

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES  
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
École Supérieure en  
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : **Électrotechnique**  
Spécialité : **Énergie et environnement**

Présenté par :  
**Belkacem Hafsa**  
**Yacheur Hanane**

## Réalisation d'un prototype d'électrolyseur de type alcalin pour la production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire

Soutenu publiquement, le 18/ 09 /2023, devant le jury composé de :

Mme N. Benahmed	Pr.	ESSA Tlemcen	Présidente
Mr. M. Mebrouki	MCA	ESSA Tlemcen	Directeur de mémoire
Mme I. Bousmaha	MCA	ESSA Tlemcen	Examinatrice
Mr. A. K. GHezouani	Docteur	Univ. Bechar	Examinateur
Mr. B. Messaoudi	MCA	ESSA Tlemcen	Examinateur
Mr. M. Benekrouf	MCA	ESSA Tlemcen	Examinateur

Année universitaire : 2022 /2023

# *Remerciements*

Tout d'abord, nous souhaitons exprimer notre gratitude envers Dieu, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la force, la volonté et la patience tout au long de nos années d'études, et pour nous avoir permis de mener à bien ce travail.

Nous tenons à remercier chaleureusement notre encadreur, Monsieur MEBROUKI, pour son soutien précieux et ses conseils éclairés tout au long du processus de rédaction de notre mémoire. Votre expertise, votre patience et votre engagement ont été d'une valeur inestimable, et nous avons énormément appris grâce à vous.

Nous tenons à remercier monsieur Ramzi, exprimer notre plus sincère gratitude pour votre inestimable soutien tout au long de ces années passées au FabLab. Votre expertise, votre disponibilité et votre patience envers nous ont été d'une aide précieuse, et nous tenions à vous en remercier chaleureusement.

Nous adressons également nos remerciements les plus sincères à Monsieur MERAD, Chef du département Génie électrotechnique, pour son assistance et ses orientations constructives, ainsi qu'à tout le personnel du département. Leur soutien et leur collaboration ont été inestimables.

Nous souhaitons également exprimer notre gratitude envers l'ensemble des professeurs de notre établissement. Leurs connaissances approfondies, leurs cours inspirants et leurs encouragements constants ont été une source de motivation pour nous. Leur dévouement à l'enseignement et leur engagement envers nos succès académiques méritent d'être salués.

Notre gratitude va à chacun d'entre vous pour votre contribution précieuse à notre mémoire. Votre soutien indéfectible a été un véritable moteur dans la réalisation de ce travail de recherche.

Que Dieu bénisse tous ceux qui ont été impliqués et nous ont aidés à atteindre ce stade.

---

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à:*

*Mes chers parents, qui ont tout sacrifié pour que je puisse arriver à ce stade-là, sans eux je n'aurais jamais pu y arriver. Que dieu les garde pour moi.*

*Mes frères et ma sœur qui m'ont soutenu  
moralement tout au long de mon parcours  
universitaire. Et tout ma grande famille  
Ma chère copine et binôme Hafsa,  
Mes amis et mes camarades de la promotion.*

*Avec une profonde gratitude,*

*Y.Hanane*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail :*

*À mes chers parents, que Dieu les garde et les protège, que null dédicace*

*Je tiens également à adresser mes remerciements sincères à mes sœurs Asma et Aicha, ainsi qu'à mon frère Mohamed, ainsi qu'à toute ma famille.*

*À ma chère copine et binôme Y. Hanane, je te suis infiniment reconnaissant(e) d'avoir cru en moi et d'avoir été une part importante de cette étape de ma vie.*

*Je souhaite également exprimer ma gratitude à tous mes chers amis et à toute la promotion 2023.*

*À vous tous, mes proches et mes amis, je vous adresse mes plus sincères remerciements.*

*Avec une profonde gratitude,*

*B.Hafsa*

## ملخص

تعتمد التوجيه الطاقوي المستقبلي في جميع أنحاء العالم على القدرة على الابتكار واعتماد حلاً صديقاً للبيئة.

تجسد دراستنا هذا الرؤية من خلال التركيز على تصميم وتنفيذ نموذج لمُولد هيدروجين شمسي مُشغَّل بواسطة ألواح شمسية. يتضمن هذا المُولد بطاريات لضمان توفير الطاقة المستمرة حتى خلال الليالي، وذلك من خلال تحسين كفاءة الطاقة باستخدام دائرة تحويل التيار المستمر تم التحكم فيها بواسطة اردوينو، وذلك لزيادة قدرة الألواح الشمسية الإنتاجية. على الرغم من القيود التقنية التي وجهناها خلال هذا المشروع، لم نتردد في اقتراح حلاً مبتكراً مثل تطوير وتكييف محلول أكثر اقتصادية لعملية تحليل الماء إلى هيدروجين وأكسجين. يمكن أن تثور هذه التقنية ثورة في العديد من الصناعات. فإن المزايا الاقتصادية والبيئية لهذا الحلا تبدو مثيرة للغاية. لذلك، نعتقد أن هذه الدراسة ستساهم بالتأكيد في تعميم تقنية إنتاج الهيدروجين الشمسي وتنفيذها في مجموعة متنوعة من المجالات، مما يتيح آفاقاً واعدة لمستقبل أفضل من ناحية الطاقة والبيئة.

**الكلمات الرئيسية:** نموذج مُنتج للهيدروجين الشمسي; جهاز تحليل قلوي; الهيدروجين الأخضر; التطبيقات التجارية لمُنْتَج الهيدروجين

## Résumé

L'orientation énergétique future à travers le monde dépend de l' aptitude à innover et à adopter des solutions respectueuses de l'environnement.

Notre étude incarne cette vision en se penchant sur la conception et la mise en œuvre d'un prototype de générateur d'hydrogène solaire, alimenté par des panneaux solaires. Ce générateur intègre des batteries pour garantir une alimentation continue, même pendant les périodes nocturnes, tout en optimisant l'efficacité énergétique grâce à un circuit d'un convertisseur DC-DC, contrôlé par Arduino, et ce pour maximiser la puissance de sortie des panneaux solaires. Malgré les contraintes techniques rencontrées au cours de ce projet, nous n'avons pas hésité ou manqué à proposer des solutions novatrices, telle que le développement et l'adaptation d'un électrolyseur plus économique. Cette technologie peut révolutionner plusieurs secteurs. Les avantages économiques et environnementaux de cette solution s'avèrent très intéressants. De ce fait, nous pensons que cette étude contribuera sans doute à la généralisation de la technologie de production d'hydrogène solaire et à sa mise en œuvre dans divers domaines, offrant ainsi des perspectives prometteuses pour un meilleur avenir énergétique et environnemental.

**Mots clés:** Prototype d'un Générateur d'hydrogène solaire; Électrolyseur alcalin; Hydrogène vert; application commerciales du générateur d'hydrogène.

## Abstract

The future energy direction worldwide depends on the ability to innovate and adopt environmentally-friendly solutions.

Our study embodies this vision by focusing on the design and implementation of a prototype solar hydrogen generator powered by solar panels. This generator incorporates batteries to ensure continuous power, even during night-time, while optimizing energy efficiency through a DC-DC converter circuit controlled by Arduino to maximize the solar panel output. Despite the technical constraints encountered during this project, we did not hesitate to propose innovative solutions, such as the development and adaptation of a more cost-effective electrolyser. This technology has the potential to revolutionize several sectors. The economic and environmental benefits of this solution are very promising. Therefore, we believe that this study will undoubtedly contribute to the widespread adoption of solar hydrogen production technology and its implementation in various fields, offering promising prospects for a better energy and environmental future.

