partie de leur vie dans l'eau et une autre en tant que parasite. Ces maladies sont causées par toute une variété de vers. Ces vers infectent les organismes humains et, sans forcément être mortels, diminuent fortement les capacités physiques. La plus connue de ces maladies est la schistosomiase.

### **IV.7.2. Les risques liés aux composés chimiques**

L'eau de la nature est d'autant moins potable aujourd'hui qu'elle est de plus en plus polluée par des substances rejetées par les sociétés humaines. Or cette pollution est parfois telle que même la qualité de l'eau traitée s'en ressent. Il n'est pas rare qu'une affaire éclate au sujet d'eaux du robinet qui ne respectant pas les normes de sécurité sanitaire.

Si l'eau potable fait l'objet d'une réglementation précise et de contrôles fréquents, les principales inquiétudes portent sur la présence de plomb, de nitrates et de pesticides dans l'eau qui coule de nos robinets.

Certaines substances, comme les métaux lourds, ne sont pas éliminées par l'organisme. Elles s'y accumulent, et leur ingestion prolongée peut être la cause de maladies graves, même si la teneur dans l'eau est faible. Ingérées en grande quantité lors d'une pollution accidentelle, ces mêmes substances sont rapidement toxiques [7].

#### **IV.7.2.1. Le plomb**

Le plomb passe rapidement dans le sang et va perturber de nombreux mécanismes biochimiques, touchant principalement le système nerveux mais aussi d'autres fonctions, comme la reproduction. Les enfants exposés de manière prolongée à de faibles doses de plomb peuvent ainsi développer un saturnisme, une maladie caractérisée par divers troubles pouvant être irréversibles : ceux-ci concernent la croissance, le développement du système nerveux central, le développement intellectuel et le comportement. A plus forte dose, le plomb peut même induire même chez les adultes, et aussi bien chez les hommes que chez les femmes, des troubles de la reproduction, des insuffisances rénales, ou des encéphalopathies. Il peut également fixer se fixer sur les os où il ne sera pas gênant tant qu'il ne sera pas renvoyé dans le sang; or cela peut se produire en particulier chez les femmes enceintes - entraînant une exposition du fœtus, et chez les personnes âgées -qui se retrouvent empoisonnées de manière brutale [8].

Selon les spécialistes, ces inquiétudes ne sont pas forcément justifiées. Pour Bernard Barraqué, chercheur au CNRS, les risques liés au plomb sont insignifiants. Seulement 1% des personnes dont la distribution d'eau est assurée par des tuyaux en plomb y sont exposées. De récents travaux menés par l'INSERM montrent que le taux de plomb dans le sang des personnes qui y sont le plus exposées ne dépasse pas 100 à 200 µg/l alors que le risque de saturnisme si dépasse 800 µg/l.

#### **IV.7.2.2. Les nitrates**

Au delà d'un certain seuil de concentration, les nitrates peuvent engendrer, chez les enfants et surtout les nourrissons très sensibles à une absorption trop importante, un empoisonnement du sang appelé une méthémoglobinémie ou encore maladie bleue. Les nitrates ne sont pas nocifs en soit pour la santé. Mais sous l'action d'une bactérie présente dans le corps humain, ils se transforment en nitrites - qui eux oxydent l'hémoglobine du sang qui ne peut plus fixer l'oxygène et perturbe la respiration cellulaire.

Même à faible concentration, ils peuvent également engendrer à long terme des cancers chez les adultes lorsqu'ils sont associés à certains pesticides avec lesquels ils forment des composés cancérigènes. Le risque demeure difficile à évaluer et les normes actuelles, qui fixent les seuils de concentration des nitrates à 50 mg/l représente une application raisonnable du principe de précaution [9].

#### **IV.8. Conclusion**

Dans ce dernier chapitre nous avons prouvé, calcul à l'appui que le choix de la technologie ZMW® est un choix judicieux économiquement à long terme dans une région désertique sans ressources hydriques importantes et avec un taux d'humidité très bas comme Tindouf, avec une durée d'amortissement de 6 ans (avec les prix actuels) et qui peut être beaucoup moins si le prix de cette technologie baisse avec sa démocratisation. D'autant plus, que cette technologie nous assure une qualité d'eau potable propre qui évite toutes les formes de pollutions d'eau avec leur effets cumulatifs néfastes sur la santé.

