



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

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

**Université KASDI Merbah d'Ouargla**

ooOoo

**Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie Mécanique**

ooOoo

**Mémoire**

**Présenté pour l'obtention du Diplôme de**

**MASTER ACADEMIQUE**

**Filière : Génie Mécanique  
Spécialité : Génie Energétique**

**Thème :**

**Analyse du cycle de vie de production d'électricité à  
base d'hydrogène pour les bâtiments tertiaires**

**Présenté et soutenu publiquement par :**

**BABOU Mohamed Ali**

**BAKHALED Charaf Edinne**

**Devant le jury composé de :**

**Le : 17/ 06 / 2021**

**Mr. GOUAREH Abderrahmane**

**Président**

**Université Kasdi Merbah Ouargla**

**M<sup>me</sup>. RECIOUI Bakhta**

**Examinatrice**

**Université Kasdi Merbah Ouargla**

**M<sup>me</sup>. GHEDAMSI Rebha**

**Encadreur**

**Université Kasdi Merbah Ouargla**

**Promotion : 2021**

**N° ordre : . . . .**

# **Remerciements**

*Louange à Allah, celui qui nous a illuminé le chemin de la science et nous a accordé pour accomplir ce travail.*

*Nous adressons tout d'abord nous remercions les plus sincères au*

*Dr. Madame **Rebha GHEDAMSI**, qui a accepté volontiers d'être la directrice de ce travail.*

*Mes remerciements vont également à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail*

*Nous tenons à exprimer notre gratitude envers l'ensemble des membres de jury qui ont accepté de lire et juger notre travail :*

**Dr. Abderrahmane GOUAREH**

**Dr. Bakhta RECIOUI**

*Enfin, j'aimerai aussi remercier nos chers amis, collègues et tous ceux et elles qui nous ont aidé de près et de loin afin de réaliser ce travail.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail aux deux êtres qui Me sont les plus chères au monde : mon père et Ma mère, que dieu me les garde pour toujours (Inch Allah).*

*A toute la famille.*

*A tous mes enseignants qui m'ont aidé à terminer mon travail À tous mes enseignants dans ma carrière*

*À tous nos enseignants du département de génie mécanique*

*À tous mes amis et en particulier : BRAHIM, OUSSAMA,*

*ABDELBARI, ABDELHAFIDE et CHAHINEZ.*

*Et à tous ceux que je connais de près ou de loin.*

*BABOU Mohamed Ali et BAKHALED Charaf Edinne.*

# Sommaire

Introduction générale :.....	1
Chapitre 1 : Contexte énergétique en Algérie .....	2
1.1. Introduction : .....	3
1.2. Réserves énergétiques des ressources fossiles en Algérie : .....	4
1.3. Synthèse des flux énergétiques (M Tep) année 2019 : .....	5
1.4. Production énergétique en Algérie :.....	7
1.5. Consommation énergétique en Algérie : .....	7
1.5.1 Consommation nationale par forme d'énergie : .....	7
1.5.2 Consommation énergétique national par secteur :.....	8
1.6. Impact environnemental : .....	9
1.7. Energies renouvelables :.....	10
1.8. Energie solaire :.....	10
1.8.1 Photovoltaïque :.....	11
1.8.1.1 Silicium cristallin :.....	12
1.8.1.2 Couches minces :.....	13
1.8.1.3 Cellules organiques :.....	13
1.9. Energie éolienne : .....	14
1.10. Energie hydraulique : .....	15
1.11. Energie biomasse : .....	15
1.12. Energie géothermique : .....	16
1.13. Conclusion :.....	16
Chapitre 2 : Bâtiments et Production d'hydrogène.....	17
2.1. Introduction : .....	18
2.2. Etat de l'art des opérations internationales :.....	19
2.2.1 Bâtiments performants : .....	19
2.2.2 Bâtiments très performants : .....	19
2.2.3 Bâtiments autonomes : .....	19
2.2.4 Bâtiments zéro énergie : .....	20
2.3. Production d'hydrogène :.....	20
2.4. Procédés de production d'hydrogène :.....	20
2.4.1 Production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles :.....	21

2.4.1.1	Production d'hydrogène par vaporeformage :	21
2.4.1.2	Production d'hydrogène par oxydation partielle :	22
2.4.2	Production photo biologique de l'hydrogène :	22
2.4.3	Production d'hydrogène par dissociation de l'eau :	23
2.4.3.1	Cycles thermochimiques :	24
2.4.3.2	Procédés photo électrochimiques :	24
2.4.4	Procédés électrolytiques :	25
2.4.4.1	Electrolyse de l'eau en milieu alcalin :	26
2.4.4.2	Electrolyse acide PEM :	27
2.4.4.3	Electrolyse de la vapeur d'eau :	28
2.5.	Stockage de l'hydrogène :	29
2.6.	Pile à combustible :	30
2.7.	Conclusion :	30
Chapitre 3 : Le potentiel d'intégration d'hydrogène pour les bâtiments tertiaires.....		31
3.1.	Introduction :	32
3.2.	Méthodologie :	32
3.3.	Modélisation du système énergétique :	35
3.3.1	Energie produite par un module photovoltaïque :	35
3.3.2	Energie transférée à l'électrolyseur :	36
3.3.3	Systèmes de stockage de l'hydrogène (SSH) :	36
3.3.4	Pile à combustible :	37
3.3.5	Réseau électrique :	37
3.4.	Analyse environnementale :	37
3.5.	Analyse économique :	37
3.5.1	Coût initial :	38
3.5.2	Coût de maintenance :	39
3.5.3	Coût de renouvellement des composants :	39
3.5.4	Résultats et discussion :	41
3.6.	Conclusion :	48
Conclusion générale :		50
Bibliographie :		52

# Nomenclature

Normales	Définition	Unité
$A_s$	Economies d'énergie annuelles	$m^2$
$C_{con}$	Coût initial du convertisseur	€/W
$C_E$	Coût énergétique annuel nécessaire pour maintenir le confort à l'intérieur du bâtiment	€/W
$C_{el}$	Coût initial de l'électrolyseur	€/W
$C_i$	Coût initial	€/W
$C_g$	Coût global pour toute la durée du fonctionnement	€/W
$C_m$	Coût de maintenance	€/W
$C_{st}$	Coût réservoir d'hydrogène	kJ/kg K
$C_{pi}$	Coût de pile à combustible	€/W
$C_{pv}$	Coût initial du système photovoltaïque,	€/W
$C_r$	Coût de renouvellement des composants	€/W
$C_g$	Le coût global initial de système photovoltaïque	€/W
$E_{com}$	Consommation de l'hôpital	kWh
$E_{con}$	Energie produite par les systèmes conventionnels	kWh
$E_c$	L'énergie consommée par l'Hôpital	kWh/jour
$E_{eff\_regu}$	Efficacité du régulateur de charge des accumulateurs égale à 0.77	-
$E_{elec}$	Energie absorbée par l'électrolyseur	kWh
$E_p$	Energie produit journalier	kWh
$E_{fc}$	Energie électrique délivrée par la source renouvelable	kWh
$E_{pv}$	Energie produite par un module photovoltaïque	kWh
$E_{CO2}$	Emission de CO <sub>2</sub> évitée des systèmes conventionnels	kg
$E_{GES}$	Emission de gaz à effet de serre évitée	kg
$F_E$	Facteur d'émission de CO <sub>2</sub>	kg/kWh
$I$	Taux d'intérêt	-
$I_f$	Irradiation quotidienne moyenne annuelle	kWh/m <sup>2</sup> .jour
$G$	Taux d'inflation	-
$m_{con}$	Pourcentage de maintenance annuel de le convertisseur	%
$m_{el}$	Pourcentage de maintenance annuel de réservoir d'hydrogène	%
$m_{st}$	Pourcentage de maintenance annuel de l'électrolyseur	%
$m_{H2}$	Production annuelle d'hydrogène	kg/an
$m_{pi}$	Pourcentage de maintenance annuel de la pile à combustible	%
$m_{pv}$	Pourcentage de maintenance annuel du système photovoltaïque	%
$N$	Durée de vie du système photovoltaïque et du convertisseur	-
$N_{pi}$	Nombre de le pile à combustible	-
$N_{con}$	Nombre de modules du convertisseur	-

$N_{el}$	Nombre d'électrolyseur	-
$N_n$	Nombre des équipements	-
$N_{st}$	Nombre de réservoir d'hydrogène	-
$P$	Puissance de chaque appareil	W
$P_c$	Puissance crête en Watt crête	Wc
$P_R$	Temps de retour d'investissement	-
$P_{WF}$	Facteur de valeur actuelle du coût de consommation d'énergie€/W	-
$S_T$	Surface totale des panneaux photovoltaïques	m <sup>2</sup>
$ST$	Stockage d'hydrogène	kWh
$S_u$	Surface unitaire des panneaux	m <sup>2</sup>
$t_f$	Durée d'utilisation	-
$N$	Le nombre des panneaux	-
<b>Symboles grecques</b>		
$\eta_p$	Rendement supplémentaire inclus pour tenir compte les pertes d'énergie dans l'électrolyseur	%
$\eta_{reg}$	Efficacité du régulateur de charge des accumulateurs	%
$\eta_{el}$	Efficacité de l'électrolyseur	%
$\eta_{fc}$	Efficacité de la pile à combustible	%

## Abréviation

Abréviation	Définition
<b>BEPOS</b>	Bâtiment à énergie positive
<b>BTP</b>	Bâtiment Travaux Publique
<b>CCV</b>	Coût du cycle de vie
<b>GNL</b>	Gaz naturel liquéfié
<b>GPL</b>	Gaz de pétrole liquéfiés
<b>PV</b>	Photovoltaïque
<b>Tep</b>	Tonne équivalent pétrole
<b>GWh</b>	Giga Watt heure
<b>GIEC</b>	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat
<b>GES</b>	Gaz à effet de serre
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dioxyde de carbone
<b>NH<sub>3</sub></b>	L'ammoniac
<b>PEM</b>	Proton Exchange Membrane
<b>SSH</b>	Systèmes de stockage de l'hydrogène
<b>ISO TC 1974</b>	L'Organisation internationale de normalisation, Comité Technique en 1974

## Liste des figures

Figure 1. 1: Synthèse des flux énergétiques (Mtep) année 2019.....	6
Figure 1. 2: Structure de la production d'énergie primaire.....	7
Figure 1. 3: Consommation nationale par forme d'énergie. ....	8
Figure 1. 4: Consommation nationale par secteur].....	9
Figure 1. 5 : Scénarios d'émissions de GES pour la période 2000-2100 (en l'absence de politiques) .....	10
Figure 1. 6: Energie solaire.....	11
Figure 1. 7: Module photovoltaïque.....	12
Figure 1. 8: Silicium monocristallin et le silicium multi-cristallin. ....	12
Figure 1. 9: Module photovoltaïque amorphe avec des couches très minces. ....	13
Figure 1. 10: Cellule organique. ....	14
Figure 1. 11: Energie éolienne.....	14
Figure 1. 12: Energie hydraulique. ....	15
Figure 1. 13: Energie biomasse. ....	15
Figure 1. 14: Energie géothermique. ....	16
Figure2. 1: Répartition des sources de production d'hydrogène en 2009 . ....	21
Figure2. 2: Trois procédés d'électrolyse de l'eau.....	26
Figure2. 3: Principe de l'électrolyse alcaline . ....	26
Figure2. 4: Electrolyse PEM . ....	28
Figure2. 5: Principe de l'électrolyse à haute température selon le type d'électrolyte. ....	29
Figure2. 6: Principe de fonctionnement d'une pile à combustible. ....	30
Figure 3. 1: Architecture d'hôpital Sidi Abdel Kader-Ouargla.....	33
Figure 3. 2: système de fonctionnement de system d'étude proposé.....	34
Figure 3. 3: Production, consommation d'énergie et le déficit énergétique dans les wilayas. ....	45
Figure 3. 4: Quantité d'hydrogène produite et le nombre des panneaux photovoltaïques pour les sept wilayas. ....	46
Figure 3. 5: Surplus d'hydrogène produit (Kg) et l'énergie exportée (KWh) .....	47

## Liste des tableaux

Tableau 3. 1:Caractéristiques de panneau utilisé. ....	36
Tableau 3. 2:Coûts et la durée de vie des différents composants du système]. ....	40
Tableau 3. 3: Consommation annuelle d'énergie dans l'hôpital, énergie produite annuellement et le déficit énergétique pour la wilaya de Ouargla. ....	41
Tableau 3. 4: Consommation annuelle d'énergie dans l'hôpital, énergie produite annuellement et le déficit énergétique pour la wilaya d'In Salah. ....	41
Tableau 3. 5: Consommation annuelle d'énergie dans l'hôpital, énergie produite annuellement et le déficit énergétique pour la wilaya d'Illizi. ....	42
Tableau 3. 6: Consommation annuelle d'énergie dans l'hôpital, énergie produite annuellement et le déficit énergétique pour la wilaya de El Djelfa. ....	42
Tableau 3. 7: Consommation annuelle d'énergie dans l'hôpital, énergie produite annuellement et le déficit énergétique pour la wilaya de Bechar. ....	43
Tableau 3. 8: Consommation annuelle d'énergie dans l'hôpital, énergie produite annuellement et le déficit énergétique pour la wilaya d'Alger. ....	43
Tableau 3. 9:Consommation annuelle d'énergie dans l'hôpital, énergie produite annuellement et le déficit énergétique pour la wilaya d'Adrar. ....	44
Tableau 3. 10: Co <sub>2</sub> évité (tonnes) annuel dans les sept wilayas. ....	45
Tableau 3 .11:Énergie importé à travers le réseau. ....	47
Tableau 3. 12:Temps de retour d'investissement pour les sept wilayas. ....	48

# **Introduction Générale**

Une grande partie de l'énergie utilisée aujourd'hui dans le monde (plus de 80 %) provient de gisements de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) ou d'uranium inépuisable. La consommation d'énergie mondiale augmente en moyenne de 2,3% par an entre 2015 et 2040[1].

En Algérie, le secteur bâtiment (résidentiel et tertiaire) en 2019 présente 46,7% de la consommation d'énergie finale nationale et responsable de 28,3% des émissions de gaz à effet de serre [2]. Face aux changements climatiques qui en découlent, il est aujourd'hui plus que nécessaire de réduire les consommations d'énergie dans le bâtiment et substituer aux énergies fossiles des énergies renouvelables comme les énergies fournies par le soleil, le vent, les chutes d'eau, la croissance des végétaux, les marées, la chaleur de la terre. L'hydrogène renouvelable est l'une des options les plus respectueuses de l'environnement pour produire de l'électricité.

Le système d'alimentation hybride utilisé pour les analyses est composé de module photovoltaïque. L'équilibre entre l'apport énergétique et la demande n'est pas toujours réalisable. Ce manque sera compensé par l'introduction de la pile à combustible et du réseau électrique.

Pour atteindre cet objectif, nous avons divisé cette étude en trois chapitres, comme suit

### **Chapitre 1** : Contexte énergétique en Algérie

Dans ce chapitre, nous présentons le contexte énergétique Algérien, en termes de réserves, production, et de consommation par forme d'énergie et par secteur, notamment des leurs impacts sur l'environnement, ensuite on présent l'énergie solaire et leur technologie de conversion.

### **Chapitre 2** : Bâtiments et l'énergie d'hydrogène.

Dans ce chapitre, nous présentons les différents types de la production d'hydrogène et comment le stocker et la méthode de la production d'énergie à travers la pile à combustible.

### **Chapitre 3**: Le potentiel d'intégration d'hydrogène pour les bâtiments tertiaires

Dans ce chapitre nous présenterons un modèle dynamique capable d'intégrer des sources d'énergies renouvelables (Panneaux photovoltaïques, électrolyseur, réservoir d'hydrogène et une pile à combustible) pour réduire la consommation d'un bâtiment tertiaire (hôpital) sous différents climats en Algérie.

# Chapitre 01

## **Contexte énergétique en Algérie**

## 1.1. Introduction

Le secteur de l'énergie a pour mission de couvrir les besoins énergétiques nationaux sur le long terme et le financement du développement économique grâce aux recettes des exportations de ces sources énergies. Il joue un rôle clé dans le développement économique et social du pays.

Actuellement, les ressources exploitées sont essentiellement d'origine fossile. Il s'agit surtout d'hydrocarbures et, dans une certaine mesure, du charbon. Les énergies renouvelables constituent une importante source énergétique, du fait de la situation géographique du pays.