**Keywords:** Solar Hydrogen Generator Prototype; Alkaline Electrolyser; Green Hydrogen; Commercial Applications of Hydrogen Generator.



# Table des figures

1.1	Feuille de route de développement de l'hydrogène en Algérie [1] . . .	3
1.2	Trois principales méthodes de production d'hydrogène . . . . .	5
1.3	Capacité européenne d'électrolyse 2014-2025 d'après Delta-EE [5] . .	6
1.4	Différentes méthodes de stockage d'hydrogène . . . . .	6
1.5	Différentes sources d'hydrogène et applications potentielles de l'hydrogène [2] . . . . .	7
1.6	Cellule photo électrochimique . . . . .	8
1.7	Système de production d'hydrogène a base énergie thermique solaire	9
1.8	Principe de l'alimentation de l'électrolyseur par photovoltaïque [3] . .	9
1.9	Estimation du coût d'installation d'une usine de dessalement en fonction de la technologie utilisée [4]. . . . .	11
1.10	Cycle de l'hydrogène. . . . .	13
1.11	Différentes options pour l'électrolyse direct et indirect de l'eau de mer	14
2.1	Connexion directe de PV et électrolyseur . . . . .	18
2.2	Connexion indirecte de PV et électrolyseur . . . . .	18
2.3	Schéma de base d'un convertisseur Buck . . . . .	19
2.4	Circuit équivalent pour période de mise sous tension . . . . .	19
2.5	Circuit équivalent pour la période d'arrêt . . . . .	19
2.6	Schéma synoptique d'un générateur d'Hydrogène . . . . .	24
2.7	Le dimensionnement des plaques en acier inoxydable, les électrodes cathode, anode (A), et le joint d'étanchéité(B) . . . . .	26
2.8	Schéma de raccordement des panneaux solaire . . . . .	28
2.9	Schéma fonctionnel du chargeur de batterie . . . . .	29
2.10	MOSFET (IRFZ44N) . . . . .	30
2.11	Schéma de câblage du driver IR2110 . . . . .	31
2.12	Capteur de courant type ACS712 . . . . .	32
2.13	Capteur de tension . . . . .	32
2.14	Partie électronique de prototype circuit MPPT . . . . .	34
2.15	Circuit imprimé réalisé . . . . .	35
2.16	Prototype final . . . . .	36
3.1	1 <sup>ère</sup> expérience : mesure de la quantité des gaz produits par l'électrolyseur	40
3.2	Variation du gaz produit en fonction de courant . . . . .	40
3.3	Variation du gaz produit en fonction de concentration d'électrolyte koh . . . . .	41
3.4	2 <sup>ème</sup> expérience : Séparation des gaz. . . . .	42

3.5	Résultats obtenus par le capteur d'hydrogène pour les deux sorties (1) et (2) . . . . .	43
3.6	Innovations dans la conception de l'électrolyseur type alcalin . . . . .	44
3.7	Défi du choix du Plexiglas :	
	(1) Plexiglas avec Cassure Durant l'Expérience	
	(2) Vue Rapprochée de la Cassure dans la Photo 1	
	(3) tous les Plexiglas Casés Utilisés durant le Projet (Total : 25 Pièces)	46
3.8	Défi développement du circuit :	
	(1) Circuit Développé par nos Propres Moyennes (Durée : 2 semaines)	
	(2) Circuit Développé au Niveau de l'Université de Tlemcen (Durée : moins d'une heure) . . . . .	47

# Liste des tableaux

1.1	Densités énergétiques volumétriques et gravimétriques des combustibles courants. [5]	2
1.2	Projet de feuille de route [6].	4
1.3	Point d'éclair de certains combustibles courants [7]	12
2.1	Calcul de volume théorique de gaz $H_2$	23
2.2	Caractéristiques des panneaux choisis	27
2.3	Caractéristiques de la batterie choisie	29
4.1	Prix des différents composants en dinar algérien	53
4.2	Côts détaillés des différents composants de notre chalumeau.	54
4.3	Coût énergétique du chalumeau classique.	55



# Abréviations

GN	Gaz Naturel
PtX	Power to X
ER	Énergie Renouvelable
DCDC	un convertisseur de courant continu (DC) en courant continu (DC)
OER	Oxygène Évolution Réaction
PV	Photovoltaïque
MPPT	Maximum Power Point Tracking
I	Intensité du courant électrique [A]
$I_{DS}$	Courant de commutation
$I_{sc}$	courant de court-circuit maximal du panneau solaire
PWM	Pulse Width Modulation
LCD	Écran à Cristaux Liquides
$KOH$	Hydroxyde de Potassium
$NaHCO_3$	Bicarbonate de Sodium
CDRE	Centre de Recherche de l'Énergie Renouvelable
ONG	Organisation Non Gouvernementale
KOMATSU	Une entreprise japonaise bien connue dans la fabrication d'équipements
ppm	Nombre de molécules du gaz à effet de serre considéré par million de molécules d'air.



# Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Abréviations

Table des matières

Introduction générale

<b>1</b>	<b>L'état d'art d'hydrogène</b>	<b>1</b>
1	Introduction . . . . .	1
2	L'hydrogène en tant que vecteur d'énergie propre . . . . .	1
3	L'émergence de l'hydrogène dans l'économie nationale . . . . .	3
4	L'hydrogène : de la production à l'utilisation . . . . .	4
4.1	La production d'hydrogène : . . . . .	4
4.2	Stockage de l'hydrogène . . . . .	6
4.3	Applications d'hydrogène et possibilités d'utilisation . . . . .	7
5	Analyse globale sur les systèmes énergétiques hybrides solaire-hydrogène 8	
6	Défis et opportunités de l'hydrogène vert . . . . .	10
6.1	Les défis : . . . . .	10
6.2	Opportunités . . . . .	12
7	Vue d'ensemble de la production de l'hydrogène à partir de l'eau de mer . . . . .	13
8	Conclusion . . . . .	14
<b>2</b>	<b>Dimensionnement et réalisation</b>	<b>17</b>
1	Introduction . . . . .	17
2	Présentation d'un système . . . . .	17
3	Conception et dimensionnement du prototype : . . . . .	24
3.1	Dimensionnement et conception du générateur d'hydrogène . . . . .	24
3.2	Dimensionnement du système PV : . . . . .	26
3.3	Caractéristiques de la batterie choisie . . . . .	28
3.4	Contrôleur de charge (MPPT) . . . . .	29
3.5	Mesure de la tension et du courant . . . . .	31
3.6	Partie affichage : . . . . .	32
4	Réalisation du prototype . . . . .	33