## Références

- [1] Guerrak, S., & Chauvel, J. J. (1985). Les mineralisations ferriferes du Sahara Algerien: le gisement de fer oolithique de Mecheri Abdelaziz (bassin de Tindouf). *Mineralium Deposita*, 20(4), 249-259.
- [2] García, R., Blanco, R., Anta, J., Naves, A., & Molinero, J. (2018, January). Plan de seguridad del agua en los Campos de Refugiados Saharais en Tindouf (Argelia). In *Ingeniería del agua* (Vol. 22, No. 1, pp. 37-52). Universitat Politècnica de València.
- [3] Kechairi, R., Ould Safi, M., & Benmahioul, B. (2018). Etude comparative de deux plantations d'Argania spinosa (L.) Skeels (Sapotaceae) dans le Sahara Occidental Algérien (Tindouf et Adrar). *International Journal of Environmental Studies*, 75(2), 294-308.
- [4] Saliha, B. H., Mhammed, B., Ouiza, D., Marwa, H., & Zineb, L. (2018). Caractéristiques physicochimiques et biométriques de quelques variétés de dattes consommées dans la région d'Adrar (Sud-ouest d'Algérie). *Revue El-Wahat*, 10(2), 1-20.
- [5] Maouedj, R., Bousalem, S., & Benyoucef, B. (2008). Optimisation d'un système de pompage éolien Application aux sites sahariens. *Revue des Energies Renouvelables*, 11(2), 239-250.
- [6] Moisselin, J. M., Schneider, M., & Canellas, C. (2002). Les changements climatiques en France au XX<sup>e</sup> siècle. Etude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations.
- [7] Cassis, I. (2010). La santé publique.
- [8] Hodson, P. V., Blunt, B. R., & Spry, D. J. (1978). Chronic toxicity of water-borne and dietary lead to rainbow trout (*Salmo gairdneri*) in Lake Ontario water. *Water Research*, 12(10), 869-878.
- [9] Adam, S., Edoth, P. A., Totin, H., Koumolou, L., Amoussou, E., Aklikokou, K., & Boko, M. (2010). Pesticides et métaux lourds dans l'eau de boisson, les sols et les sédiments de la ceinture cotonnière de Gogounou, Kandi et Banikoara (Bénin). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4(4).

## **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

---

Dans ce mémoire de Master, nous avons essayé d'attirer l'attention sur une nouvelle technologie apparue récemment parmi les autres technologies de production d'eau potable à partir de l'humidité de l'air. Son originalité vient du fait qu'elle exploite l'énergie solaire pour fonctionner même dans les conditions d'humidités les plus défavorables (humidité relative aux alentours de 20%). Un panneau Source® de la technologie Zero Mass Air produit environ 3 litres d'eau douce minéralisée pour un coût avoisinant les 2000US\$ dans les conditions d'humidité de 20%.

De ce fait pour pouvoir juger de l'utilité de cette technologie dans des endroits assez reculés ayant un déficit énorme en ressource hydriques, il est primordial de faire une étude technico-économique pour connaître le taux d'amortissement de cette technologie et pouvoir juger de la viabilité économique d'un tel investissement. Ceci fait l'objet du travail de ce mémoire qui a essayé de répondre modestement à cette question pour un site choisi dans le Sahara Algérien en tenant compte des spécificités locales du site en question (coût de l'eau potable, disponibilité,...).

Nous avons structuré notre travail en quatre chapitres. Le premier fait un état de l'art des différentes technologies existantes dans le marché qui permettent l'extraction de l'eau potable à partir de l'humidité de l'air, en montrant la toute dernière (2017) de l'entreprise Zero Mass Air (Source®) qui permet d'extraire de l'eau même dans les conditions les plus sévères de sécheresse grâce à un matériau innovant, un organométallique MOF-801.

Dans le deuxième chapitre, nous avons passé en revue les principales caractéristiques de la technologie Zero Mass Air, en définissant d'abord les matériaux hygroscopiques tout en donnant un aperçu historique de la famille des matériaux Organométallique. Les principales caractéristiques des matériaux MOF-801 ont été données ainsi qu'un modèle théorique régissant leur fonctionnement a été reporté.