Toutefois, cette source n'est pas encore exploitée commercialement, et son utilisation se limite à certaines zones géographiques isolées [3].

Le secteur bâtiment (résidentiel et tertiaire) c'est un secteur non productif mais énergivore, puisqu'il consomme 46.7% de l'énergie finale et responsable de 28,3% des émissions de gaz à effet de serre. Face aux changements climatiques qui en découlent, il est aujourd'hui plus que nécessaire de réduire les consommations d'énergie dans le bâtiment et substituer aux énergies fossiles des énergies renouvelables [4].

Dans ce chapitre, nous présentons le contexte énergétique Algérien, en termes de réserves, production, et de consommation par forme d'énergie et par secteur, notamment des leurs impacts sur l'environnement, ensuite on présente l'énergie solaire et leur technologie de conversion.

## 1.2. Réserves énergétiques des ressources fossiles en Algérie

L'Algérie est un grand pays avec une grande variété de formations géologiques riches en minerais et en richesses, Surtout le pétrole et le gaz naturel. Le taux de réserves prouvées de pétrole en Algérie en 2019 était estimé à 12,2 milliards de barils, soit 22,5 années de production au rythme de 2019. Ces réserves classaient l'Algérie au 16e rang mondial avec 0,7 % du total mondial, et au 3e rang en Afrique derrière la Libye et le Nigeria [5,6].

Le gaz naturel a une grande importance en Algérie en raison de son abondance et de sa disponibilité, et il est considéré comme le combustible fossile le moins polluant. Les réserves prouvées de gaz naturel de l'Algérie étaient estimées par BP à 4 300 milliards de m<sup>3</sup> fin 2019 (153,1 trillions US de pieds cubes), soit 50 années de production au rythme de 2019[7]. Ces réserves classaient l'Algérie au 11e rang mondial avec 2,2 % du total mondial, et au 2e rang en Afrique derrière le Nigeria [8].

Le gaz de schiste est l'une des énergies non conventionnelles abondantes en Algérie, avec une réserve estimée à 20 milliards de m<sup>3</sup>. Une réserve qui classe l'Algérie, selon ces mêmes rapports, au troisième rang mondial. L'Algérie dispose d'atouts majeurs : un domaine minier qui reste sous exploré, un offshore encore vierge et un potentiel reconnu pour les non-conventionnels, pour assurer son avenir énergétique et disposer de suffisamment de réserves d'hydrocarbures pour les générations futures [9].

L'Algérie est un producteur et exportateur de pétrole et de gaz, et elle dispose d'une importante réserve d'énergie, mais elle souffre de problèmes d'évaluation de ces ressources pour les besoins de développement du pays, de choix d'une véritable politique énergétique à long terme et de définition immédiate d'un modèle cohérent de consommation énergétique couvrant le court et le moyen terme, d'où la nécessité d'une réglementation de maîtrise de l'énergie La préservation des ressources énergétiques conventionnelles et la réduction des coûts des investissements énergétique, La réduction de l'impact des énergies fossiles sur l'environnement[5,6].

### 1.3. Synthèse des flux énergétiques (Mtep) année 2019

Les principaux déterminants et faits marquants des flux énergétiques Algériens en 2019 sont les caractéristiques suivantes :

La production commerciale d'énergie primaire est 157,4 Millions de tonne équivalent pétrole (Tep), soit une baisse (-4,8%) par rapport à 2018.

L'énergie disponible, somme de la production, des importations et des stocks, a atteint 160,4 Mtep, en baisse de 3,7% par rapport à 2018.

Les importations ont pratiquement doublé (+98,3%) à 3,1 Mtep, suite à l'arrêt des opérations de processing de pétrole brut à l'étranger.

Les exportations d'énergie ont atteint 92,0 Mtep, reflétant une baisse de -8,7% par rapport aux réalisations de 2018, en raison notamment de la chute des exportations de gaz naturel par gazoducs (-31%).

Le bilan des échanges d'énergie fait ressortir un solde exportateur net de 89 Mtep, en baisse (-10,4) par rapport à l'année 2018.

La consommation nationale totale d'énergie a connu une hausse (+3,0%) pour s'établir à 66,9 Mtep en 2019. Elle représente près de 43% de la production totale.

La consommation finale d'énergie a augmenté de (+4,6%) à 50,4 Mtep, tirée essentiellement par le gaz naturel (+6,1%), les GPL (+9,6%), les produits pétroliers (+4,1%) et l'électricité (+2,7%).

La consommation finale des produits pétroliers (y compris GPL) s'est accrue de (+4,9%) en 2019 pour s'établir à 19 Mtep [2]. La figure ci-dessous montre les résultats mentionnés ci-dessus :

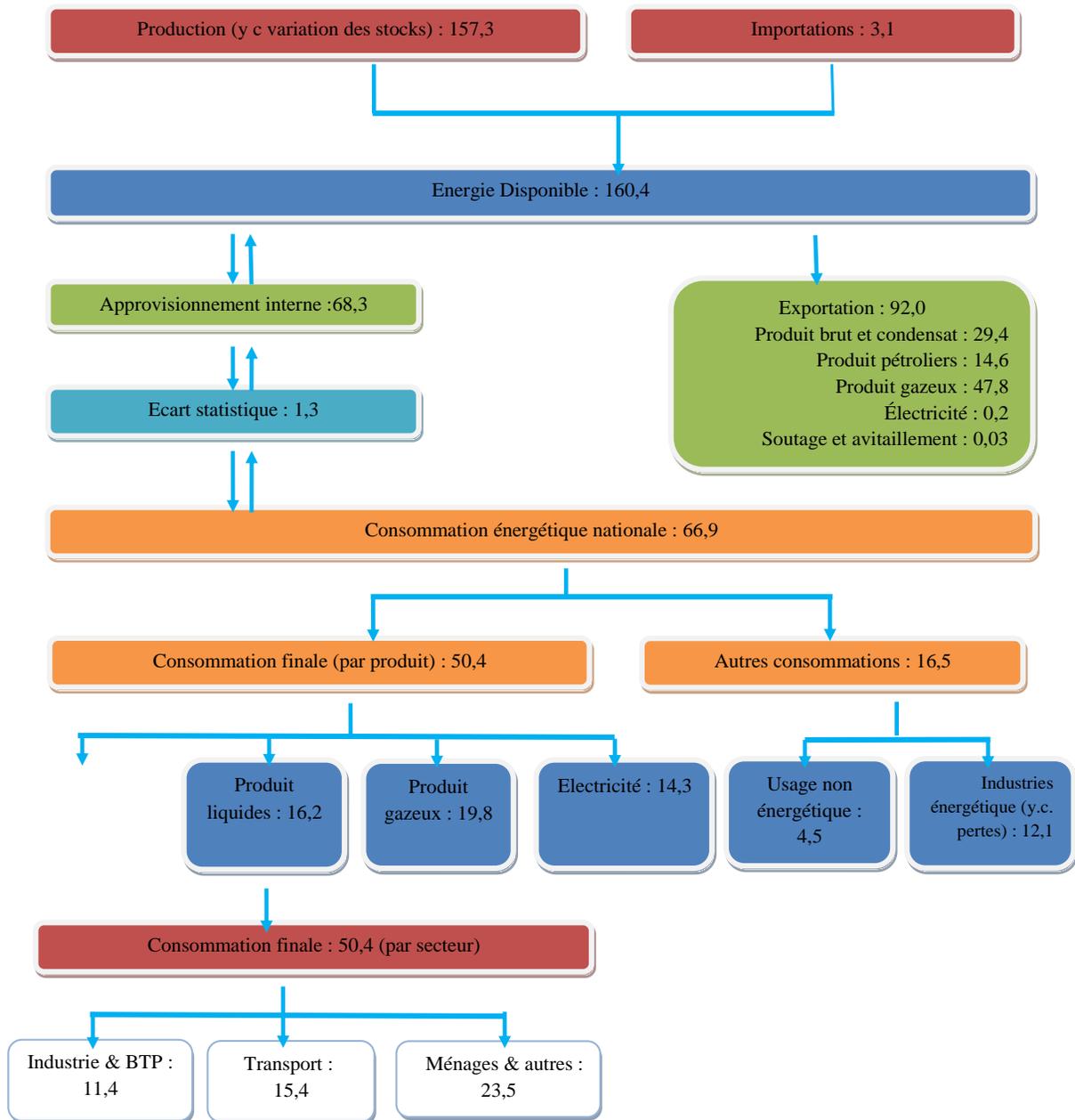


Figure 1. 1: Synthèse des flux énergétiques (Mtep) année 2019 [2].

## 1.4. Production énergétique en Algérie

La production commerciale d'énergie primaire a connu une baisse de -4,8 par rapport aux réalisations de 2018, pour atteindre 157,4 Mtep, tirée par celle de tous les produits à l'exception de l'électricité.

Ainsi, la production d'électricité primaire est passée de 783 à 835 GWh en 2019, tirée par une hausse (+30%) de la production de la filière hydraulique à la suite d'une pluviométrie favorable en 2019, où la production totale a été de 152 GWh contre 117 GWh en 2018 [2].

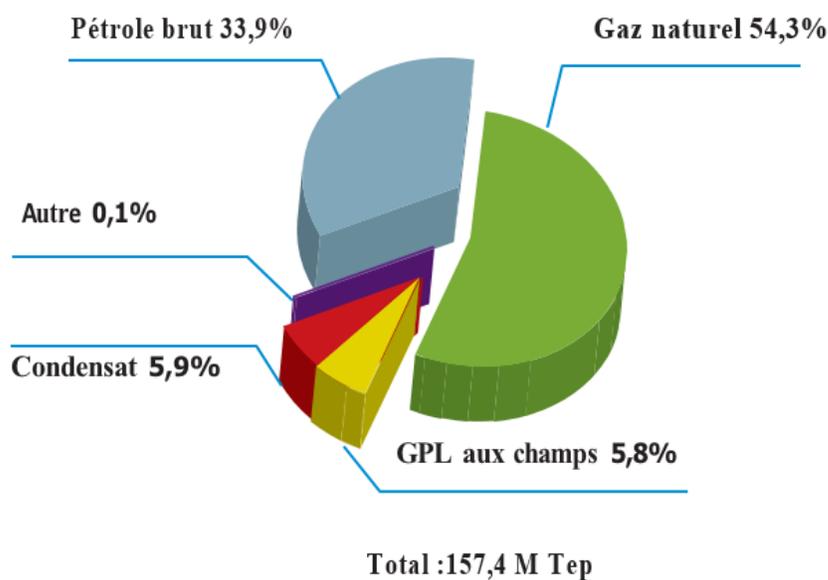


Figure 1. 2: Structure de la production d'énergie primaire [2].

## 1.5. Consommation énergétique en Algérie

### 1.5.1 Consommation nationale par forme d'énergie

La consommation finale est passée de 65 Mtep en 2018 à 66.9 Mtep en 2019, elle a augmenté de 3% par rapport à 2018, tiré par celle du gaz naturel et des produit pétroliers (3,9% chacun)

Le gaz naturel (38,4%), l'électricité (28,3%) et les produits liquides (26,6%), prédominent la structure de la consommation nationale, et enfin la consommation finale des GPL (4,1%) et Autre (2,7%) [2]. Comme illustré ci-après :

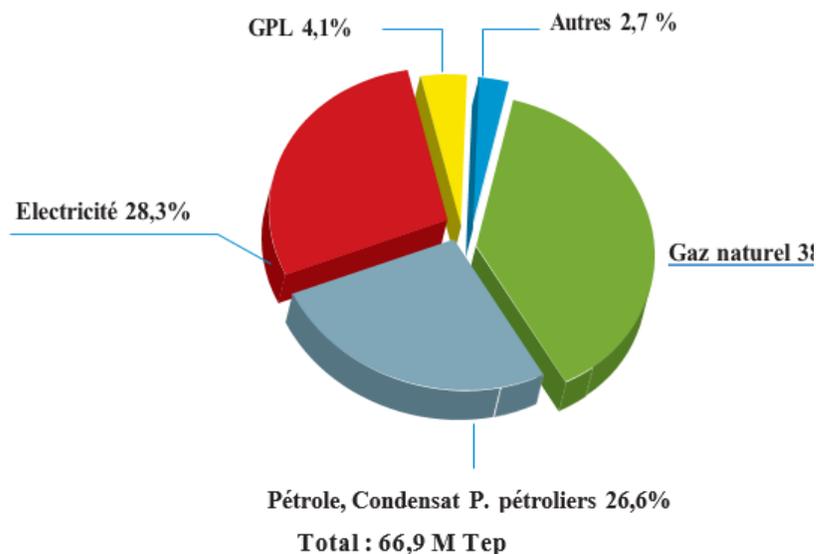


Figure 1. 3: Consommation nationale par forme d'énergie [2].

### 1.5.2 Consommation énergétique national par secteur

Par secteur d'activité, l'évolution de la consommation finale en 2019, fait ressortir ce qui suit :

- ▶ Accroissement de la consommation des « Ménages et autres » de 5,0% à 23,5 Mtep, tirée par le sous-secteur résidentiel (2,9%), à la faveur de la hausse du nombre des clients de Sonelgaz (notamment BP) et de leurs besoins.
- ▶ Légère hausse (0,8%) de la consommation du secteur des "transports" à 15,4 Mtep en 2019, tirée par celle des carburants routiers.
- ▶ Augmentation de la consommation du secteur « Industries et BTP » de 9,3%, à 11,4 Mtep, tirée par les sous-secteurs de l'ISMME (41%), des BTP (84%) et des matériaux de construction (5%).

La structure de la consommation finale reste dominée par le secteur des « Ménages et autres » (46,7%), suivi par le transport (30,6%) et enfin le secteur de « l'industrie et BTP » avec une part de (22,7%) [2]. Comme illustré dans le graphe ci-après :

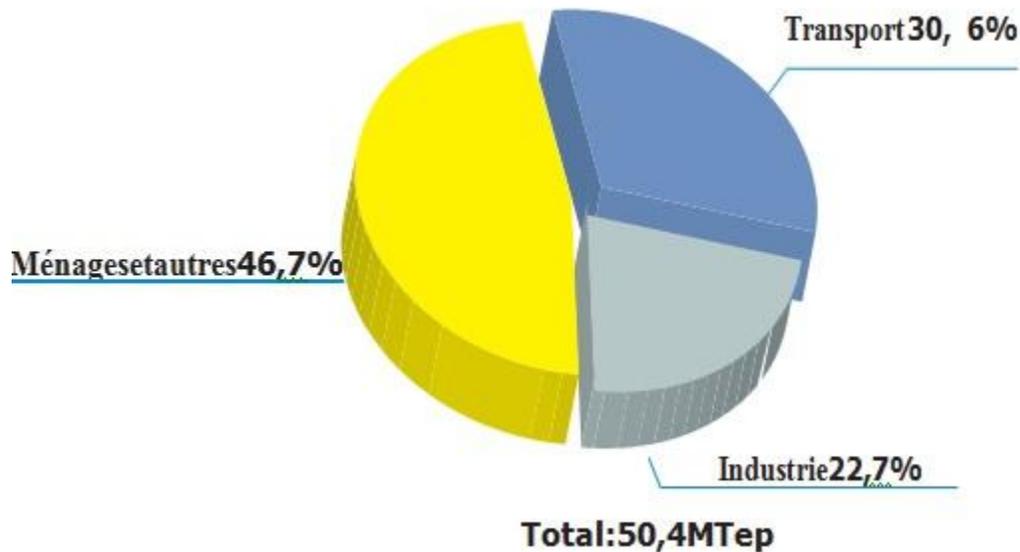


Figure 1. 4: Consommation nationale par secteur [2].

### 1.6. Impact environnemental

Les plus importants défis actuels auxquels doit se confronter l'humanité est la lutte contre le réchauffement climatique. Les conséquences du réchauffement climatique sont multiples, importants et de plus en plus fréquents. On pourra citer entre autres que l'on peut s'attendre à une fonte des glaces aux pôles, à des phénomènes naturels extrêmes plus fréquents, à une mise en péril d'espèces animales et florales, etc. La cause principale de ce dérèglement climatique est, et de manière générale : la perturbation des écosystèmes, l'exploitation des ressources naturelles et très probablement l'activité humaine.