4.1	partie mécanique :	33
4.2	Réalisation de la partie électronique :	34
4.3	Programme Arduino de notre projet	35
5	Présentation du prototype réalisé	35
6	Conclusion	36
<b>3</b>	<b>Résultats et perspectives</b>	<b>39</b>
1	Introduction	39
2	1 <sup>ère</sup> expérience : quantité des gaz	39
2.1	Description de l'expérience.	39
2.2	Discussion globale des résultats de la première expérience.	41
3	2 <sup>ème</sup> expérience : Séparation des gaz.	42
3.1	Évaluation de l'efficacité de la séparation des gaz.	43
3.2	Interprétation des résultats de la 2 <sup>ème</sup> expérience	43
4	Perspectives futures et améliorations possibles	43
5	Défis et contraintes lors de la mise en œuvre de notre projet	45
5.1	Défi : Sélection et choix des composants appropriés	45
5.2	Défi : Disponibilité des ressources humaines qualifiées	46
5.3	Défi : Intégration des technologies	47
5.4	Contrainte : Limitations de temps et de budget	47
6	Conclusion	48
<b>4</b>	<b>Étude économique</b>	<b>49</b>
1	Introduction	49
2	Applications commerciales du générateur d'hydrogène	49
2.1	Analyse du marché	50
2.2	Analyse de la concurrence :	50
2.3	Étude économique	53
3	But du projet	55
4	Partenaires stratégiques	56
5	Activités clés	56
6	Ressources clés	57
7	Propositions de valeur	58
8	Relation client	58
9	Cibles	59
10	Canaux	59
11	Concurrence	59
12	Stratégie de vente	60
12.1	Démonstrations du produit	60
12.2	Démonstrations en ligne	60
12.3	Sensibilisation et éducation	60
13	Structure des coûts	60
14	Flux de revenus	61
15	Tableau de modèle économique( Business Model Canvas)	62
16	Conclusion	64
	<b>Conclusion générale</b>	<b>65</b>





# Introduction générale

L'énergie solaire représente aujourd'hui l'une des solutions les plus prometteuses pour répondre aux enjeux majeurs de notre société, tels que le changement climatique, la dépendance aux énergies fossiles et la nécessité de développer des sources d'énergie propre et renouvelable. Parmi les nombreuses applications de l'énergie solaire, la production d'hydrogène par électrolyse solaire se distingue comme une technologie clé dans la transition vers un avenir énergétique durable. Il existe plusieurs méthodes différentes pour la production d'hydrogène solaire à partir de l'eau, mais l'électrolyse se présente comme la plus prometteuse. Ce mémoire se penche sur les systèmes énergétiques hybrides solaire-hydrogène et explore les différentes méthodes de production d'hydrogène solaire. L'objectif est d'analyser en profondeur ces systèmes, tout en considérant les défis et les limites liés à ces technologies. De la conception de prototypes à l'évaluation de leur viabilité commerciale, nous parcourons l'ensemble du processus pour mieux comprendre comment l'hydrogène solaire peut contribuer à assurer un avenir énergétique plus durable et respectueux de l'environnement.

Ce mémoire est centré sur l'étude et la réalisation d'un prototype de Système de Production d'Hydrogène Solaire, dans le but de contribuer au développement de cette technologie prometteuse. Notre travail est organisé en quatre chapitres clés, Le premier chapitre présente un état de l'art de l'hydrogène, tandis que le deuxième chapitre se concentre sur le dimensionnement et la réalisation du Générateur d'Hydrogène Solaire. Nous abordons les aspects techniques liés au dimensionnement de l'installation, en tenant compte des paramètres solaires, des matériaux requis et des composants électrochimiques. Nous décrivons également les étapes cruciales de la fabrication du générateur d'hydrogène solaire.

Dans le troisième chapitre, nous exposons les résultats de nos expériences et discutons des défis et des contraintes rencontrés lors de la mise en œuvre de notre projet, en mettant en exergue les perspectives futures et les améliorations envisageables. Enfin, le dernier chapitre est dédié à une évaluation des applications commerciales du générateur que nous avons développé. Nous y comparons les performances d'un chalumeau à hydrogène avec celles d'un chalumeau classique, tout en élaborant un Business Model Canvas (BMC) pour discuter de la rentabilité de notre projet. Dans l'ensemble, ce mémoire vise à contribuer à l'avancement de la technologie de l'hydrogène solaire et à sa mise en œuvre pratique dans un contexte de transition vers des sources d'énergie plus propres et renouvelables.

# Chapitre 1

## L'état d'art d'hydrogène

### 1 Introduction

Le secteur de l'énergie en l'Algérie est confronté à un double défi, à savoir répondre à une demande croissante en énergie tout en limitant l'impact environnemental, notamment en réduisant les émissions anthropiques de gaz à effet de serre qui sont de plus en plus reconnues comme étant la principale cause du changement climatique. De ce fait, le développement des énergies renouvelables peut être le meilleur moyen pour atténuer ces émissions. Dans les prochaines années, avec l'adoption de ce modèle d'énergie qui représente une meilleure transition énergétique et une amélioration de l'efficacité énergétique deviendront des vecteurs majeurs dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Actuellement, on constate une prise de conscience croissante dans la société concernant l'utilisation rationnelle des ressources limitées avec la nécessité de développer des technologies respectueuses de l'environnement, basée sur une tendance croissante de la réutilisation et le recyclage des déchets spécifiques pour la production d'énergie écologique [8].

Néanmoins, le fait de produire de l'électricité à partir de sources renouvelables peut entraîner une fluctuation dans la quantité d'énergie produite, ce qui nécessite un stockage d'énergie pour pouvoir répondre à tout moment à la demande d'électricité. En d'autres termes, le stockage de l'énergie est un élément clé pour permettre une utilisation efficace et fiable des sources d'énergies renouvelables. Actuellement, un pourcentage de plus en plus croissant d'électricité en Algérie est généré à partir de sources d'énergie renouvelables [8].

### 2 L'hydrogène en tant que vecteur d'énergie propre

L'hydrogène (la formule moléculaire  $H_2$ ) est l'élément chimique le plus simple et le plus léger du tableau périodique (numéro atomique 1). D'ailleurs l'hydrogène représente à lui-seul près de 90% de la masse totale de l'univers, cependant il ne se trouve pas sous sa forme libre dans la nature, mais en combinaison avec d'autres éléments chimiques, qui nécessitent un traitement chimique pour sa production. L'énergie contenue dans l'hydrogène peut être récupérée à partir de deux méthodes citées ci-dessous, le rejet engendré n'est constitué que de vapeur d'eau et de chaleur :

TABLEAU 1.1 – Densités énergétiques volumétriques et gravimétriques des combustibles courants. [5]

Matériel	Energie par kilogramme (MJ /KG)	Energie par litre (MJ/L)
Hydrogène (liquide)	143	10.1
Hydrogène (comprimé,700 bars)	143	5.6
Hydrogène (ambiante pression)	143	0.0107
Méthane (ambiante pression)	55.6	0.0378
Gaz naturel(liquide)	53.6	22.2
Gaz naturel (comprimé 250bars)	53.6	9
Propane GPL	49.6	25.3
GPL butane	49. 1	27.7
Essence	46.4	34.2
Diesel	45.4	34.6

- Combustion de l'hydrogène : Lorsque l'hydrogène est brûlé en présence d'oxygène, il se combine pour former de l'eau ( $H_2O$ ) sous forme de vapeur. Cette réaction chimique libère une quantité d'énergie plus élevée par kilogramme d'hydrogène que la combustion d'un kilogramme d'essence. En effet, la combustion d'un kilogramme d'hydrogène libère environ trois fois plus d'énergie que la combustion d'un kilogramme d'essence .
- Par une pile à combustible :L'hydrogène couplé à un apport d'air et introduit dans une pile à combustible permet de produire de l'électricité. Lorsque l'hydrogène utilisé est produit uniquement à partir d'énergies renouvelables, ni sa production, ni son utilisation ne produisent alors du  $CO_2$ . C'est ce qu'on appelle communément l'hydrogène «vert».