Dans le troisième chapitre, nous avons passé en revue les différentes ressources hydriques en Algérie, où nous avons déduit que le nord Algérien contient assez de ressources naturelles en plus des stations de dessalement. Une bonne partie du Sahara est au-dessus d'une grande nappe Albienne d'eau fossilisée qui est un potentiel énorme pour ces régions pour les années à venir. L'état Algérien a même investi un énorme projet d'une ligne de transfert depuis In Salah, là où la nappe Albienne est présente en faisant des forages, jusqu'à Tamanrasset (à 750km), en desservant toutes les localités bordant cette ligne. Il y a cependant quelques régions (surtout au sud ouest) qui n'ont ni nappe profondes ni lignes de transfert, en plus de leur climat

## CONCLUSION GENERALE

---

très sec et très chaud. C'est le cas notamment de Tindouf qui a été choisi comme wilaya d'étude pour l'implantation de cette technologie Source® qui peut être une solution intéressante pour l'autonomie hydrique de ses habitants.

Enfin dans le quatrième et dernier chapitre, nous avons fait une étude technico-économique de l'implantation de la technologie Zero Mass Air en comparant son coût à long terme par rapport à l'approvisionnement en eau potable en bouteille minérale. Le résultat de l'étude a montré un temps d'amortissement de 6 ans si la technologie reste à ce prix (2000US\$), au-delà de 6 ans la production d'eau sera gratuite. Puisque cette technologie est nouvelle (2017), tout laisse à penser que son prix peut être réduit en se démocratisant, ce qui aura pour effet de réduire aussi le temps d'amortissement. Finalement, nous concluons que cette technologie peut être une solution durable pour ces régions.

## Résumé

Dans ce présent travail, on a contribué à l'étude technico-économique de la production de l'eau potable dans une zone pauvre des sources hydrique, et d'après cette étude on vu les différentes technologies qui nous permet de produire de l'eau potable juste avec l'humidité et l'énergie solaire. Et parmi ces technologies en est fait démontré la technologie de zero mass water, car nous avons remarqué une variation dans la répartition de l'eau en Algérie due au climat et différentes conditions.

L'étude montre que le système étudié est le seule moyen que nous pouvons appliquer dans le Site de Tindouf car la recherche argumente que cette zone est la zone la plus sèche avec un climat hyper aride et elle a aussi des conditions qui sont uniquement compatibles avec cette technologie.

**Mot clés :** Eau potable, humidité, Tindouf, sources hydrique.

## Abstract

In this present work, we contributed to the technical-economic study of the production of drinking water in a poor area of water sources, and according to this study we saw the different technologies that allow us to produce water. just drinking water with moisture and solar energy. And among these technologies is demonstrated the technology of zero mass water, because we noticed a variation in the distribution of water in Algeria due to climate and different conditions.

The study shows that the studied system is the only way we can apply in the Tindouf Site because the research argues that this zone is the driest zone with a hyper-arid climate and it also has conditions that are only compatible with this technology.

**Key words:** Drinking water, humidity, Tindouf, water sources.

## الملخص

في هذا العمل الحالي، ساهمنا في الدراسة الفنية والاقتصادية لإنتاج مياه الشرب في منطقة فقيرة من مصادر المياه، ووفقاً لهذه الدراسة، رأينا التقنيات المختلفة التي تسمح لنا بإنتاج المياه. باستغلال الرطوبة والطاقة الشمسية فقط. ومن بين هذه التقنيات درسنا نظام تكنولوجيا صفر مياه، لأننا لاحظنا تبايناً في توزيع المياه في الجزائر بسبب المناخ والظروف المختلفة.

تبين الدراسة أن النظام المدروس هو الطريقة الوحيدة التي يمكن تطبيقها في موقع تندوف لأن البحث يؤكد أن هذه المنطقة هي المنطقة الأكثر جفافاً مع مناخ شديد الجفاف، كما أن لديها شروط متوافقة فقط مع هذه التكنولوجيا.

الكلمات المفتاحية: مياه الشرب، الرطوبة، تندوف، مصادر المياه.