Les activités humaines sont les principales responsables des changements climatiques actuels et de leurs impacts sur l'environnement. En effet, selon le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC), le réchauffement climatique est bien réel et l'activité humaine en est responsable de par l'émission de GES [3].

La combustion de combustibles fossiles est l'un des principaux facteurs de formation de dioxyde de carbone, qui est un gaz à effet de serre. Dans un monde où la croissance démographique et économique stimule la demande énergétique, les émissions de gaz à effet de serre causées par ces demandes croissantes ont entraîné un changement climatique mondial, et les questions énergétiques sont devenues de plus en plus importantes [10].

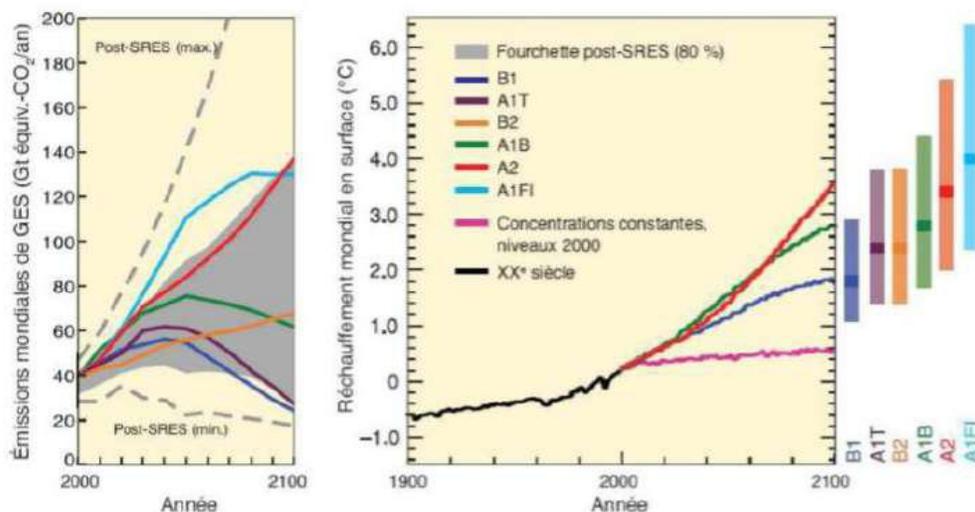


Figure 1. 5 : Scénarios d'émissions de GES pour la période 2000-2100 (en l'absence de politiques) [11].

### 1.7. Energies renouvelables

L'énergie renouvelable est l'énergie extraite de ressources naturelles inépuisables et constamment renouvelées, telles que l'énergie fournie par le soleil, le vent, les chutes d'eau, la croissance des plantes, les marées et la chaleur de la terre. De plus, toutes ces énergies renouvelables n'ont finalement que deux sources : le soleil (car c'est l'origine du vent, de la circulation de l'eau, des marées et de la croissance des plantes) et la terre (dissipant la chaleur).

Les énergies renouvelables ne produisent quasiment pas de déchets ni d'émissions polluantes. Ils participent à la lutte contre l'effet de serre et l'émission de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, favorisent la gestion rationnelle des ressources locales et créent des opportunités d'emploi [12].

### 1.8. Energie solaire

L'énergie solaire est l'une des ressources renouvelables les plus abondantes sur terre. Le flux solaire annuel reçu par la surface de la terre est d'environ 15 000 fois la consommation

d'énergie [13]. On a deux types des énergies solaires : le solaire photovoltaïque et le solaire thermique.



Figure 1. 6: Energie solaire

### ***1.8.1 Photovoltaïque***

Les modules photovoltaïques convertissent l'énergie solaire en énergie électrique. Par conséquent, il joue le rôle de générateur dans le système photovoltaïque. L'énergie produite par les modules photovoltaïques dépend du niveau d'énergie solaire. Par conséquent, au cours de la journée, l'énergie produite variera en fonction des variations de l'énergie solaire.

Le module photovoltaïque est obtenu après avoir associé la batterie aux éléments qui la composent. Actuellement, il existe trois technologies principales : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques. Bien que les prix et les rendements varient considérablement, ces technologies coexistent sur le marché dans les mêmes proportions depuis de nombreuses années. [14].

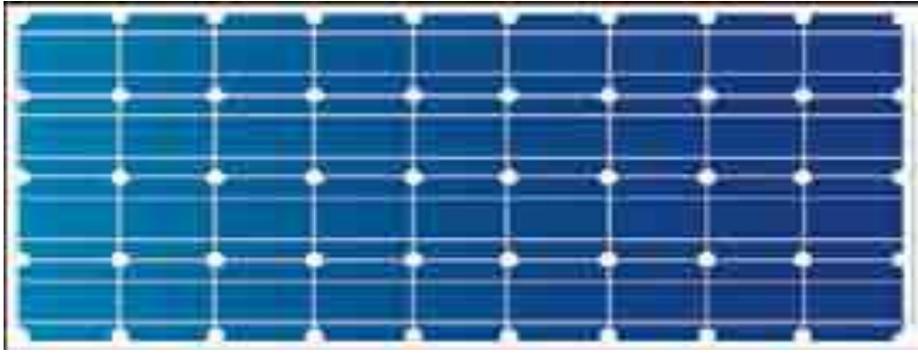
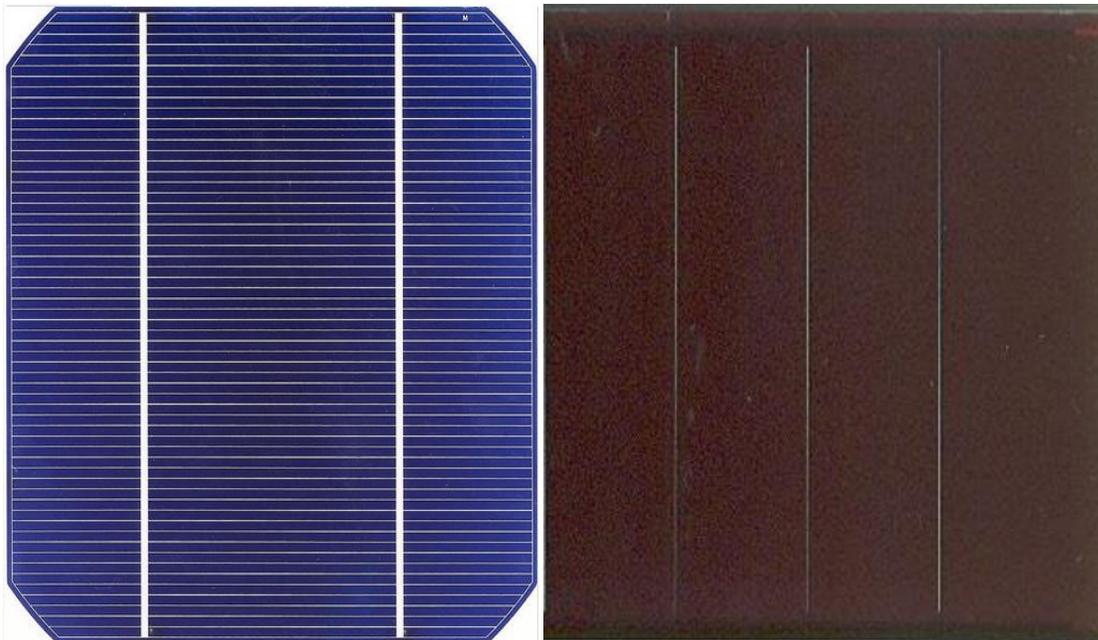


Figure 1. 7: Module photovoltaïque

### 1.8.1.1 Silicium cristallin

Le silicium cristallin occupe plus de 80% du marché. La fin de cette technologie gourmande en matières premières est annoncée depuis de nombreuses années, mais les avancées technologiques dans ce domaine au cours des 10 dernières années lui ont permis de maintenir sa position dominante sur le marché. Le développement actuel étant très fort, l'industrie semble disposée à rester à cet endroit encore quelques années. Leur rendement actuel est entre 10 à 14 %. Ce domaine comprend deux technologies : le silicium monocristallin et le silicium polycristallin. [15].



Le silicium monocristallin

le silicium multi-cristallin

Figure 1. 8: Silicium monocristallin et le silicium multi-cristallin.

### 1.8.1.2 Couches minces

Le coût de production des modules photovoltaïques amorphes est bien inférieur, mais malheureusement, leur rendement actuel n'est que de 6 à 8 %. Cette technologie permet l'utilisation de couches de silicium très fines, qui peuvent être appliquées au verre, aux plastiques souples ou aux métaux par un processus d'évaporation sous vide. Les performances de ces panneaux ne sont pas aussi bonnes que celles de la technologie poly-cristalline ou monocristalline. Cependant, le silicium amorphe peut produire des panneaux de grande surface à faible coût en utilisant très peu de matières premières [16].

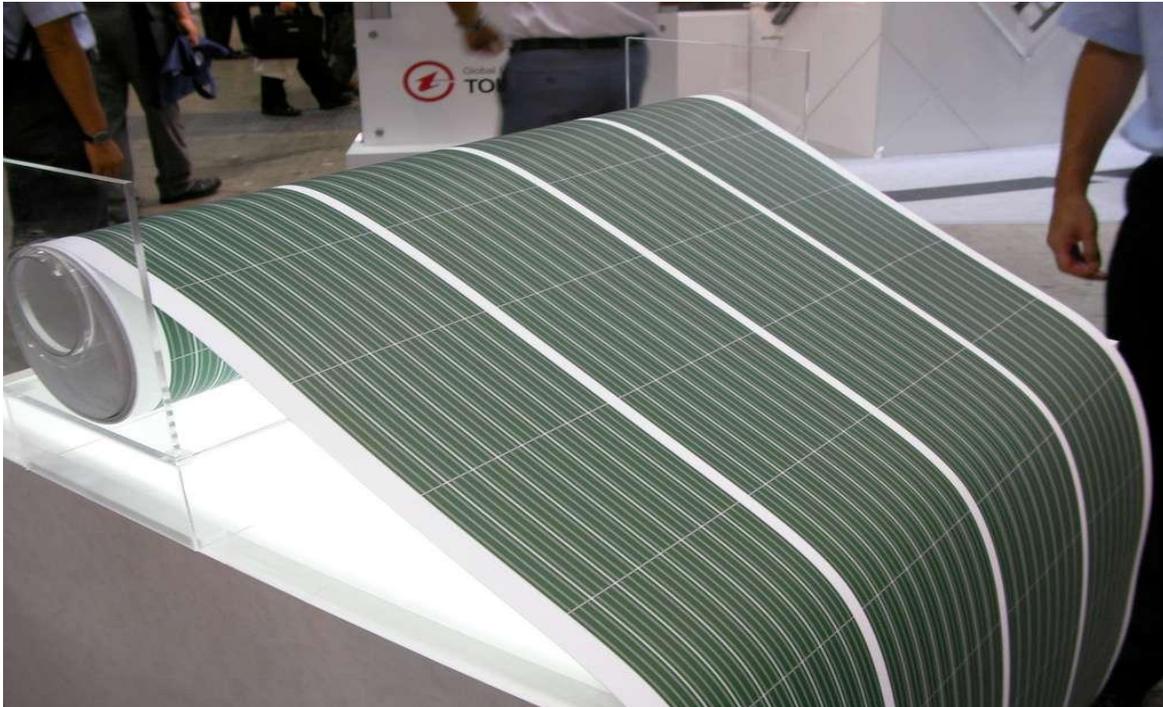


Figure 1. 9: Module photovoltaïque amorphe avec des couches très minces.

### 1.8.1.3 Cellules organiques

Les cellules organiques sont placées au sein d'un foyer qui concentre la lumière. Leur rendement dépasse les 30-35%, mais elles doivent absolument disposer d'un système de tracking, pour suivre la trajectoire du soleil.

Les cellules organiques sont constituées de semi-conducteurs organiques, disposés sur un substrat en plastique ou de verre. Cette technologie, encore au stade expérimental, a un

rendement modéré (10%) mais présente des perspectives de réduction des coûts intéressantes [17].

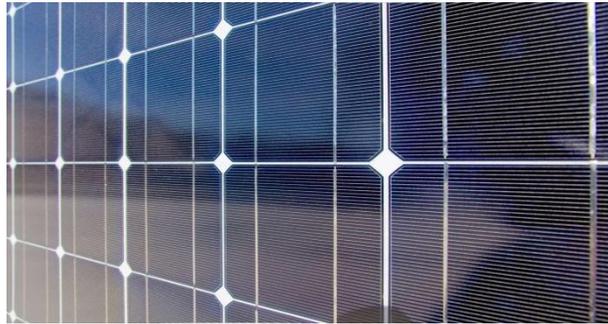


Figure 1. 10: Cellule organique.

### 1.9. Energie éolienne

Parmi toutes les énergies renouvelables l'éolien est la plus prometteuses, l'évolution technologique (augmentation de la taille et de la puissance des installations, optimisation des matériaux) combinée à la baisse continue des coûts de production (effet de série) font actuellement l'énergie de vent l'une des énergies renouvelables les plus compétitives.

Pour toutes ces raisons l'énergie éolienne fait déjà partie intégrante du paysage et la tendance s'annonce irréversible [18].



Figure 1. 11: Energie éolienne.

### 1.10. Energie hydraulique

L'énergie hydraulique qui provient de la captation de la variation d'énergie potentielle de l'eau entre deux niveaux est une énergie renouvelable.

C'est une source d'énergie propre et non polluante de l'environnement, économique et fiable. La mise en service est simple et très rapide, en effet lorsque l'eau est stockée, il suffit d'ouvrir des vannes pour commencer le cycle de production d'électricité [19].



Figure 1. 12: Energie hydraulique.

### 1.11. Energie biomasse

Pendant longtemps, la biomasse c'est une énergie renouvelable qui désigne l'ensemble de la matière organique d'origine végétale et animale, fut la source d'énergie la plus exploitée par l'homme. Depuis le premier choc pétrolier, ce concept a été appliqué aux produits biologiques végétaux et animaux utilisés à des fins énergétiques ou agronomiques [11].



Figure 1. 13: Energie biomasse.

### 1.12. Energie géothermique

L'énergie géothermique est l'utilisation de la chaleur fournie par la terre. Il provient principalement de la décomposition d'éléments radioactifs naturellement présents dans les roches du sous-sol. L'utilisation des ressources géothermiques peut être divisée en deux catégories : la production d'électricité et la production d'énergie thermique [20].

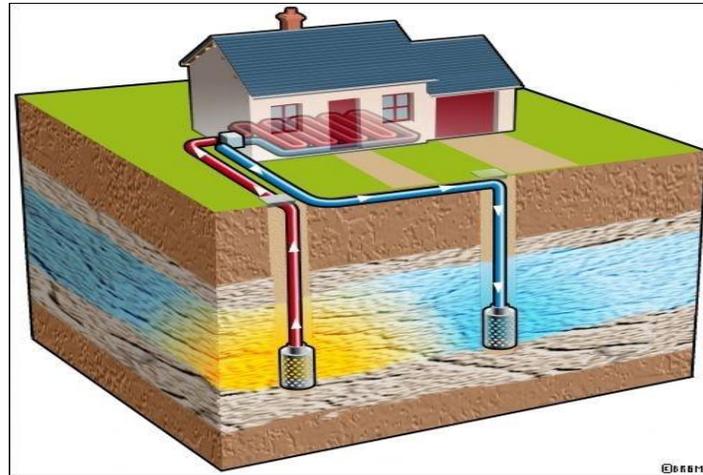


Figure 1. 14: Energie géothermique.

### 1.13. Conclusion

L'énergie mondiale dépend dans une large mesure des énergies fossiles, car cela a affecté le climat et l'environnement. Par conséquent, nous devons compter d'autres sources pour éviter ces problèmes. Dans la transition énergétique à opérer, le secteur tertiaire occupe une place de choix. La contribution des énergies renouvelables dans la régulation de ce défi est primordiale. L'intégration des énergies renouvelables nous permet d'une part, de garder un environnement propre et sain et d'autre part, assurer la protection de la biodiversité.

# Chapitre 02

## **Bâtiments et Production d'hydrogène**

## 2.1. Introduction

Le plus consommateur d'énergie au monde est le secteur des bâtiments. Ils représentent plus d'un tiers de la consommation totale d'énergie finale et sont une source tout aussi importante d'émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Atteindre une réduction significative de l'énergie et des émissions dans le secteur du bâtiment est un objectif politique difficile mais réalisable [21]. Il existe une stratégie Pour réduire les émissions, c'est l'hydrogène.