De plus, l'hydrogène a un avantage unique qui se résume à sa polyvalence, son faible impact environnemental, sa densité énergétique élevée et sa capacité à être produit de manière relativement aisée. Donc à partir de nombreuses sources renouvelables disponibles en grande quantité dans la nature, sa production devient intéressante et rentable pour le remplacement des carburants fossiles.

Aussi, en l'associant avec des piles a combustible il devient un vecteur énergétique durable pour plusieurs applications. Ainsi l'hydrogène permet de diversifier le bouquet énergétique et de s'affranchir de la dépendance aux ressources fossiles dont les réserves sont limitées et géographiquement concentrées. Par ailleurs, l'hydrogène est souvent désigné comme un « transporteur d'énergie » ou « vecteur énergétique », actuellement considéré comme le vecteur d'énergie le plus propre et le plus efficace. Il est considéré comme le carburant le plus écologique et durable et représente ainsi un enjeu scientifique, environnemental et économique.

### 3 L'émergence de l'hydrogène dans l'économie nationale

Actuellement, concernant les types d'hydrogène sur lesquels l'Algérie se focalise, la feuille de route nationale de développement de l'hydrogène renouvelable et propre prend en compte deux types : l'hydrogène bleu (produit par la conversion du méthane) et l'hydrogène vert (à travers l'électrolyse de l'eau à l'aide d'énergies renouvelables). [1]

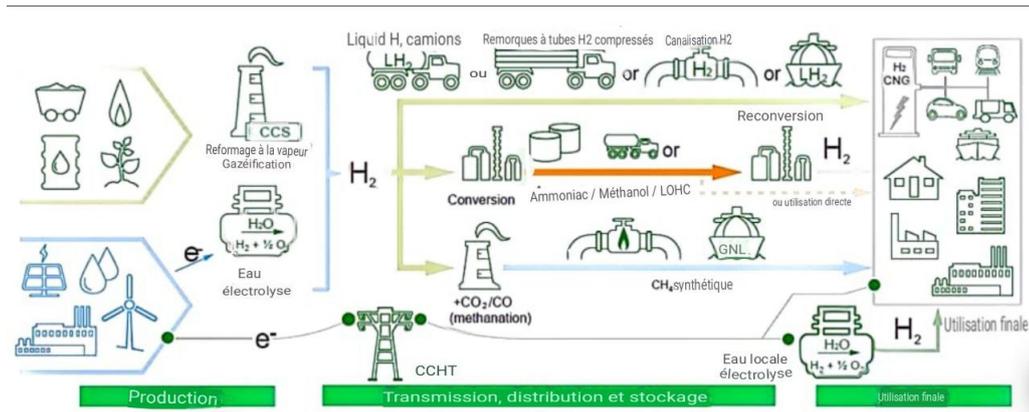


FIGURE 1.1 – Feuille de route de développement de l'hydrogène en Algérie [1]

La transition vers une énergie basée sur l'hydrogène est de plus en plus convoitée par les pouvoirs publics. Selon les déclarations officielles qui se résument à l'annonce d'une stratégie ambitieuse sur l'hydrogène et les différentes conclusions des études menées sur ce sujet[1], l'Algérie fait preuve d'une transformation énergétique qui la verra devenir le premier fournisseur vers l'Europe d'hydrogène renouvelable d'ici 2050. En matière de production et de distribution d'hydrogène vert, l'Algérie dispose de nombreux avantages, tels que les infrastructures d'énergie renouvelable existantes qui peuvent être développées et le gazoduc d'exportation de GN. En effet, pour atteindre ces objectifs, l'Algérie compte collaborer avec des sociétés énergétiques allemandes pour la production d'hydrogène vert. L'objectif est de produire 15 000 MW d'électricité à partir d'énergies renouvelables par an d'ici 2035, où dans la première phase devrait atteindre 1000 MW par an. Un projet de feuille de route pour la mise en place d'une industrie PtX (power to X) en Algérie (voir tableau 1.2) [6] :

TABLEAU 1.2 – Projet de feuille de route [6].

Horizon	étude rétrospective (back-casting)
Situation actuelle	0% H2 vert X% ER - reformage de méthane dominant -objectif de diversification
Horizon 2025	5% H2 vert 20% ER -Recherche et développement
Horizon 2030	30% H2 vert 50% ER -normes réglementaires
Horizon 2040	60% H2 vert 70-90% ER - mise à l'échelle de la technologie
Horizon 2050	80% H2 vert -perturbation technologique

Pour le déploiement accru de l'hydrogène vert, trois étapes de base avec des jalons généraux ont été définies. Ces étapes de base sont :

- Pendant la première phase (2022–2030), l'hydrogène vert sera peu utilisé, sauf dans les projets de démonstration ou pilote.
- Pendant la deuxième phase (2030-2040), la mise à l'échelle des technologies éprouvées sur le plan opérationnel et le développement de l'expérience qui en découle réduisent les coûts et contribuent à combler l'écart de rentabilité.
- Pendant la troisième phase (2040–2050), une suppression progressive de certains quotas, l'hydrogène vert et/ou ses dérivés seront largement utilisés et deviendront compétitifs.

## 4 L'hydrogène : de la production à l'utilisation

### 4.1 La production d'hydrogène :

La production d'hydrogène peut être classée en trois catégories importantes, largement utilisées dans l'industrie et dans les projets de recherche (voir figure 1.2) ; Ces catégories sont dénommées comme suit :

gris : production d'hydrogène à base des énergies fossiles avec une forte émission de gaz à effet de serre.

Bleu : gazéification du charbon et production d'hydrogène à base de gaz naturel intégrée au captage et au stockage du carbone.

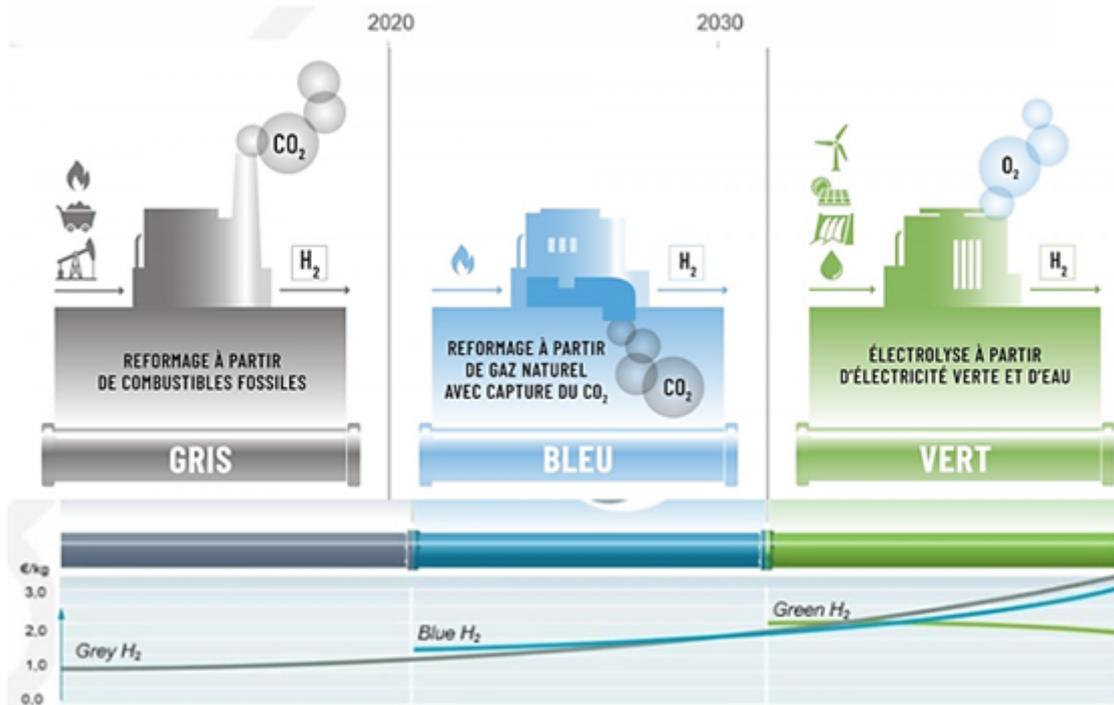


FIGURE 1.2 – Trois principales méthodes de production d'hydrogène

Vert : production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables.

Les deux premières catégories (gris et bleu) présentent une efficacité énergétique comprise entre 65 et 85 % comparée à la production hydrogène vert qui représente une efficacité énergétique de 55 à 75 % basée sur la capacité de l'électrolyseur.

Selon le graphe rattaché à la figure 1.2, les estimations du coût de production pour le H<sub>2</sub> bleu avec capture CO<sub>2</sub> est proche de celui du gris sans capture, ce qui implique qu'il devrait être le choix pour la durabilité ,comparer avec H<sub>2</sub> vert qui représente un coût majeur ,néanmoins, avec la récente réduction des coûts des sources d'énergie renouvelables pour la production d'électricité, il est prévu que le coût de production du H<sub>2</sub> vert sera moindre que les deux premiers d'ici 2030 .D'après la figure 1.2, la production d'hydrogène via électrolyse au niveau mondiale monte en puissance, la plupart des projets étaient inférieurs à 5 MW au début des années 2019, alors que les plus importants en 2020-2030 variant entre 125 et 1750 MW [9].

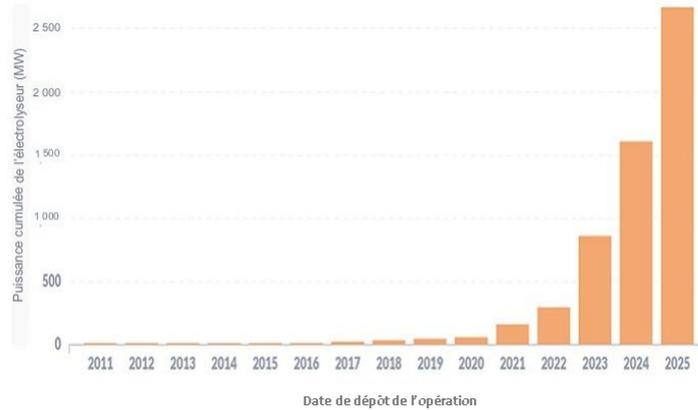


FIGURE 1.3 – Capacité européenne d'électrolyse 2014-2025 d'après Delta-EE [5]

Selon la figure 1.3, il est clair que la production d'hydrogène par électrolyseur offre de grandes perspectives de rentabilité et de compétitivité par rapport à la production d'hydrogène à partir d'énergies fossiles. Cette affirmation est étayée par la tendance à la baisse des coûts de production de l'hydrogène vert, due aux progrès technologiques dans le domaine des énergies renouvelables. En effet, les avancées constantes dans les technologies solaires, éoliennes et autres sources d'énergie renouvelable contribuent à réduire progressivement les coûts de production de l'hydrogène vert. Cette évolution favorable rend l'hydrogène vert de plus en plus attractif d'un point de vue économique, ouvrant ainsi la voie à une adoption plus large de cette solution énergétique propre et durable [5].

## 4.2 Stockage de l'hydrogène

Il existe plusieurs techniques de stockage d'hydrogène (voir figure 1.4) dont la plus classique est le stockage physique, qui consiste à le stocker sous forme de gaz comprimé dans des réservoirs [10]. Cependant, la faible densité de l'hydrogène à l'état gazeux (0.090 kg/m<sup>3</sup> à pression et température normales) demeure le principal inconvénient de cette approche :

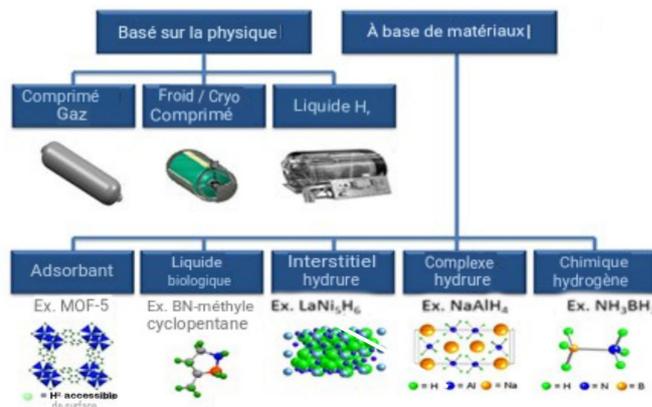


FIGURE 1.4 – Différentes méthodes de stockage d'hydrogène

L'hydrogène est un gaz qui est difficile à stocker, car il est tellement petit et léger qu'il se faufile partout et il nécessite d'importants moyens techniques pour le stocker à température basse et à très haute pression. Le prix de stockage et de transport de l'hydrogène est beaucoup plus élevé que celui du gaz de ville ou du diesel.

Le plus efficace est le stockage de l'hydrogène liquéfié caractérisé par une haute densité à basse température permettant un stockage compact et léger, bénéficiant ainsi d'options de livraison plus efficaces. D'autres possibilités de stockage de l'hydrogène sont également en étude (par exemple : sous forme d'hydrures métalliques sous forme solide).

### 4.3 Applications d'hydrogène et possibilités d'utilisation

Les applications de l'hydrogène sont nombreuses et variées :

- Dans le domaine de la chimie, l'hydrogène est valorisé pour ses propriétés chimiques. Dans les secteurs du raffinage d'hydrocarbures, de la production d'engrais, et autres usages de la chimie, on utilise l'hydrogène comme matière première. Aussi l'hydrogène mélangé au  $CO_2$  produit du méthane de synthèse, molécule identique au gaz naturel, qui peut être utilisé comme gaz.
- Dans le secteur du transport, l'hydrogène peut être utilisé comme combustible pour les voitures, les bus, les trains et les avions. Combiné avec des piles à combustible, il peut alimenter des véhicules électriques plus écologiques par rapport aux véhicules électriques à batterie actuellement utilisés.
- Dans le secteur de la production d'électricité, l'hydrogène peut être utilisé dans les turbines à gaz et les piles à combustible pour produire de l'électricité à rendement élevé et à faibles émissions.
- Dans le secteur du stockage de l'énergie, l'hydrogène peut être stocké et utilisé comme source d'énergie de secours ou pour équilibrer les sources d'énergie renouvelables intermittentes telles que l'énergie solaire et éolienne.
- Dans le secteur du chauffage thermique, l'hydrogène peut être injecté dans le réseau de gaz mélangé au méthane pour produire de la chaleur.