Les sources d'hydrogène considérées la production sont la source hydraulique, solaire, nucléaire, biomasse, éolienne et géothermie. L'hydrogène renouvelable est l'un des options conviviales pour produire de l'électricité.

Les systèmes énergétiques à base d'hydrogène présentent de nombreux avantages pour réduire les émissions polluantes et le changement climatique. L'hydrogène est une énergie propre et renouvelable, Il présente certaines caractéristiques physico-chimie-chimie-chimiques avantageuses d'un point de vue énergétique. C'est un gaz à fort pouvoir calorifique et très léger par rapport aux autres gaz. Il est inodore, incolore, non polluant. Dans le contexte énergétique actuel, les propriétés physique et environnementale de l'hydrogène font de lui un vecteur énergétique de qualité en association avec l'électricité Bien qu'il soit très abondant sur Terre, l'hydrogène n'existe pas à l'état naturel. Sa production est essentiellement effectuée par reformage d'hydrocarbures. Une très faible proportion d'hydrogène est produite par électrolyse de l'eau (1% de la production mondiale) [17].

Dans ce chapitre, nous présentons les différents types de la production d'hydrogène et comment le stocker et la méthode de la production d'énergie à travers la pile à combustible.

## **2.2. Etat de l'art des opérations internationales**

Suivant leurs niveaux de performances énergétiques, les bâtiments à basse consommation d'énergie peuvent être classés en quarts familles : bâtiments performants, bâtiments très performants, bâtiments autonomes et bâtiments zéro énergie ou à énergie positive.

### **2.2.1 Bâtiments performants**

Les bâtiments à haute efficacité énergétique, souvent appelés bâtiments à faible consommation d'énergie, ont des milliers d'exemplaires. Leurs principales caractéristiques sont la conception bioclimatique des bâtiments, une bonne isolation thermique (couche isolante de 15 à 20 cm), des fenêtres performantes, des systèmes de ventilation double flux qui récupèrent la chaleur de l'air extrait, parfois associés à des puits climatiques. Systèmes de production d'électricité performants (pompes à chaleur, chaudières bois, chaudières à condensation, etc.), en accordant une attention particulière à la perméabilité à l'air et aux ponts thermiques. Les énergies renouvelables sont également utilisées pour la production d'énergie, comme l'énergie solaire, l'air, la géothermie ou le bois. [22].

### **2.2.2 Bâtiments très performants**

Les bâtiments passifs sont définis comme des bâtiments avec une atmosphère intérieure confortable en hiver et en été, et ne nécessitent pas de systèmes de chauffage ou de refroidissement traditionnels. L'énergie solaire passive et les systèmes d'apport et de ventilation internes sont suffisants pour maintenir une atmosphère intérieure confortable tout au long de l'année. Le concept inclut également la réduction de la demande spécifique d'électricité et la production éventuelle d'électricité à partir d'énergies renouvelables [3].

### **2.2.3 Bâtiments autonomes**

Lorsque l'approvisionnement énergétique d'un bâtiment ne dépend d'aucune ressource distante, il est autonome. Ainsi, toute l'énergie consommée par le bâtiment provient de ressources locales. En effet, le bilan énergétique net de ce bâtiment est toujours nul. Un bâtiment de ce type ne présente pas les avantages apportés par le réseau d'alimentation (extension, sécurité d'approvisionnement) qui nécessite l'utilisation de moyens de stockage d'énergie (batterie, inertie thermique...) [3].

### **2.2.4 Bâtiments zéro énergie**

Un bâtiment zéro énergie ou à énergie positive est défini comme étant un bâtiment qui produit autant ou plus d'énergie qu'il n'en consomme. Ces bâtiments sont la combinaison de bâtiments basse énergie ou passifs avec des toits solaires photovoltaïques et parfois thermiques [22].

### **2.3. Production d'hydrogène**

Le dihydrogène est un vecteur énergétique car il doit être produit avant d'être consommé. La production mondiale est de 30 millions de tonnes par ans (la moitié de cette production sert principalement à la formation de  $\text{NH}_3$ ). La source principale de l'hydrogène sur Terre est l'eau. Différentes techniques sont utilisées pour produire de l'hydrogène : le reformage ou gazéification d'hydrocarbures, l'électrolyse de l'eau ou la dissociation thermochimique de l'eau ou de la biomasse [20].

### **2.4. Procédés de production d'hydrogène**

Pour répondre à la demande existante et à la demande nécessaire du point de vue de l'hydrogène comme vecteur énergétique, il est nécessaire de développer un procédé qui intègre les limitations que nous avons détaillées. Actuellement, 95% de l'hydrogène est produit par des procédés contrôlés, utilisant des ressources fossiles, notamment du gaz naturel par reformage à la vapeur (48%). Le reformage à la vapeur du gaz naturel implique la réaction d'hydrocarbures avec de la vapeur dans la plage de température comprise entre 973 K et 1373 K. La réaction se déroule en deux étapes, et finalement de l'hydrogène et du dioxyde de carbone, ou carbone, sont produits. Les émissions moyennes de dioxyde de carbone associées uniquement au méthane consommé par ce procédé sont de 9 kg/kg d'hydrogène. La production d'hydrogène à partir d'autres ressources fossiles (30 % d'hydrocarbures et 18 % de charbon) s'effectue principalement par un procédé d'oxydation partielle.

Les composés contenant du carbone réagissent avec l'oxygène et la vapeur d'eau pour obtenir une combustion incomplète et produire du monoxyde de carbone, du dioxyde de carbone et de l'hydrogène. Les émissions de  $\text{CO}_2$  de ces procédés augmentent considérablement la concentration de ce gaz dans l'atmosphère.

Le dernier procédé mature est l'électrolyse alcaline de l'eau qui permet de répondre à 4% de la demande mondiale [23].

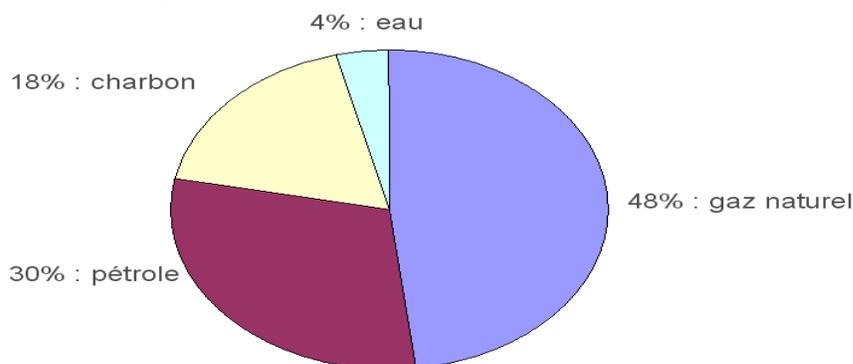


Figure2. 1: Répartition des sources de production d'hydrogène en 2009 [23].

### 2.4.1 Production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles

De par leur disponibilité, leur prix, leur intégration avec les produits du raffinage ou de la pétrochimie, et leur bonne réactivité chimique, les hydrocarbures représentent plus de 90 % de la production traditionnelle d'hydrogène. Outre la coproduction d'hydrogène dans les raffineries et la pétrochimie, toutes les approches attractives des énergies fossiles ont abouti à un mélange de cinq composés gazeux :  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2O$  et certaines impuretés :  $H_2S$ ,  $N_2$ ,  $Ar$ . Ce que l'on appelle communément le gaz de synthèse. Les technologies existantes pour les gaz de synthèse sont aujourd'hui

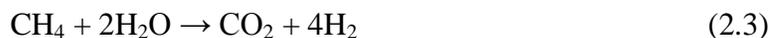
- Le vaporeformage d'hydrocarbures légers.
- L'oxydation partielle d'hydrocarbures et de charbon [24].

#### 2.4.1.1 Production d'hydrogène par vaporeformage

Le vaporeformage est la méthode de production la plus utilisée. Si l'on part de méthane, celui-ci réagit à haute température (700-1100 °C) avec de l'eau en présence d'un catalyseur à base de nickel pour donner de l'hydrogène et du monoxyde de carbone (réaction consommant de l'énergie, 206 kJ/mole de méthane) qui lui-même au contact de l'eau produit du dioxyde de carbone et à nouveau de l'hydrogène (réaction exothermique dégageant 41 kJ/mole).



Dans le cas du méthane, le bilan de ces deux réactions est :



Ainsi, avec cette réaction, pour un kilogramme d'hydrogène produit, 5,5 kg de dioxyde de carbone sont en principe émis. En pratique, compte tenu du rendement thermodynamique de la réaction, ce sont de 7 à 10 kg de dioxyde de carbone qui sont émis par kilogramme d'hydrogène produit.

La réaction inverse, ou l'hydrogène réagit avec du monoxyde ou du dioxyde de carbone pour produire du méthane et de l'eau, s'appelle la méthanisations.

Si l'on part de charbon, la distillation de la houille (qui contient du carbone mais aussi des hydrocarbures adsorbés) produit un mélange d'hydrogène, de méthane (qui lui-même peut être converti par la réaction supra), de monoxyde de carbone (idem) et autres : c'est-à-dire l'ancien « gaz de ville », et évidemment du coke [25].

#### ***2.4.1.2 Production d'hydrogène par oxydation partielle***

L'oxydation partielle peut être réalisée sur des produits plus ou moins lourds, allant du gaz naturel aux déchets lourds, en passant par le charbon ou la biomasse. D'un point de vue économique, ce n'est que lorsque l'investissement supplémentaire par rapport au vaporeformage est compensé par la baisse des coûts des matières premières, résidus pétroliers lourds, coke de pétrole ou de charbon, que ces charges lourdes seront raisonnablement utilisées pour la production d'hydrogène.

A des températures élevées (généralement de 900 à 1500 ° C) et des pressions élevées (généralement 20 à 60 bars), en présence d'oxygène comme oxydant et régulateur de température (vapeur d'eau), une oxydation partielle des hydrocarbures, telle que la vapeur, se produit. Reformer pour produire du gaz de synthèse. D'autre part, la réaction est exothermique et (généralement) se produit sans catalyseur [26]

#### ***2.4.2 Production photo biologique de l'hydrogène***

Dans cette catégorie utilisant des voies photo-biologiques, on constate que l'hydrogène est produit par des procédés impliquant des organismes vivants (algues, bactéries) ou des procédés biochimiques utilisant des levures ou des enzymes. À l'heure actuelle, le rendement le plus élevé de conversion de l'énergie solaire en énergie hydrogène est d'environ 5 % par rapport à l'énergie solaire incidente. Concernant la production d'hydrogène photo-biologique à partir d'algues : On estime que l'efficacité des microbes par unité de surface dans les autres procédés d'énergie solaire est 20 fois supérieure à celle des arbres en termes de conversion du

rayonnement solaire en énergie. La chlorella peut utiliser des enzymes pour fabriquer de l'hydrogène directement à partir de l'eau. La technologie génétique moléculaire moderne permettra le développement d'une algue commercialement viable pouvant fournir une production industrielle d'hydrogène. Les recherches actuelles visent la synthèse de deux étapes, la première étape est l'hydrogène et la deuxième étape est la récupération de l'oxygène. Par conséquent, les processus de séparation mécanique ou chimique peuvent être évités. Comme pour le procédé biochimique de levure ou d'enzymes (biomasse), en l'absence de lumière, une conversion en une étape est utilisée pour convertir le gaz de synthèse brut en gaz sans CO et riche en hydrogène, et des bactéries sont utilisées dans des réacteurs. En utilisant des bactéries, la conversion du CO peut être simplifiée en opérant à basse température (60 ° C) par des réactions enzymatiques. La teneur en CO du produit final est inférieure à 0,1 ppm. L'étape limitant de ce procédé est de transférer le CO gazeux vers les bactéries. [24].

#### ***2.4.3 Production d'hydrogène par dissociation de l'eau***

La réaction de l'énergie libérée lors de la combustion de l'hydrogène est :



L'énergie s'exprime en termes de pouvoir calorifique supérieur (PCS) qui inclut l'énergie contenue dans la vapeur d'eau produite, (PCS = 143 000 kJ/kg  $\Leftrightarrow$   $\Delta H_0 = 286$  kJ/mole à l'état standard, soit 25°C et 1 bar. Cette valeur correspond en fait à l'énergie de liaison des molécules d'eau et donc à l'énergie minimale nécessaire d'apporter pour se dissocier de l'eau liquide. [24].

Théoriquement, la décomposition directe de l'eau peut être réalisée en fournissant de l'énergie uniquement sous forme de chaleur (pyrolyse). Cependant, la réaction n'est véritablement irréversible qu'à des températures supérieures à 3000 K (à une température que l'on appelle la température de décomposition directe Tdc), ce qui la rend difficilement prévisible au niveau industriel, que ce soit en termes de sources de chaleur nécessaires ou de "matériaux compatibles" à cette température.

Cette décomposition peut également être effectuée à des températures plus basses, mais dans ce cas, l'énergie nécessaire (représentée par la variation d'enthalpie ( $\Delta H$ ) n'est pas fournie sous la seule forme de chaleur (représentée en température absolue (T) et entropie) Changement ( $\Delta S$ ), mais il existe aussi des formes plus nobles (électriques ou mécaniques), décrites par un

autre changement de quantité ( $\Delta G$ ) : l'enthalpie de liberté, aussi appelée énergie de Gibbs en anglais. Toutes ces quantités sont reliées entre elles par la relation [25] :

$$\Delta H = \Delta G + T \times \Delta S \quad (2.5)$$

### 2.4.3.1 Cycles *thermochimiques*

#### a. Principe et généralités

L'objectif de ces cycles est de réaliser la décomposition de l'eau à une température inférieure à celle de la décomposition directe  $T_{dc}$ . Des substances chimiques sont introduites afin de réaliser une série de réactions de combinaison avec l'eau et entre elles, puis de dissociation, conduisant à la production d'hydrogène et d'oxygène, tout en restituant les substances chimiques initiales.

#### b. Cycle *thermochimique (I/S)*

Le premier cycle *thermochimique* de production d'hydrogène est introduit en 1964. Le nombre de cycles *thermochimiques* effectués depuis s'échelonne de 2 000 à 3 000 cycles. En effet, la perspective de couplage avec le HTR (High Temperature Reactor) limite les valeurs possibles de haute température ( $T_h$ ) et limite ainsi le nombre de réactions endothermiques fondamentales que l'on peut anticiper. Dans ce cas, la réaction basique la plus étudiée est la décomposition de l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ), qui se divise en réalité en trois parties : l'évaporation de l'acide (environ 880 K), suivie de la décomposition de deux sous-réactions :



Bien que la deuxième réaction secondaire ait une température plus élevée, elle nécessite moins d'apport de chaleur que la première et la vaporisation. D'autre part, un autre avantage de cette réaction basique est que lorsque la décomposition du  $SO_3$  est terminée, moins d'énergie est nécessaire pour terminer le cycle. Elle est théoriquement estimée à 71 kJ/mol. En pratique, il est nécessaire de fournir plus d'énergie [27].

### 2.4.3.2 Procédés *photo électrochimiques*

En utilisant des panneaux photovoltaïques, il est possible de convertir le rayonnement solaire en électricité puis, par électrolyse, décomposer l'eau en hydrogène et oxygène. De

récentes recherches tentent de jumeler ces techniques et d'utiliser l'énergie photonique de la radiation solaire pour la décomposition directe de l'eau sans apport énergétique extérieur. Les matériaux sont des semi-conducteurs qui, par promotion sélective d'électrons de la bande de valence à la bande de conduction, créent des conditions permettant la dissociation directe de l'eau en hydrogène et oxygène ou à l'aide d'une faible polarisation électrique.

Le rendement de ce procédé est d'environ 12.4 % par rapport au rayonnement solaire incident. L'hydrogène produit par ce procédé est trois fois plus coûteux que celui utilisant le reforming catalytique du gaz naturel à la vapeur d'eau. Cependant des recherches sont en cours pour l'utilisation de semi-conducteurs plus efficaces [24].

#### ***2.4.4 Procédés électrolytiques***

L'électrolyse de l'eau est un procédé commercial très courant, utilisé pour la production à petite échelle lorsqu'une très grande pureté en hydrogène est requise. L'électrolyse présente le principal avantage de ne pas générer de gaz à effet de serre. Un électrolyseur est un dispositif de décomposition chimique de l'eau par un courant électrique. Il est constitué d'un bac qui regroupe : deux électrodes (anode et cathode, conducteur électrique) reliées à un générateur de courant continu, et d'un électrolyte (milieu conducteur ionique).