Les applications ci-dessus sont résumées dans la figure 1.5.

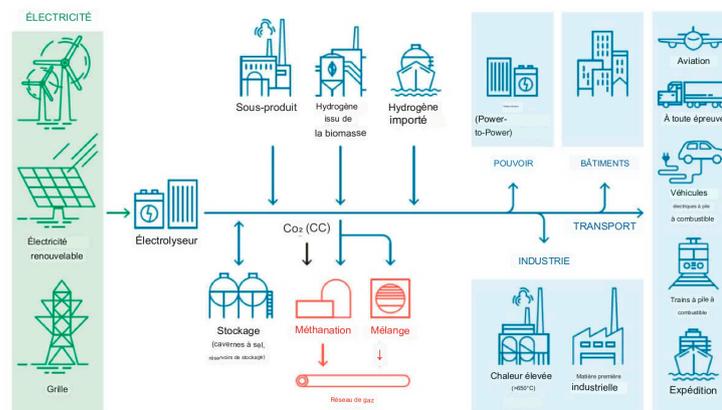


FIGURE 1.5 – Différentes sources d'hydrogène et applications potentielles de l'hydrogène [2]

## 5 Analyse globale sur les systèmes énergétiques hybrides solaire-hydrogène

Il existe trois méthodes différentes pour la production d'hydrogène solaire à partir de l'eau :

1. Le rayonnement solaire peut être utilisé directement pour produire de l'hydrogène par un processus de photocatalyse [11]. Dans ce processus illustré dans la figure 1.6, le matériel photo-catalyseur, tel que le dioxyde de titane ( $TiO_2$ ), exposé à la lumière entraîne la génération d'électrons et des trous qui peuvent réagir avec les molécules d'eau, produisant ainsi de l'hydrogène ( $H_2$ ) et de l'oxygène ( $O_2$ ).

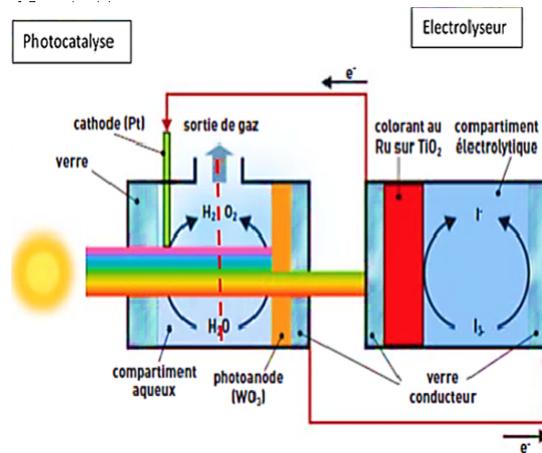


FIGURE 1.6 – Cellule photo électrochimique

L'utilisation de la photocatalyse pour la production d'hydrogène a un avantage d'une faible consommation d'énergie, mais représente une faible efficacité de conversion et une stabilité limitée, ce qui rend cette technologie économiquement non rentable.

2. le rayonnement solaire pourrait aussi être converti en chaleur, en utilisant un système solaire concentré. La chaleur solaire générée peut être utilisée pour piloter différents procédés de production d'hydrogène tels que l'électrolyseur conventionnel, l'électrolyseur à haute température ou les cycles thermochimiques. Pour le procédé d'électrolyse, l'énergie thermique se convertit en travail mécanique par un moteur thermique, puis converti en électricité par un générateur électrique. L'électricité générée est ensuite utilisée pour l'électrolyse de l'eau (voir figure 1.7).

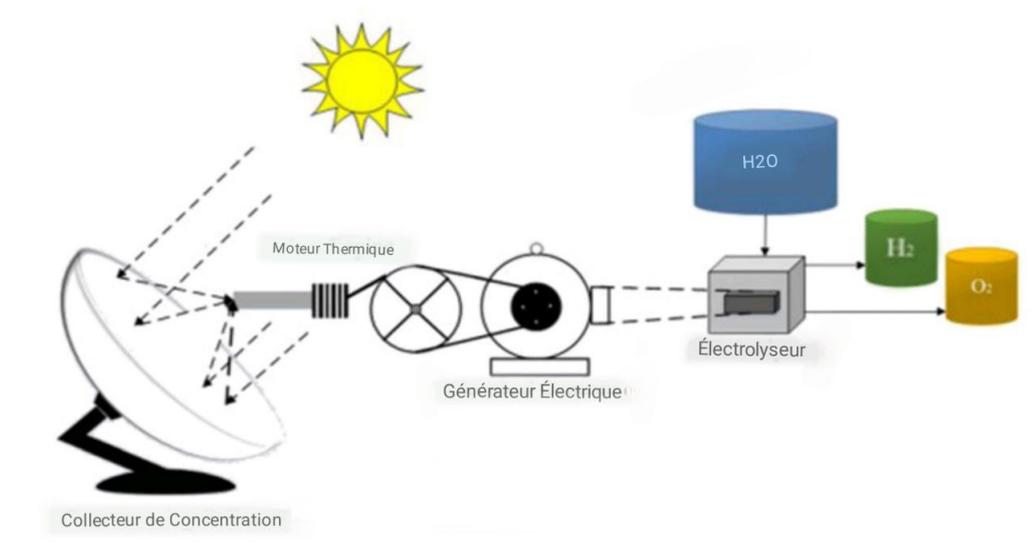


FIGURE 1.7 – Système de production d'hydrogène a base énergie thermique solaire

Ce processus comprend des éléments mobiles tels que le générateur et le moteur thermique, et par conséquent nécessite plus de maintenance et de contrôle par rapport aux autres systèmes solaire- hydrogène [12].

3. Le rayonnement solaire peut être également converti en électricité par effet photoélectrique puis transformée en hydrogène grâce au processus d'électrolyse. L'hydrogène peut alors être stocké dans des réservoirs pour une utilisation future. Ce système est le plus simple avec un délai d'exécution minimum[3]. Ce système est composé principalement de quatre sous-systèmes

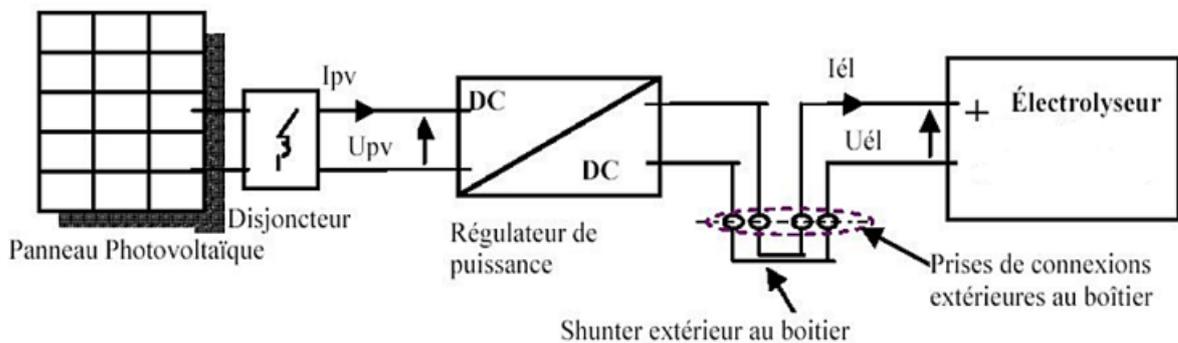


FIGURE 1.8 – Principe de l'alimentation de l'électrolyseur par photovoltaïque [3]

comme illustré dans la figure 1.8 :

- Les cellules photovoltaïques qui captent le rayonnement solaires et les convertissent en électricité assurant l'alimentation de l'électrolyseur pour la production d'hydrogène.
- Les composants d'électronique de puissance : convertisseurs DC/DC et appareils de contrôle/commande, permettent d'optimiser le rendement et la performance de chaque composant.

- Le circuit hydraulique assurant la gestion des fluides (gaz et liquides) assure à la fois la fourniture de l'eau à l'électrolyseur et acheminer l'hydrogène produit vers le réservoir de stockage.
- Le circuit de chauffage/refroidissement équipé d'un échangeur de chaleur qui permet de maintenir la température optimale de fonctionnement de chaque composant du système.

## 6 Défis et opportunités de l'hydrogène vert

### 6.1 Les défis :

L'adoption généralisée de l'hydrogène vert en tant que vecteur énergétique se heurte encore à certains défis techniques, économiques et réglementaires qui doivent être pris en considération. Les quatre principaux axes pour la production de l'hydrogène vert à des prix compétitifs se résument comme suit :

#### Besoin en électricité vert :

En tenant compte de ces potentialités et sa stratégie de développement dans le domaine de l'énergie renouvelable, l'Algérie accuse un besoin important en électricité verte. Le plus grand défi pour la production d'hydrogène vert, notamment à partir de ressources renouvelables, est de fournir de l'hydrogène à moindre coût. Selon une étude allemande du « groupe Aurora Energy Research » [8], la rentabilité maximale des projets d'hydrogène vert pourrait être atteinte lorsque les centrales solaires et éoliennes sont combinées avec des électrolyseurs. La raison pour laquelle cette combinaison est efficace est que l'Algérie possède un potentiel solaire important[8], ce qui signifie que les panneaux solaires installés dans les centrales solaires peuvent produire une grande quantité d'énergie solaire qui peut être utilisée pour alimenter les électrolyseurs et produire de l'hydrogène.

#### Besoin en eau :

La disponibilité de l'eau douce de qualité pour la production d'hydrogène vert étant limitée en Algérie qui subit déjà un stress hydrique, susceptible de s'aggraver à l'avenir suite au réchauffement climatique; il est donc primordial de trouver des sources alternatives d'eau pour la production d'hydrogène, ce qui exige l'utilisation d'eau de mer dessalée. Actuellement, pour subvenir aux besoins de la population en eau potable, le littoral algérien compte 21 stations de dessalement d'eau de mer réparties sur les 14 wilayas côtières, qui fournissent 17% de l'eau consommée dans le pays (voir figure1.9. Cependant, dans la pratique, pour l'électrolyse industrielle, il faut 1 litre d'eau et 5 kWh d'électricité pour fabriquer un "normal mètre cube" (Nm<sup>3</sup>) d' $H_2$  (soit 1000 litres d' $H_2$  sous forme de gaz ). La création d'autres usines de dessalement d'eau de mer s'avère donc nécessaire.

Méthode de dessalement	Coûts en capital (millions USS / MLDS)		Coûts d'exploitation et d'entretien (USS / m <sup>3</sup> )		Coût de production de l'eau (US m <sup>3</sup> )		
	Gamme	Moyenne	Gamme	Moyenne	Gamme	Moyenne	
FMS	1.7-3.1	2.1	0.22-0.30	0.26	1.02-1.74	1.44	
MED-TVC	1.2-2.3	1.4	0.11-0.25	0.14	1.12-1.50	1.39	
SWRO Mer Méditerranée	0.8-2.2	1.2	0.25-0.74	0.35	0.64-1.62	0.98	
SWRO Golfe Persique	1.2-1.8	1.5	0.36-1.01	0.64	0.96-1.92	1.35	
SWRO Mer Rouge	1.2-2.3	1.5	0.41-0.96	0.51	1.14-1.70	1.38	
SWRO Atlantique et Pacifique océans)	1.3-7.6	4.1	0.17-0.41	0.21	0.88-2.86	1.82	
Hybride	MSF/MED	1.5-2.2	1.8	0.14-0.25	0.23	0.95-1.37	1.15
	OREO	1.2-2.4	1.3	0.29-0.44	0.35	0.85-1.12	1.03

Remarque: MED-TVC = distillation multieffets avec compression thermique de vapeur; MLD = millions de litres par jour; MSF = distillation flash à plusieurs étages; O & M = fonctionnement et entretien; SWRO = osmose inverse d'eau de mer.

FIGURE 1.9 – Estimation du coût d'installation d'une usine de dessalement en fonction de la technologie utilisée [4].

A titre indicatif et en fonction de la technologie sélectionnée (selon figure 1.9), le coût d'une usine de dessalement ayant une capacité de  $1000 \text{ m}^3/\text{jour}$  s'élève à environ 12 millions de dollars pour une installation en bordure de la mer Méditerranée [4].

### Besoin en électrolyseur performant :

Les électrolyseurs sont des équipements clés pour la production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables. Cependant, la production d'hydrogène à grande échelle nécessite un besoin accru en électrolyseurs, ce qui constitue un défi majeur pour cette filière. De plus, leur efficacité énergétique doit être améliorée pour réduire leur consommation électrique et ainsi améliorer la rentabilité du système. Les électrolyseurs nécessitent des investissements importants en capital et ont des coûts d'exploitation élevés, ce qui peut avoir un impact significatif sur la rentabilité des projets de production d'hydrogène.

L'électrolyse alcaline est actuellement la méthode la plus utilisée à grande échelle pour la production industrielle d'hydrogène en raison de sa maturité technologique et de son coût plus abordable [7]. L'électrolyse à membrane d'échange de protons (PEM) est principalement utilisée pour la production d'hydrogène à petite échelle, surtout pour les véhicules à piles à combustible.

### Défi de stockage :

En raison de la faible masse moléculaire de l'hydrogène et sa densité volumétrique beaucoup plus faible que la plupart des combustibles fossiles pour la même phase ; à titre d'exemple : 1 litre d'essence équivaut à 4 litres d'hydrogène liquide ,ce qui impose l'utilisation d'une compression généralement très énergivore. A grand échelle le stockage d'hydrogène nécessite le développement des infrastructures spécifiques afin d'être considéré comme un substituant aux combustibles fossiles tout en prenant compte du coût du transport élevés créant ainsi des surcoûts de dimensionnement volumétrique à tout support stockant de l'hydrogène. Par ailleurs le stockage de l'hydrogène sera moindre lorsque des conteneurs de taille petite ou moyenne sont utilisés ; sachant que le risque lié à la manipulation de l'hydrogène est

TABLEAU 1.3 – Point d'éclair de certains combustibles courants [7]

Carburant	Point d'éclair (°C)
Hydrogène	-231
Méthane	-188
Propane	-104
De l'essence	-45
Méthanol	11
Ethanol(70%)	17
Kérosène	36
Carburacteur	60
Diesel	62
Biodiesel	130

égal ou inférieur à celui des autres carburants concurrents [13].