Trois types de procédés ont été développés pour l'électrolyse de l'eau et cela selon la nature de l'électrolyte (figure 2.2).

Les électrolyseurs les plus répandus industriellement sont de type alcalin mais cependant les membranes échangeuse de proton sont en cours de développement. Le procédé à la vapeur mettant en œuvre des oxydes électrolytes solides (OES) n'est encore qu'une toute jeune technique de laboratoire et l'intérêt pour l'électrolyse haute température est né seulement au début des années 1970 [24].

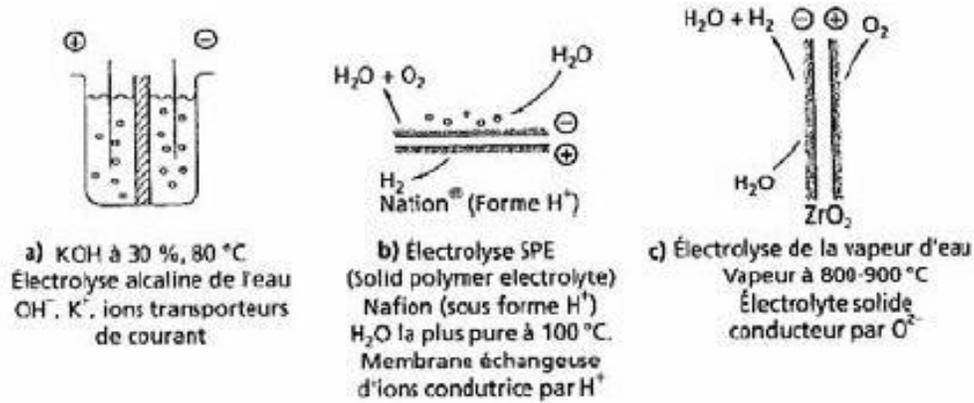
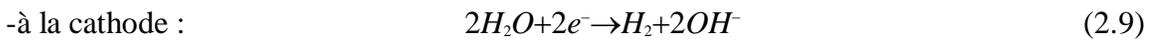
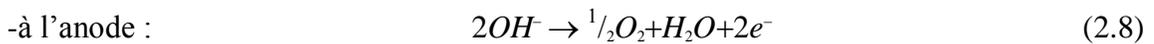


Figure2. 2: Trois procédés d'électrolyse de l'eau [24].

### 2.4.4.1 Electrolyse de l'eau en milieu alcalin

L'électrolyse alcaline est la technique la plus utilisée pour produire de l'hydrogène électrolytique, mais elle est également utilisée pour produire de nombreux composés, dont le chlore. Il bénéficie donc d'une grande maturité industrielle. Dans les électrolyseurs à technologie alcaline, l'électrolyte est une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH). Ensuite, la conduction ionique est assurée par les ions hydroxyde (OH<sup>-</sup>) et potassium (K) [28]. Les réactions anodiques et cathodiques sont décrites ci-dessous :



La figure ci-après illustre de manière schématique l'électrolyse alcaline :

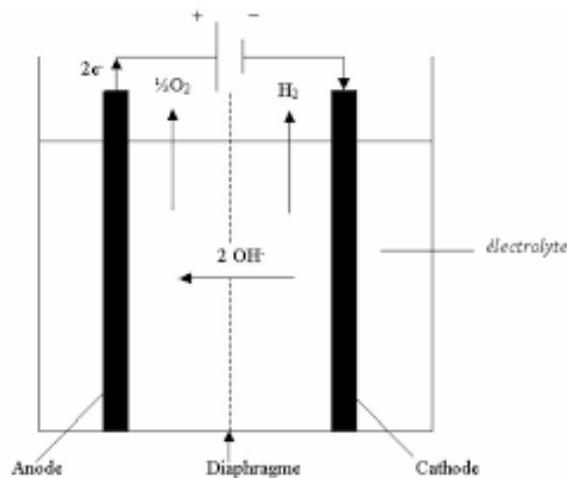


Figure2. 3: Principe de l'électrolyse alcaline [28].

#### **2.4.4.2 Electrolyse acide PEM**

L'électrolyse acide se distingue de la précédente par un électrolyte solide à membrane polymère conductrice de protons (Figure 2.4). Les avantages de cette technologie sont l'absence d'électrolyte liquide, la compacité, la simplicité de fabrication, la simplicité du design et du fonctionnement, la limitation des problèmes de corrosion, des performances sensiblement supérieures et une moindre influence de la variation des conditions d'entrée (intéressant pour les sources renouvelables intermittentes). Cependant le coût de la membrane polymère et l'utilisation d'électro-catalyseurs à base de métaux nobles, conduisent à des équipements aujourd'hui plus onéreux que les électrolyseurs alcalins de même capacité. L'électrolyse à membrane polymère est considérée, néanmoins, par beaucoup, comme une technologie d'avenir car elle bénéficie des nombreux développements sur les piles à combustible de technologie comparable (PEM), et de la réduction des coûts associée.

L'électrolyse à membrane polymère de petite capacité est d'ores et déjà une technologie mature, utilisée depuis plusieurs dizaines d'années pour des applications sous-marines (usines à oxygène à bord des sous-marins nucléaires<sup>3</sup> américains et britanniques) et spatiales (pour la génération d'oxygène dans les compartiments vie)

Ce type de cellule d'électrolyse est particulièrement adapté au couplage avec des sources d'énergie renouvelables car il résiste mieux aux variations d'électricité disponible que l'électrolyse alcaline.

De plus, compte tenu des meilleures performances de la cellule électrolytique existante, elle a un meilleur rendement que l'électrolyse alcaline (une augmentation de 5 à 10 points de pourcentage). Des normes et des spécifications pour la conception et/ou l'installation d'électrolyseurs de petite capacité sont en cours d'élaboration, en particulier dans le cadre de l'ISO TC 1974 spécifiquement pour la technologie de l'hydrogène [29].

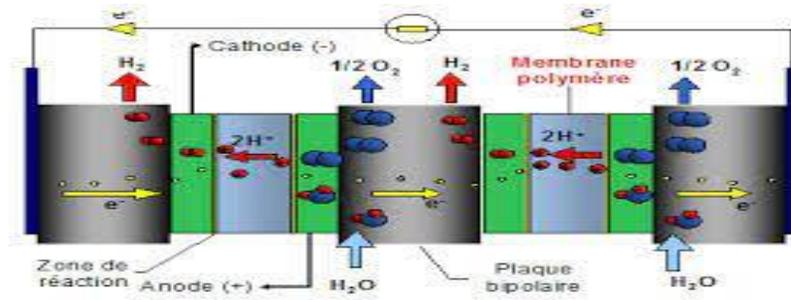
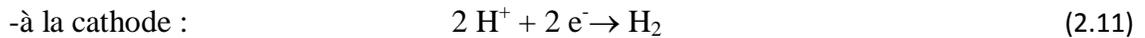
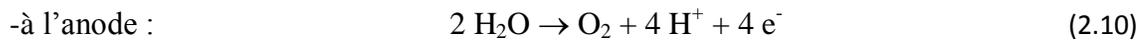


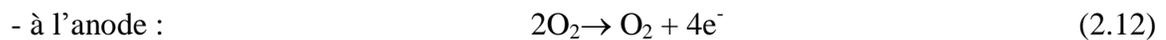
Figure2. 4:Electrolyse PEM [28].



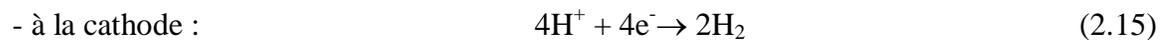
#### 2.4.4.3 Electrolyse de la vapeur d'eau

Le principe de l'électrolyse à haute température repose sur la décomposition des molécules d'eau sous forme vapeur au niveau de la cathode. Cette décomposition dépend alors de la nature de l'électrolyte. Celui-ci peut assurer soit une conduction protonique soit une conduction d'ions super oxydes  $\text{O}_2^-$ . Les réactions mises en jeu au niveau des électrodes sont décrites ci-dessous en fonction du type d'électrolyte :

Electrolyte à conduction d'ions super oxydes :



Electrolyte à conduction protonique :



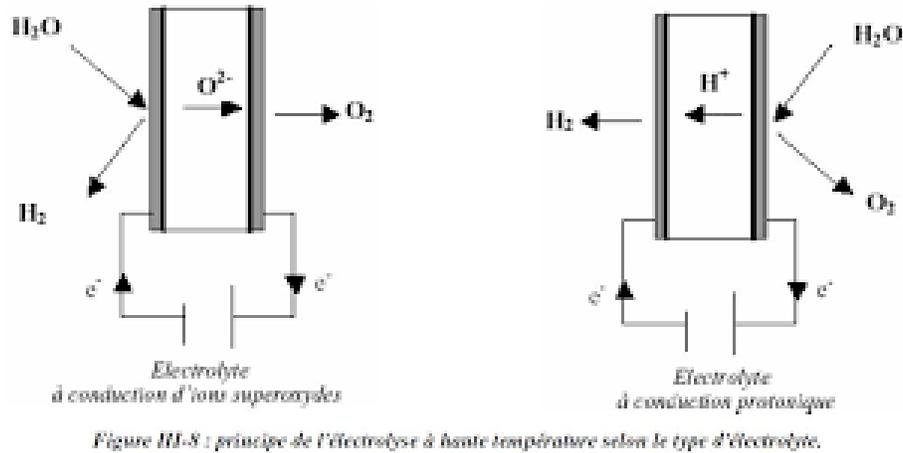


Figure2. 5: Principe de l'électrolyse à haute température selon le type d'électrolyte.

D'un point de vue thermodynamique, l'électrolyse de l'eau à haute température est plus intéressante car l'énergie d'électrolyse est apportée à la fois par la chaleur et l'électricité. Le principal avantage de cette électrolyse est que la majeure partie de l'énergie d'électrolyse est fournie par la chaleur, ce qui est beaucoup moins cher que l'électricité. D'un point de vue dynamique, l'augmentation de la température peut réduire toutes les surtensions d'électrode, réduisant ainsi la consommation d'énergie électrique. [30].

## 2.5. Stockage de l'hydrogène

Il existe de nombreuses façons de stocker l'hydrogène, notamment : les deux premiers modes de stockage (comprimé et liquéfié), Ils sont actuellement les plus utilisés, leurs performances ne satisfont pas totalement aux critères techniques qui définissent aujourd'hui le marché du stockage d' $H_2$ . D'autres modes sont donc étudiés. L'évaluation des performances se fait d'abord au niveau de la densité volumique et massique (hydrogène et ses équipements de stockage) et des conditions générales de stockage et d'élimination de l'hydrogène (efficacité, vitesse, équipements auxiliaires). Enfin, les normes de sécurité et de coût sont souvent des facteurs déterminants pour parvenir à un accord sur la faisabilité des méthodes de stockage.

Parmi les différents modes de stockage, il existe :

Des procédés physiques comme la compression, la liquéfaction ou l'adsorption sur des matériaux carbonés (charbons actifs, nano fibres et nanotubes de carbone) ;

Des procédés chimiques ( $NaBH_4$ , hydrures métalliques, fullerènes,  $NH_3$ , méthanol) [22].

## 2.6. Pile à combustible

Une pile à combustible est un générateur électrique qui convertit l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique.

Une pile à combustible fonctionne selon le principe inverse de l'électrolyse de l'eau, puisqu'elle produit de l'électricité, de l'eau et de la chaleur à partir d'hydrogène et d'oxygène.

En effet, la réaction d'oxydoréduction se produit au sein d'un générateur électrochimique élémentaire, appelé cellule ou EME (Electrode - Membrane - Électrode), constitué de deux électrodes (l'anode et la cathode) séparées par une membrane, électrolyte solide ou liquide permettant le passage des ions. Les électrodes mettent en jeu des catalyseurs pour activer la réaction d'oxydation de l'hydrogène d'un côté, la réduction de l'oxygène de l'autre côté [30].

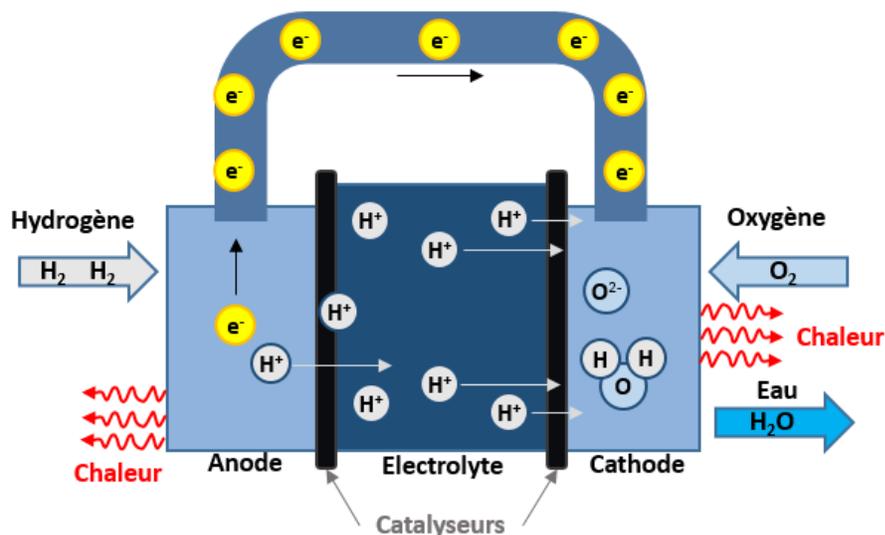


Figure2. 6: Principe de fonctionnement d'une pile à combustible.

## 2.7. Conclusion

Nous avons étudié dans ce chapitre les bâtiments et les différentes méthodes de production d'hydrogène et ces propriétés et leur type de stockage, nous avons constaté que la production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables est meilleure que la production d'hydrogène à partir d'énergies fossiles. L'hydrogène est une énergie renouvelable et un moyen moderne pour produire l'électricité d'une manière exceptionnelle, nous avons des besoins à l'intérieur de bâtiments tertiaires en raison de l'extinction des énergies traditionnelles et car elle est considérée comme une énergie non polluante et respectueuse de l'environnement.

# Chapitre 03

Le potentiel  
d'intégration  
d'hydrogène pour les  
bâtiments tertiaires

### 3.1. Introduction

Plus de 80% de l'approvisionnement mondial en énergie primaire provient de combustibles fossiles, et la consommation d'énergie mondiale augmente en moyenne de 2,3% par an entre 2015 et 2040, menaçant d'augmenter les niveaux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère [1]. Les bâtiments (résidentiels et tertiaires) sont la principale source de consommation d'énergie et d'émissions environnementales. En Algérie, le secteur du bâtiment consomme le plus d'énergie (en 2019), soit 46,7%, En raison de l'augmentation de la demande d'énergie [2]. L'utilisation de ressources énergétiques renouvelables est l'un des moyens pratiques de réduire les émissions de gaz à effet de serre résultant de cette consommation.

L'utilisation de ressources énergétiques renouvelables est l'un des moyens pratiques de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Parmi ces énergies renouvelables se trouve l'hydrogène renouvelable est l'une des options les plus respectueuses de l'environnement pour produire de l'électricité.

Dans ce chapitre nous présenterons un modèle dynamique capable d'intégrer des sources d'énergies renouvelables (Panneaux photovoltaïques, électrolyseur, réservoir d'hydrogène et une pile à combustible) pour réduire la consommation d'un bâtiment tertiaire (hôpital) sous différents climats en Algérie.

### 3.2. Méthodologie

Cette étude est de présenter un modèle pour l'analyse de production d'énergie pour alimenter un bâtiment tertiaire pour ses besoins énergétiques d'une manière soutenable. Pour l'application de ce modèle, le choix s'est porté sur l'hôpital Sidi Abdelkader, situé dans la ville de Ouargla (latitude : 31N, longitude : 5.24'E) (Algérie) de 5013 m<sup>2</sup>(figure 3.1), caractérisé par un climat sec et désertique et une température élevée dans la plupart des mois de l'année, ce climat nous fournit une bonne source d'énergie solaire ce qui nous encourage à étudier sur ce site. Pour cela, une simulation numérique a été réalisée à l'aide d'un outil de calcul Excel.

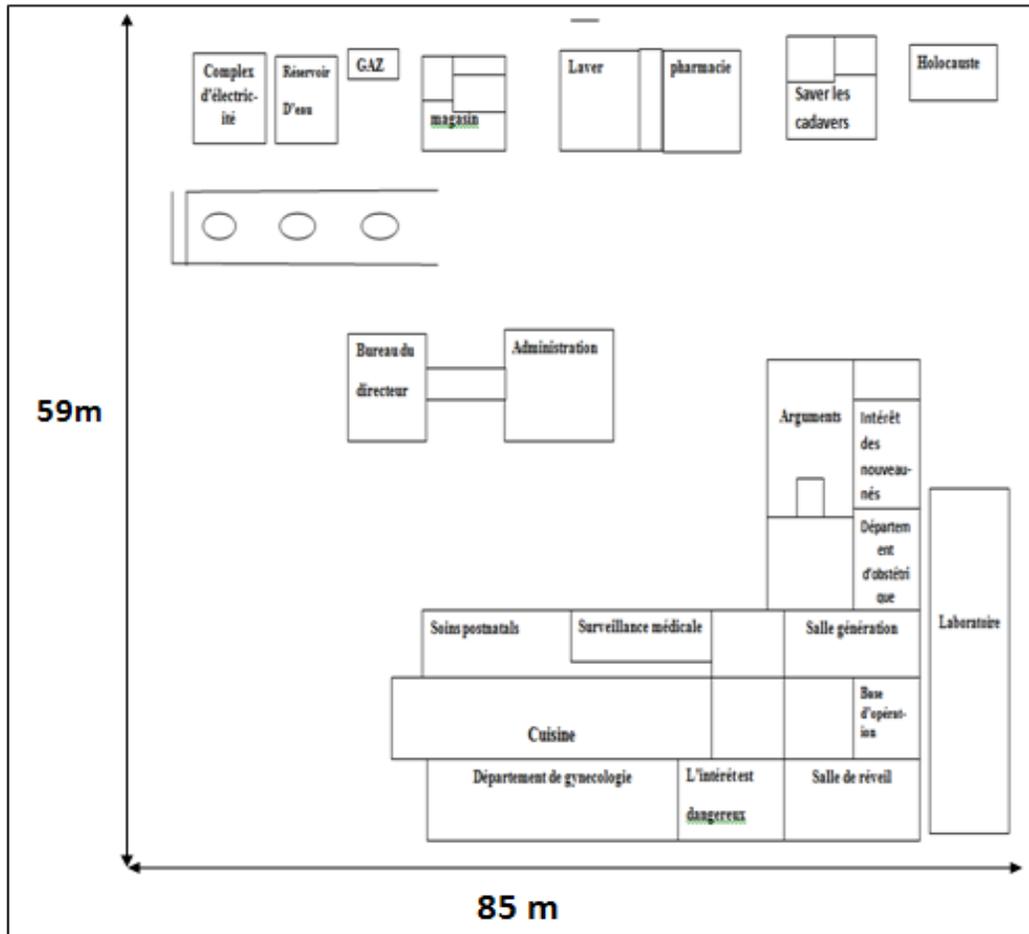
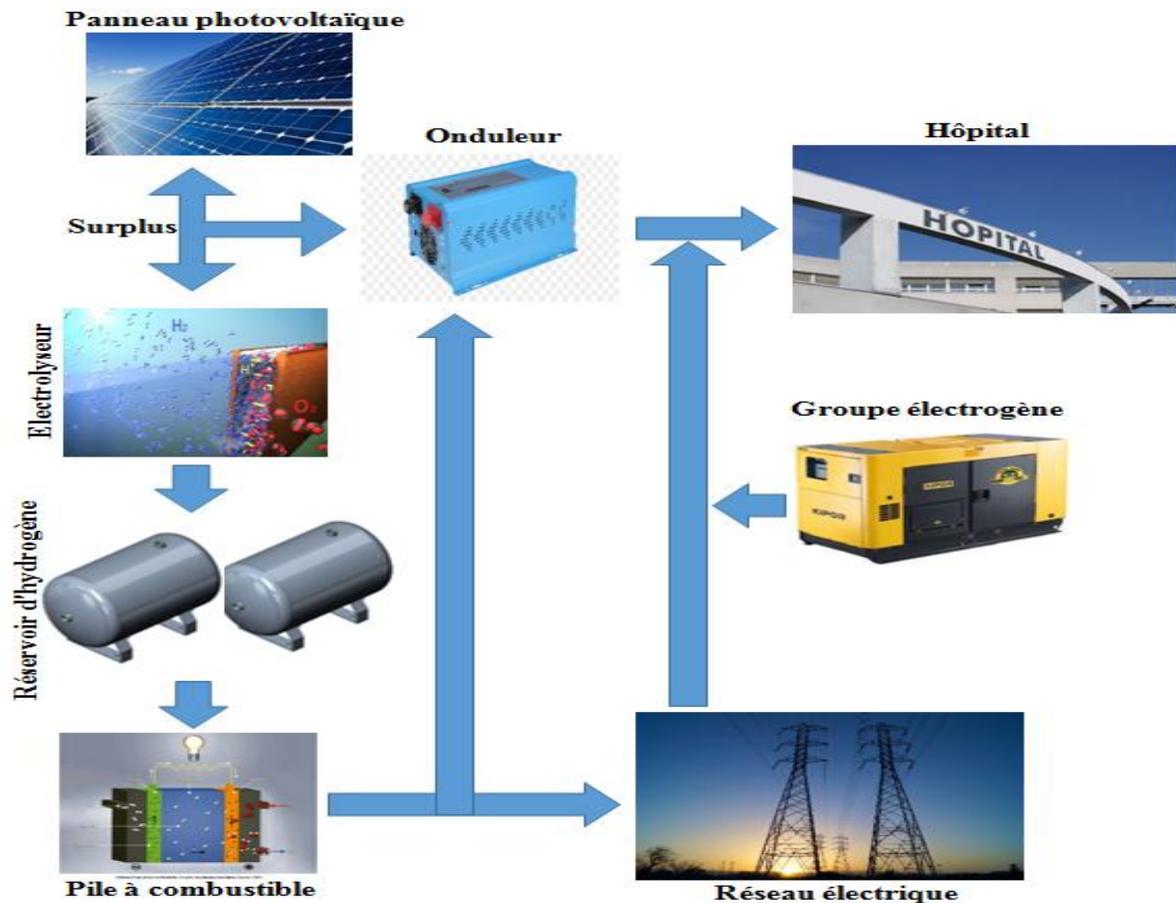


Figure 3. 1: Architecture d'hôpital Sidi Abdel Kader-Ouargla[39].

Le système d'alimentation hybride utilisé pour les analyses est présenté dans la figure 3.2. Il est composé de six composants : module photovoltaïque, onduleur, réservoir hydrogène, pile combustible, charge électrique et réseau électrique. Le système photovoltaïque produit l'énergie. Les aspects environnementaux et économiques ont été pris en considération pour l'évaluation de notre travail.



**Figure 3. 2:** système de fonctionnement de system d'étude proposé.

Le surplus d'énergie produite à partir du système photovoltaïque est exporté en électrolyseur pour produire l'hydrogène qui a été stocké en système de stockage (réservoir). Si l'énergie produite par le module photovoltaïque est inférieure à l'énergie demandée par la charge, la pile à combustible est utilisée pour alimenter le manque d'énergie. Lorsque la pile à combustible ne peut pas répondre le manque d'énergie, l'hôpital importera l'électricité du réseau électrique. Cette étude répétée pour différents climats en Algérie. Qu'ils sont les six wilayas suivantes : Adrar, Alger, Djelfa, Bechar, In Salah et Illizi, et nous suppose que la consommation de cet hôpital est le même dans tous les wilayas et on a une différence des irradiations entre eux on va faire un calcul pour trouver l'efficacité de notre système.

### 3.3. Modélisation du système énergétique

#### 3.3.1 Energie produite par un module photovoltaïque

##### a. Calcul de la puissance crête $P_c$ du générateur photovoltaïque

La puissance crête  $P_c$  de modules (en W) est donnée par la formule suivante [31] :

$$P_c = \frac{E_P}{H_{ens} \times \eta_{reg}} \quad (3.1)$$

Où :

$H_{ens}$  : est l'heure d'ensoleillement maximal (kWh/m<sup>2</sup>)

$P_c$  : est la puissance crête (kW<sub>c</sub>) et  $\eta_{reg}$  est l'efficacité du régulateur de charge des accumulateurs égale à 0.77 [31].

##### b. Calcul de nombre des panneaux photovoltaïque

A partir de la puissance crête du panneau on peut déterminer le nombre des panneaux nécessaires pour l'installation [31] :

$$N = \frac{P_c}{P_U} = \frac{P_c}{0,240} \quad (3.2)$$

N : le nombre des panneaux

$P_U$  : la puissance unitaire d'un seul panneau (kWh)

##### c. Calcul de la surface occupée par les panneaux

La surface totale des panneaux photovoltaïques [31] :

$$S_T = S_u \cdot N \quad (3.3)$$

$S_u$  : la surface unitaire des panneaux (m<sup>2</sup>)

N : les nombres des panneaux.

Les panneaux qui vont être utilisés sont fabriqués par l'entreprise Condor, et avec une puissance unitaire de 240W. Chaque panneau solaire est composé de 54 cellules photovoltaïques poly-cristallin à contact arrière offrant un rendement de 16,22%. Le tableau 3.1 donne les caractéristiques techniques de panneau utilisé qu'il a été choisi sur la base de la disponibilité sur le marché Algérien, du prix, de la durée de vie et de l'efficacité énergétique [32].

Tableau 3. 1:Caractéristiques de panneau utilisé.

Type	Puissance crête (W)	Surface unitaire (m <sup>2</sup> )	Rendement (%)
CEM240P-60	240	1.62	16,22%

### 3.3.2 Energie transférée à l'électrolyseur

Le surplus d'énergie produite par les systèmes photovoltaïques sera envoyé à l'électrolyseur pour produire l'hydrogène. Dans cette étude, un électrolyseur de type membrane échangeuse de protons (PEM) a été utilisé. Par conséquent, l'énergie transférée à l'électrolyseur est définie comme suit [33] :

$$E_{el-Tank}(t) = E_{surplus}(t) \times \eta_{el} \quad (3.4)$$

$E_{el-Tank}(t)$  : le transporté l'énergie de l'électrolyseur au réservoir d'hydrogène au temps(t) en (kWh)

$\eta_{el}$  : l'efficacité de l'électrolyseur (90%)

$E_{surplus}(t)$  : le surplus (kWh) peut être calculé à l'aide de l'Equation (3.5) :

$$E_{surplus}(t) = E_p - E_c \quad (3.5)$$

### 3.3.3 Systèmes de stockage de l'hydrogène (SSH)

L'énergie stockée dans le réservoir d'hydrogène est exprimée par la relation suivante [34] :

$$ST(t) = E_{el-Tank}(t) + (E_p - \frac{E_c}{\eta_{ond}}) \times \eta_{el} \quad (3.6)$$

$E_{el-Tank}(t)$  : le transporté l'énergie de l'électrolyseur au réservoir d'hydrogène au temps(t)(kWh).

$E_p$  : l'énergie produit des panneaux (kWh)

$E_c$  : l'énergie consommée par l'Hôpital (kWh)

$\eta_{el}$  : l'efficacité de l'électrolyseur (90%)

Quand l'énergie produite est inférieure ou égal la consommation de l'hôpital on utilise l'équation suivante [34] :

$$ST(t) = E_{el-Tank}(t) + (\frac{E_c}{\eta_{ond}} - E_p) / \eta_{fc} \quad (3.7)$$

Ou  $\eta_{fc}$  est l'efficacité de la pile à combustible (60%)

### 3.3.4 Pile à combustible

La pile à combustible est un générateur électrique qui convertit l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique pour calcul cette énergie ont utilisé l'équation suivante [33] :

$$E_{fc} = ST \times \eta_{fc} \quad (3.8)$$

St: stockage d'hydrogène (kWh)

$\eta_{fc}$  : L'efficacité de la pile à combustible (60%)

### 3.3.5 Réseau électrique

Lorsque le système PV et les dispositifs de stockage ne suffisent pas à fournir les charges requises, le réseau est utilisé pour fournir l'énergie déficitaire. En Algérie, le tarif d'achat de l'électricité est de 0,25 €/kWh. En cas de disponibilité d'export l'électricité au réseau, le taux de prix de vente de l'électricité est supposé être le même que le tarif d'achat de l'électricité (c'est-à-dire 0,25 €/ kWh. [34] [35].

## 3.4. Analyse environnementale

L'émission de gaz à effet de serre évitée ( $E_{GES}$  en kg) des systèmes conventionnels est évaluée selon l'équation :

$$E_{GES} = E_{con} \cdot F_E \quad (3.9)$$

Où  $E_{con}$  est l'énergie produite par les systèmes conventionnels (kWh) et  $F_E$  est le facteur d'émission des gaz à effet de serre qui dépend du type de combustible fossile et de la technique de conversion employée pour produire la puissance. Dans cette étude, l'émission de CO<sub>2</sub> évitée prévue est basée sur le facteur d'émission d'électricité de 0.548 (kg/kWh) [3].

## 3.5. Analyse économique

L'équation suivante utilisée pour calculer le Coût du cycle de vie (CCV) est donnée comme suit (Krantia et al. 2016) [36].

$$CCV = C_g + PWF (N. rb) \times C_E + (C_{imp,grille} - C_{exp,grille}) \quad (3.10)$$

Avec,  $C_g$  (€/kWh) est le coût global pour toute la durée du fonctionnement,  $C_E$  (€/kWh) représente le coût énergétique annuel nécessaire pour maintenir le confort à l'intérieur du bâtiment pour les caractéristiques de conception et d'exploitation sélectionnées.  $PWF$  est le facteur de valeur actuelle du coût de consommation d'énergie est défini comme suit :

$$PWF(N, r) = \begin{cases} \frac{(1+r)^{N-1}}{r(1+r)^N} & \left\{ \begin{array}{l} i > gr = \frac{i-g}{i+g} \\ i < gr = \frac{g-i}{1-i} \end{array} \right. \\ \frac{1}{1+i} & i = g \end{cases} \quad (3.11)$$

Avec, est la durée de vie d'un système (25 ans).

Le temps de retour d'investissement ( $PR$ ) est le coût global initial de système photovoltaïque divisé par les économies d'énergie annuelles  $AS$ , il est simplement donné par :

$$PR = \frac{C_g}{A_S} \quad (3.12)$$

Les économies d'énergie annuelles sont définies comme la différence entre le coût énergétique sans système photovoltaïque et le coût énergétique avec un système hybride, qu'utilise un couple optimale des panneaux photovoltaïques, divisée par le  $PWF$ .

Le coût global initial de systèmes photovoltaïques pour toute la durée du fonctionnement est donné par [37].

$$C_g = C_i + C_m + C_r \quad (3.13)$$

Avec :

$C_i$  est le coût initial,  $C_m$  est coût de maintenance et  $C_r$  est coût de renouvellement des composants.

### 3.5.1 Coût initial

$$C_i = N_{pv}C_{pv} + N_{con}C_{con} + N_{el}C_{el} + N_{st}C_{st} + N_{pi}C_{pi} \quad (3.14)$$

Avec,  $N_{pv}$  est le nombre de modules photovoltaïques,  $C_{pv}$  est le coût initial du système photovoltaïque (€/W),  $N_{con}$  est le nombre du convertisseur,  $C_{con}$  est le coût initial du convertisseur (€/W),  $N_{el}$  est le nombre d'électrolyseur,  $C_{el}$  est le coût initial de l'électrolyseur (€/W),  $N_{st}$  est le nombre de réservoir d'hydrogène,  $N_{st}$  est le coût initial de l'hydrogène (€/W),  $N_{pi}$  est le nombre de le pile à combustible et  $C_{pi}$  le coût de pile à combustible [3].

### 3.5.2 Coût de maintenance

Dans notre cas, il est donné en pourcentage par rapport au coût initial de chaque composant, et cela pour une période d'une année [3].

$$C_m = (N_{pv}C_{pv}m_{pv} + N_{el}C_{el}m_{el} + N_{con}C_{con}m_{con} + N_{st}C_{st}m_{st} + N_{pi}C_{pi}m_{pi}) \quad (3.15)$$

Avec :

- $m_{pv}$  : Pourcentage de maintenance annuel du système photovoltaïque, %
- $m_{el}$  : Pourcentage de maintenance annuel de l'électrolyseur, %
- $m_{con}$  : Pourcentage de maintenance annuel du convertisseur, %
- $m_{st}$  : Pourcentage de maintenance annuel de réservoir d'hydrogène, %
- $m_{pi}$  : Pourcentage de maintenance annuel de la pile à combustible, %

### 3.5.3 Coût de renouvellement des composants

Chaque composant de système a une durée de vie. Il doit être remplacé périodiquement sur toute la durée du fonctionnement de système photovoltaïque [3] :

$$C_i = N_{pv}C_{pv} \left( \frac{N-N_{pv}}{N_{pv}} \right) + N_{con}C_{con} \left( \frac{N-N_{con}}{N_{con}} \right) + N_{el}C_{el} \left( \frac{N-N_{el}}{N_{el}} \right) + N_{pi}C_{pi} \left( \frac{N-N_{pi}}{N_{pi}} \right) + N_{st}C_{st} \left( \frac{N-N_{st}}{N_{st}} \right) \quad (3.16)$$

Avec,  $N_{pv}$ ,  $N_{con}$ ,  $N_{el}$ ,  $N_{pi}$  et  $N_{st}$  représentent respectivement les durées de vie du système photovoltaïque, de le convertisseur, de l'électrolyseur, la pile à combustible et de réservoir d'hydrogène. Les caractéristiques et les prix unitaire, le coût de maintenance et la durée de vie des différents composants de l'installation sont présentés dans le tableau 3.2 : [32,35,38].

Tableau 3. 2: Coûts et la durée de vie des différents composants du système [32] [35] [38].

<b>Matériel</b>	<b>Prix unitaire (€)</b>	<b>Coût de maintenance dans la première année (%)</b>	<b>Durée de vie (ans)</b>	<b>Taux d'intérêt (%)</b>	<b>Taux d'inflation (%)</b>
CEM240P-60	103.1069	1% du prix	25	4	2.6
Convertisseur d'énergie	1222.91	0% du prix	10		
Générateur d'hydrogène	844.7	2% du prix	8	4	2.6
Moteur à hydrogène	1785.68	2.5% du prix	6		
Réservoir d'hydrogène	30249.242	1% du prix	20		

### 3.5.4 Résultats et discussion

Les tableaux suivants représentent la Consommation annuelle d'énergie dans l'hôpital, l'énergie produite annuellement et le déficit énergétique pour les wilayas d'Ouargla, Adrar, Alger, Djelfa, Bechar, In Salah et Illizi.

Tableau 3. 3: Consommation annuelle d'énergie dans l'hôpital, énergie produite annuellement et le déficit énergétique pour la wilaya de Ouargla.

Mois	Energie consommé en (MWh)	Energie produite en (MWh)	Le déficit énergétique en (MWh)
Janvier	181,46	144,04	-37,42
Février	121,37	146,89	25,52
Mars	101,73	174,15	72,42
Avril	101,27	170,09	68,82
Mai	142,47	169,6	27,13
Juin	185,16	158,74	-26,42
Juillet	186,08	162,75	-23,33
Août	235,12	165,13	-69,99
Septembre	156,42	158,69	2,27
Octobre	103,75	155,64	51,89
Novembre	82,44	137,41	54,97
Décembre	94,06	132,97	38,91
année	1691,37	1876,1	184,73

Tableau 3. 4: Consommation annuelle d'énergie dans l'hôpital, énergie produite annuellement et le déficit énergétique pour la wilaya d'In Salah.

Mois	Energie consommé en (MWh)	Energie produite en (MWh)	Le déficit énergétique en (MWh)
Janvier	181,46	148,81	-32,65
Février	121,37	148,4	27,03
Mars	101,73	173,29	71,56
Avril	101,27	167,49	66,22
Mai	142,47	165,89	23,42
Juin	185,16	154,7	-30,46
Juillet	186,08	159,08	-27
Août	235,12	162,69	-72,43
Septembre	156,42	158,14	1,72
Octobre	103,75	157,62	53,87
Novembre	82,44	142,06	59,62
Décembre	94,06	140,27	46,21
année	1691,37	1878,44	187,07

Tableau 3. 5: Consommation annuelle d'énergie dans l'hôpital, énergie produite annuellement et le déficit énergétique pour la wilaya d'Illizi.

Mois	Energie consommé en (MWh)	Energie produite en (MWh)	Le déficit énergétique en (MWh)
Janvier	181,46	150,21	-31,25
Février	121,37	148,82	27,45
Mars	101,73	173	71,27
Avril	101,27	166,57	65,3
Mai	142,47	164,66	22,19
Juin	185,16	153,4	-31,76
Juillet	186,08	158,04	-28,04
Août	235,12	162,04	-73,08
Septembre	156,42	158,32	1,9
Octobre	103,75	158,56	54,81
Novembre	82,44	143,59	61,15
Décembre	94,06	142,19	48,13
année	1691,37	1879,4	188,03

Tableau 3. 6: Consommation annuelle d'énergie dans l'hôpital, énergie produite annuellement et le déficit énergétique pour la wilaya de El Djelfa.

Mois	Energie consommé en (MWh)	Energie produite en (MWh)	Le déficit énergétique en (MWh)
Janvier	181,46	144,16	-37,3
Février	121,37	148,47	27,1
Mars	101,73	174,45	72,72
Avril	101,27	162,72	61,45
Mai	142,47	167,62	25,15
Juin	185,16	156,73	-28,43
Juillet	186,08	161,18	-24,9
Août	235,12	164,78	-70,34
Septembre	156,42	160,09	3,67
Octobre	103,75	158,91	55,16
Novembre	82,44	141,22	58,78
Décembre	94,06	136,49	42,43
année	1691,37	1876,82	185,45

Tableau 3. 7: Consommation annuelle d'énergie dans l'hôpital, énergie produite annuellement et le déficit énergétique pour la wilaya de Bechar.

Mois	Energie consommé en (MWh)	Energie produite en (MWh)	Le déficit énergétique en (MWh)
Janvier	181,46	147,39	-34,07
Février	121,37	148,26	26,89
Mars	101,73	173,9	72,17
Avril	101,27	164,86	63,59
Mai	142,47	167,08	24,61
Juin	185,16	155,26	-29,9
Juillet	186,08	160,43	-25,65
Août	235,12	163,93	-71,19
Septembre	156,42	159,24	2,82
Octobre	103,75	158,14	54,39
Novembre	82,44	141,31	58,87
Décembre	94,06	136,65	42,59
année	1691,37	1876,45	185,08

Tableau 3. 8: Consommation annuelle d'énergie dans l'hôpital, énergie produite annuellement et le déficit énergétique pour la wilaya d'Alger.

Mois	Energie consommé en (MWh)	Energie produite en (MWh)	Le déficit énergétique en (MWh)
Janvier	181,46	138,3	-43,16
Février	121,37	145,67	24,3
Mars	101,73	175,61	73,88
Avril	101,27	173,03	71,76
Mai	142,47	173,41	30,94
Juin	185,16	162,97	-22,19
Juillet	186,08	166,64	-19,44
Août	235,12	167,74	-67,38
Septembre	156,42	159,41	2,99
Octobre	103,75	153,85	50,1
Novembre	82,44	132,57	50,13
Décembre	94,06	127,85	33,79
année	1691,37	1877,05	185,68

Tableau 3. 9: Consommation annuelle d'énergie dans l'hôpital, énergie produite annuellement et le déficit énergétique pour la wilaya d'Adrar.

Mois	Energie consommé en (MWh)	Energie produite en (MWh)	Le déficit énergétique en (MWh)
Janvier	181,46	147,98	-33,48
Février	121,37	148,03	26,66
Mars	101,73	173,36	71,63
Avril	101,27	167,85	66,58
Mai	142,47	166,49	24,02
Juin	185,16	155,33	-29,83
Juillet	186,08	159,83	-26,25
Août	235,12	163,09	-72,03
Septembre	156,42	158,2	1,78
Octobre	103,75	157,27	53,52
Novembre	82,44	141,22	58,78
Décembre	94,06	139,24	45,18
année	1691,37	1877,89	186,52

A partir des tableaux ci-dessus, il y a eu 8 mois où la production d'énergie était supérieure à la consommation d'énergie et 4 mois où la consommation d'énergie était supérieure à la production. Il y avait 242 jours où la production d'énergie était supérieure à la consommation et 123 jours où la consommation d'énergie était supérieure à la production.

Nous observant qu'il y a quelques mois où on trouve des perturbations dans la production d'énergie par les panneaux solaires en raison du climat et de ses jours courts. À travers les valeurs, on constate qu'il existe un déficit énergétique tout au long de l'année dont la valeur varie d'une wilaya à l'autre, ce qui signifie qu'un pourcentage important de la consommation d'énergie est comblé par la production du système d'énergie photovoltaïque.

La figure ci-dessous montre la production, la consommation d'énergie et le déficit énergétique dans les wilayas :

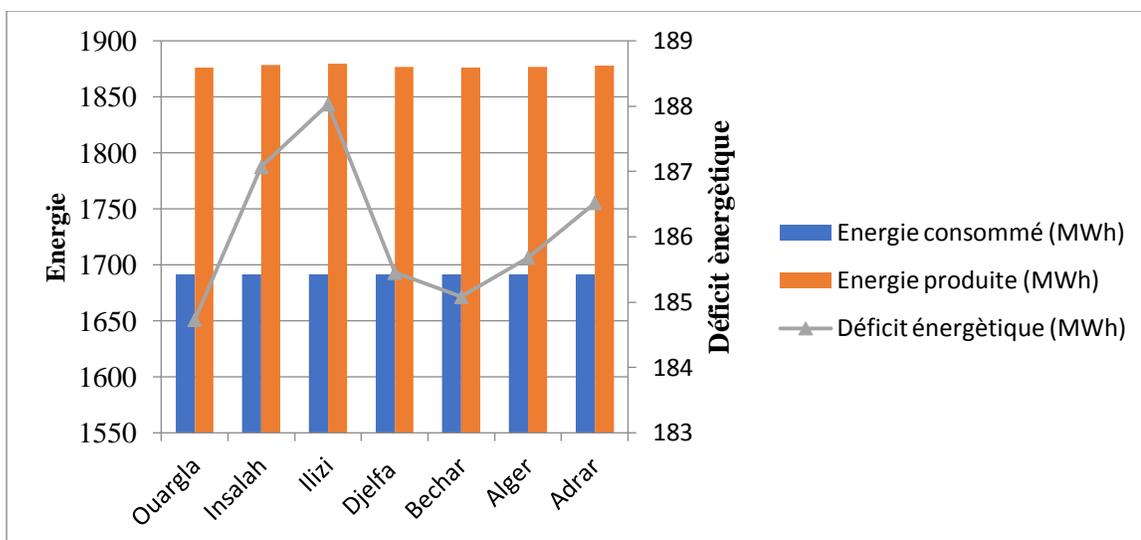


Figure 3. 3: Production, consommation d'énergie et le déficit énergétique dans les wilayas.

Nous notons que la consommation d'énergie annuelle est constante, la plus grande production étant dans la ville d'Ilizi (1879,4 MWh) avec un déficit énergétique 188,03 MWh, le système d'énergie renouvelable évite l'émission d'environ 102,99 tonnes de CO<sub>2</sub> par an dans cette ville. La plus faible dans la ville d'Ouargla avec déficit énergétique de 184,73 MWh et de 102,81 tonnes de CO<sub>2</sub> évité (Tableau 3.10).

Tableau 3. 10: Co<sub>2</sub> évité (tonnes) annuel dans les sept wilayas.

Wilayas	CO <sub>2</sub> évité (tonnes)
Ouargla	102,81
In Salah	102,94
Illizi	102,99
Djelfa	102,85
Bechar	102,83
Alger	102,86
Adrar	102,91

Ce tableau représente la quantité de CO<sub>2</sub> évité en tonnes par le système d'énergie renouvelable, la quantité des émissions de dioxyde de carbone évité est de 102,88 tonnes par an en Algérie.

La figure ci-dessous montre la quantité d'hydrogène produite et le nombre des panneaux photovoltaïques pour les sept wilayas :

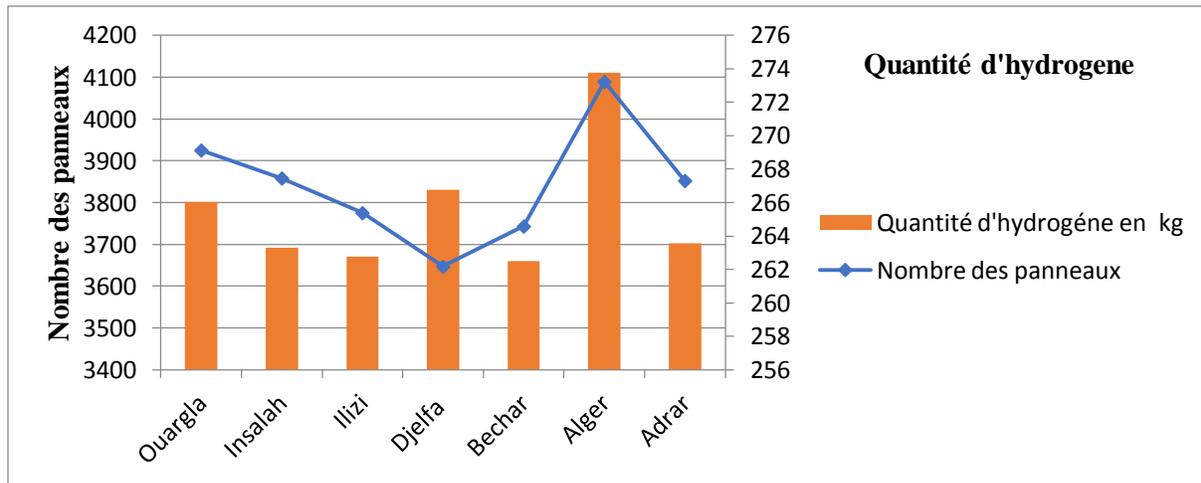


Figure 3. 4: Quantité d'hydrogène produite et le nombre des panneaux photovoltaïques pour les sept wilayas.

D'après la figure, on peut voir que la production d'hydrogène est suivie d'une augmentation du nombre de panneaux photovoltaïques afin d'assurer l'alimentation électrique nécessaire de l'électrolyte, où la plus grande quantité de production d'hydrogène est 273,76 kg dans la ville d'Alger, compensée par 4089 panneaux photovoltaïques. La plus petite quantité de production d'hydrogène est dans la ville d'Illizi 262,78 kg malgré qu'il ne contienne pas le plus petit nombre des panneaux (3775), donc nous concluons que l'irradiation solaire a un effet direct sur cette production.

Sur la base de la quantité d'énergie excédentaire (surplus) produite par les panneaux solaires, nous avons produit de l'hydrogène et l'avons stocké pour couvrir la consommation de l'hôpital en cas de besoin. Nous transformons le surplus d'hydrogène produit en électricité et le vendons au réseau national.

La figure ci-dessous montre le surplus d'hydrogène produit (kg) et l'énergie exportée (kWh) :

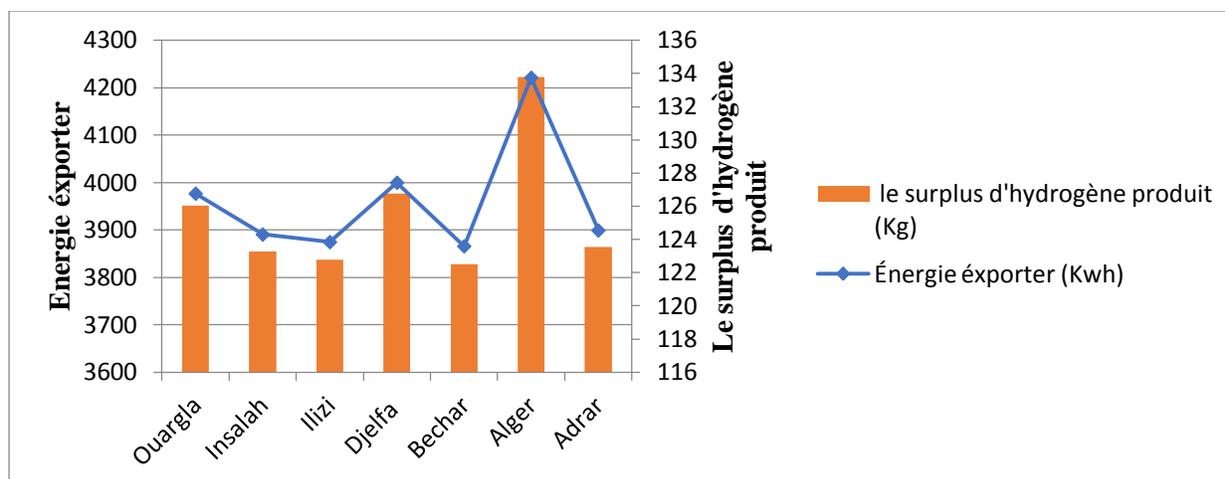


Figure 3. 5: Surplus d'hydrogène produit (Kg) et l'énergie exportée (KWh)

Nous notons que, quand le surplus d'hydrogène a une grande valeur 133,76 kg on trouve la plus grande énergie exportée au réseau électrique nationale (7034, 87 kWh) à la wilaya d'Alger avec un prix de vente (1758,71 €/kWh). Par contre La plus petite énergie exporter au réseau électrique national 3865,46 kWh à la wilaya de Bechar avec un prix de vente (966,36 €/kWh).

Le tableau suivant montre l'énergie importé à travers le réseau :

Tableau 3 .11:Énergie importé à travers le réseau.

Wilaya	Énergie importé (kWh)
Ouargla	5098,38
In Salah	5276,04
Illizi	5328,48
Djelfa	5223,02
Bechar	5219,60
Alger	4932,62
Adrar	5244,31

Lorsque le taux de consommation d'hôpital augmente et ne peut pas être couvert par les panneaux solaires et d'hydrogène stocké, il faut l'alimenter à travers le réseau électrique national. La ville de Illizi importe la grande quantité d'électricité à travers le réseau et la ville de Alger c'est la plus faible.

Tableau 3. 12: Temps de retour d'investissement pour les sept wilayas.

Station	Temps de retour d'investissement (année)
Ouargla	7,00
Alger	7,00
Adrar	6,99
Djelfa	6,97
Bechar	6,99
Illizi	7,00
In Salah	7,00

Le temps moyen de retour d'investissement d'un hôpital en Algérie est 6,99 années. Pour Ouargla, le temps moyen de retour d'investissement d'un logement est 7 ans.

### 3.6. Conclusion

Dans cette partie, nous étudions la possibilité de couvrir les consommations d'un bâtiment tertiaire dans différentes wilayas du pays (Alger, Djelfa, Bechar, Ouargla, Illizi, Adrar et In Salah), où nous avons choisi la maternité située à Ouargla comme référence pour cette étude. Nous avons utilisé des mécanismes pour produire de l'énergie électrique en utilisant des énergies renouvelables, en utilisant des panneaux solaires, ainsi qu'en utilisant l'électrolyseur qui produit de l'hydrogène, qui est stocké et utilisé en cas de besoin.

Pour réaliser cette étude dans la réalité, il est nécessaire d'utiliser un nombre important de panneaux solaires (4099 panneaux) dans la wilaya d'Alger comme le plus grand nombre et 3647 panneaux dans la wilaya de Djelfa comme le moindre nombre, ce qui nous permet de produire une charge électrique annuelle d'environ 1.87 GWh et d'éviter des émissions de dioxyde de carbone de 102,88 tonnes par an en Algérie. Chaque fois que le pourcentage d'hydrogène excédentaire par rapport à la quantité produite est grand, on trouve que la quantité d'énergie électrique commercialisée au réseau national est grande, ce qui se traduit par un revenu important. Le temps moyen de retour d'investissement d'un bâtiment tertiaire est 7 ans en Algérie. Donc nous concluons que l'hydrogène est une énergie appropriée pour une utilisation dans des bâtiments tertiaires.

# Conclusion générale

Face à l'augmentation des crises économiques face à l'énergie et à sa forte demande, notamment dans les bâtiments tertiaires, et à la tendance mondiale vers les énergies renouvelables au lieu des énergies fossiles, nous avons utilisé l'hydrogène dans notre étude.

Ce travail étudie comment couvrir les besoins du bâtiment en utilisant des panneaux solaires et de l'hydrogène, et sans recourir à la consommation du réseau, sauf dans quelques cas, dans plusieurs wilayas différentes du pays. Nous avons supposé que le montant de la consommation pour l'hôpital est le même dans toutes les wilayas car les conditions que traverse le pays ne nous ont pas permis d'apporter les valeurs de consommation à d'autres wilayas, et nous sommes appuyés dans notre étude sur le changement d'irradiation solaire d'une région à l'autre.

Les panneaux solaires ont produit une énergie de 1877,45 MWh et d'éviter des émissions de dioxyde de carbone de 102,88 tonnes par an en Algérie. On trouve que la plus grande énergie exporter au réseau électrique nationale (7034, 87 kWh) a la wilaya d'Alger avec un prix de vente (1758,71 €/kWh). L'énergie exportée au réseau électrique au niveau national est 5188,92594 kWh avec un prix de 1297,23 €/kWh. Le temps moyen de retour d'investissement d'un bâtiment tertiaire est 7 ans en Algérie.

Bien que cette étude soit bonne et rentable, il est nécessaire de mettre en place une installation spéciale pour les panneaux solaires, les réservoirs d'hydrogène et les moyens utilisés car le nombre total des panneaux photovoltaïques est important et ne peut pas être placé dans l'espace vide ou sur le toit de l'hôpital, et il vaut mieux que cette installation soit dans un établissement isoler de la ville pour éviter le danger de l'hydrogène stocké.

Au final, l'hydrogène reste parmi les énergies renouvelables qui doivent être largement exploitées dans un futur proche dans les bâtiments tertiaires et tous les autres bâtiments.

# Bibliographie

- 
- [1] Jacques V, 2009. Les énergies renouvelables, Presses Universitaires de France .
- [2] Ministère de l'énergie, Bilan Energétique national année 2019 Edition 2020.
- [3] GHEDAMSI Rebha, 2018. Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à énergie positive en Algérie, Université Kasdi Merbah Ouargla, Thèse de doctorat
- [4] APRUE Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation l'Utilisation de l'Energie
- [5] <https://www.algerische-botschaft.de/fr/petrole-lalgerie-dispose-de-reserves-prouvees-de-1-340-mns-de-tonnes-2/>(consulté le 28 Avril 2021)
- [6] bp Statistical Review of World Energy 2020/69<sup>th</sup> edition
- [7] <https://carlتيenen.com/2020/03/11/fourniture-de-gaz-a-leurope-le-nigeria-prend-un-pari-risque-entre-lalgerieet-le-maroc/5b3c410832f43>(consulté le 28 Avril 2021)
- [8] <https://www.dzairdaily.com/reserves-algerie-petrole-gaz-ministre-energie-mohamed-arkab-2020/>(consulté le 28 Avril 2021)
- [9] Rahmouni S, 2019. Etude prospective de la transition énergétique et l'impact environnemental en Algérie. Thèse de doctorat. , Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [10] Percebois.J, Mandil.C, 2012. Rapport énergie 2050. Commission Energies 2050. Février 2012
- [11] Recioui Bakhta, 2017. Etude prospective de la récupération d'énergie en Algérie. Thèse de doctorat. Université de Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, Algérie
- [12] [http://www.energies-renouvelables.org/energies\\_renouvelables.asp](http://www.energies-renouvelables.org/energies_renouvelables.asp)(consulté le 10 Mai 2021)
- [13] A. Mirecki, "Etude comparative des chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance," Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, France, Avril 2005.
- [14] Dahouénon M. A, 2011. Le manuel du technicien photovoltaïque. Hann Maristes-BP3869
- [15] Stéphane V. Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble -INPG, 2010. Français
- [16] Fellah B ,2012. Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité.

- Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah. Mémoire de Magister. Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen.
- [17] Gouareh A, 2017. Maîtrise et optimisation de la gestion énergétique en Algérie. Thèse de doctorat. Université de Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès, Algérie
- [18] Abdelhamid L, 2012. Contribution à l'Amélioration des Performances des Générateurs Eoliens - Evaluation de l'Impact des Energies Renouvelables sur l'Environnement. Thèse de doctorat. Université Hadj Lakhdar de Batna.
- [19] Melle MEKKI M, 2014. Récupération des déperditions d'énergie dans les complexes industriels et leur conversion en énergie électrique exploitable. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba.
- [20] JEAN-BENOIT D, 2016. Étude de l'influence d'éléments d'addition sur les propriétés de stockage de l'hydrogène dans le système Ti-V-Fe. Thèse de doctorat. Université PARIS-EST.
- [21] Transition to Sustainable buildings strategies and opportunities to 2050
- [22] Benmessaoud M T, 2012. SYSTÈME D'ÉNERGIE HYBRIDE PV-SOFC Étude de cas de réalisation stationnaire à l'USTO. Thèse de doctorat. Université des sciences et de la technologie - Mohamed Boudiaf- Oran.
- [23] Rivera-Tinoco, R., 2009. Etude technico-économique de la production d'hydrogène à partir de l'électrolyse haute température pour différentes sources d'énergie thermique.
- [24] Derbal H., M. Belhamel, And A. M'Raoui, 2007. l'hydrogène Vecteur Energétique Solaire. Revue Des Energies Renouvelables, P. 235-247
- [25] Jean-Louis Durville And J.-M.N. Jean-Claude Gazeau, Jean Cueugnet, Benoît Legait, 2015. Filière Hydrogène-Énergie, P. 161.
- [26] Jonchère, J. (2003). Production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles, Mémento sur l'hydrogène (fiche 3.1. 1)
- [27] Pottier, J., 2016. Production d'hydrogène par dissociation thermo-chimique de l'eau à partir de chaleur nucléaire, Mémento de l'hydrogène, fiche 3.2.2.
- [28] Julien L, 2016. L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés. Thèse de doctorat. Mines Paris.
- [29] Alleau, A.T, 2011. Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. Mémento de l'hydrogène, fiche 3.2. 1.

- 
- [30] Mounir S, 2010.étude de la production d'hydrogène par électrolyse et pile à combustible. mémoire de Magister. Université Mentouri de Constantine.
- [31] HADJADJ A. And O. KHENFER,2019. Etat De l'art Des Bâtiments A Energie Positive Avec Des Réflexions Sur Le Contexte Algérien. Université KASDI MERBAH, Ouargla.
- [32] [www.condor.dz](http://www.condor.dz) /Catalogue produits solaires photovoltaïques.
- [33] Hamid H , Fatemeh T , Edward R. C , Shuangshuang J, Bahram R,2020, Design and optimum energy management of a hybrid renewable energy system based on efficient various hydrogen production.
- [34] Charafeddine M, Belkhir N, Noureddine S, Abdessalem B, Yufeng Y,2020, Design optimization of grid-connected PVHydrogen for energy prosumers considering sector-coupling paradigm: Case study of a university building in Algeria
- [35] Bettayeb A , Madani A,2020.Production de l'hydrogène pour les besoins énergétiques du bâtiment à énergie positive,Mémoire de master,Université kasdi Merbah Ouargla.
- [36] Krartia M, Ihm P. 2016. Evaluation of net-zero energy residential buildings in the MENA region. *Sustainable Cities and Society*, 22:116-125.
- [37] Kapsalaki, M., V. Leal, and M. Santamouris, 2012. A methodology for economic efficient design of Net Zero Energy Buildings. *Energy and Buildings*, 55: p. 765 778.
- [38] <https://www.aps.dz/economie/118195-algerie-le-taux-d-inflation-annuel-a-2-6-a-fin-janvier> (Taux d'inflation)(consulté le 01 Juin 2021).
- [39] Document obtenue à travers la salle d'archive d'hôpital.

# Résumé

L'énergie est un facteur majeur de création de richesse et un élément important pour tout pays de développement économique, c'est ce qui rend les ressources énergétiques nécessaires et importantes pour tout pays dans le monde, car elle contribue à renforcer sa position économique. Une très grande partie de l'approvisionnement mondial en énergie primaire provient des combustibles fossiles. La consommation mondiale d'énergie augmente avec un rythme estimé de 2,3 % par an entre 2015 et 2040. Cette proportion menace d'augmenter les niveaux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Bâtiments résidentiels et bâtiments tertiaires sont la principale source de consommation d'énergie et d'émissions environnementales. En Algérie, le secteur du bâtiment est le plus consommateur d'énergie, suivi du secteur des transports et de l'industrie en raison de l'augmentation de la demande énergétique, de la forte augmentation de la population et des logements, de l'équipement électrique de chaque foyer, du manque de sensibilisation et du manque de culture sur l'efficacité énergétique et le désir croissant des gens pour le confort. Par conséquent, réduire l'utilisation de combustibles fossiles dans les bâtiments permet de réduire les impacts environnementaux. Et cela grâce à l'hydrogène renouvelable, qui est l'une des options les plus respectueuses de l'environnement pour produire de l'électricité. Cette étude vise à estimer l'impact des différentes options de production d'électricité sur l'environnement dans différents climats en Algérie. Pour ce faire, nous appuyons sur l'hydrogène pour combler tous les besoins d'électricité des bâtiments tertiaires en Algérie tout au long de l'année.

**Mots clés :**

Consommation d'énergie, Energies renouvelables, L'hydrogène, Bâtiment tertiaire, Coût du cycle de vie.

**Abstract:**

Energy is a major factor in building wealth and an important element for any country for economic development. This is what makes energy resources necessary and important for any country in the world. Because it contributes to strengthening its economic position. A very large proportion of the world's primary energy supply comes from fossil fuels. Global energy consumption is increasing at an estimated rate of 2.3% annually between 2015 and 2040. This proportion threatens to increase levels of CO<sub>2</sub> in the atmosphere. Residential buildings and tertiary buildings are the main source of energy consumption and emissions environmental. In Algeria, the building sector is the most energy-consuming sector, followed by the transport sector and industry due to the increase in energy demand, the strong increase in population and housing, electrical equipment in every home, lack of awareness and lack of culture on energy efficiency and people's growing desire for comfort. Therefore, reducing the use of fossil fuels in buildings reduces environmental impacts. And this thanks to renewable hydrogen, which is one of the most environmentally friendly options for generating electricity. This study aims to estimate the impact of the different electricity production options on the environment. in different climates in Algeria. To do this, we rely on hydrogen to meet all the electricity needs of tertiary buildings in Algeria throughout the year.

**Keywords :**

Energy consumption, Renewable energies, Hydrogen, Tertiary building, Life cycle cost.

**الخلاصة:**

تعتبر الطاقة عاملا رئيسيا في بناء الثروة وعنصرا مهما لأي دولة من أجل التنمية الاقتصادية. وهذا ما يجعل موارد الطاقة ضرورية ومهمة لأي دولة في العالم. لأنها تساهم في تقوية مكانتها الاقتصادية. وتأتي نسبة كبيرة جدا من إمدادات الطاقة الأولية في العالم من الوقود الأحفوري. ويزداد استهلاك الطاقة العالمي بنسبة قدرت ب 2,3% سنويا في الفترة الممتدة بين 2015 و2040، هذه النسبة تهدد بزيادة مستويات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. تعتبر المباني (السكنية والثلاثية) المصدر الرئيسي لاستهلاك الطاقة والانبعاثات البيئية. في الجزائر، يستهلك قطاع البناء أكبر قدر من الطاقة، يليه قطاع النقل والصناعة بسبب الزيادة في الطلب على الطاقة، والزيادة الكبيرة في عدد السكان والمساكن، وفي المعدات الكهربائية في كل منزل، ونقص الوعي ونقص الثقافة حول كفاءة الطاقة، ورغبة الناس المتزايدة في الراحة لذلك، فإن تقليل استخدام الوقود الأحفوري في المباني يساعد في تقليل الآثار البيئية. وذلك عبر الهيدروجين المتجدد الذي يعتبر أحد أكثر الخيارات الصديقة للبيئة لتوليد الكهرباء. حيث تهدف هذه الدراسة إلى تقدير تأثير خيارات توليد الطاقة المختلفة على البيئة في مناحات مختلفة من الجزائر. للقيام بذلك نعتمد على الهيدروجين لتعويض جميع احتياجات الكهرباء للمباني الثلاثية في الجزائر على مدار العام.

**الكلمات المفتاحية :**

استهلاك الطاقة, الطاقات المتجددة, الهيدروجين, المباني الثلاثية, تكلفة دورة الحياة .