## 6.2 Opportunités

Lorsque l'on évalue les différentes options de carburant pour l'économie verte, telles que le biodiesel ou le gaz de synthèse, l'hydrogène présente un avantage important : Il peut être converti en différentes formes d'énergie utiles par l'intermédiaire des trois processus différents tels que le processus mécanique, le processus thermique et le processus électrique. Cependant, les combustibles fossiles ne peuvent être convertis en énergie utile que par le biais du processus de combustion. Cela souligne la polyvalence et la flexibilité de l'hydrogène comme source d'énergie, ce qui le rend plus attractif pour ses applications dans l'économie verte. De plus, l'hydrogène a l'avantage de pouvoir être utilisé dans les moteurs à combustion interne (Groupe électrogène) sans modification radicale des infrastructures existantes, et possède de bonnes propriétés de combustion. Selon le tableau 1.3 ci-dessous qui montre que l'hydrogène a un point d'éclair très bas (environ - 231°C), le plus bas de tous les carburants courants, ce qui lui permet d'occuper une place favorable dans la transition facile vers une économie verte .

En outre, l'hydrogène est considéré comme le carburant le plus sûr en termes de toxicité et de risques d'incendie [13]. Cependant la production d'hydrogène à base solaire présente des avantages significatifs puisque tous les processus solaires n'ont pas un impact écologique négatif important sur l'air et les sources d'eau. Effectivement, une étude récente [14], qui a déterminé les performances normalisées de différentes méthodes de production d'hydrogène (Biomasse ,Géothermique Hydraulique, Nucléaire ,Solaire et Éolien ), a constaté que le solaire offre la performance environnementale la plus élevée (une moyenne de 8/10).

En particulier, l'énergie solaire est une option prometteuse pour les communautés hors réseau,(off-grid) mais leur intermittence élevée et leur stockage complexe limitent leurs avantages[15]. De plus, l'excédent d'électricité générée par ce dernier est stockée dans des batteries conventionnelles qui ne présentent pas les meilleures options de stockage d'énergie à long terme en raison de leurs courte durée de vie et de leur faible capacité de stockage. Dans ce contexte, l'hydrogène peut jouer un rôle important en tant que solution de stockage d'énergie à long terme économique

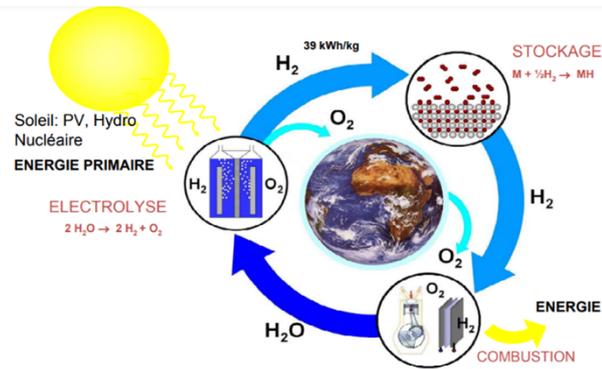


FIGURE 1.10 – Cycle de l'hydrogène.

et efficace [16, 17]. En effet en combinaison l'hydrogène avec des batteries, on peut réduire le coût de l'énergie jusqu'à 35% comparé à un système avec uniquement des batteries comme stockage d'énergie [18]. Cela évite le dysfonctionnement du système et permet de ne pas surdimensionner la batterie [19] et les technologies RES [20, 21]. Dans le cas extrême, les zones hors réseau dépendent principalement de l'utilisation de générateurs diesel, l'hydrogène représentera une solution alternative à la fois comme combustible et comme source d'énergie électrique offrant des avantages économiques et pratiques. En effet, cette double utilisation permet de simplifier le système hybride en évitant le transport du carburant, tout en bénéficiant de la possibilité de produire du carburant locale à partir de sources d'énergie renouvelables illimitées.

L'hydrogène peut représenter un cycle renouvelable qui est un modèle essentiel pour le développement durable, basé sur sa production, sa distribution, son utilisation et son réutilisation complète de l'hydrogène.

Comme illustré dans la figure 1.10, l'énergie solaire est utilisée pour l'électrolyse de l'eau et produit de l'hydrogène, qui est distribué via des réservoirs de stockage et des pipelines. L'hydrogène peut être utilisé dans divers domaines, y compris les piles à combustible pour les véhicules et les centrales électriques. L'eau produite lors de l'utilisation de l'hydrogène est récupérée et renvoyée à l'électrolyseur pour produire de l'hydrogène à nouveau, fermant ainsi la boucle du cycle et rendant le système renouvelable.

## 7 Vue d'ensemble de la production de l'hydrogène à partir de l'eau de mer

Comme expliquée ci-dessus dans la figure 1.11, le défi majeur pour la production d'hydrogène par électrolyse se résume au niveau de la pureté de l'eau requise pour l'électrolyse. Par conséquent, le traitement de l'eau de mer où le processus de dessalement doit être effectué génère des coûts supplémentaires qui deviennent des coûts énormes pour des applications à grande échelle. A cela s'ajoutent les risques d'endommagement des cellules d'électrolyse en raison des impuretés présentes dans l'eau de mer. Par exemple, les ions de chlorure présents dans l'eau de mer peuvent

s'oxyder et produire du chlore gazeux corrosif, ce qui représente un obstacle important à surmonter pour la construction de centrales de production d'hydrogène à partir d'eau impure, telle que l'eau de mer.

La figure 1.11 illustre les différentes voies possibles de l'électrolyse directe et indirecte de l'eau de mer :

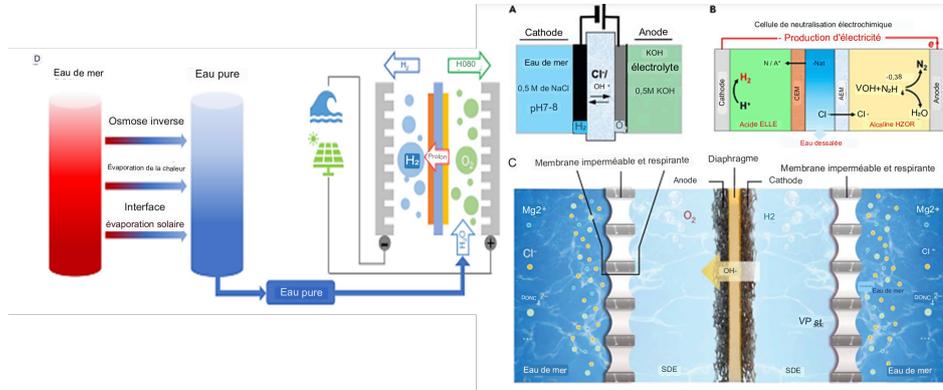


FIGURE 1.11 – Différentes options pour l'électrolyse direct et indirect de l'eau de mer

**A** : Un électrolyseur d'eau asymétrique par une séparation stable de l'eau de mer [3].

**B** : Une cellule de neutralisation électrochimique pour la production d'hydrogène et le dessalement de l'eau avec production d'électricité [22].

**C** : Un système d'électrolyse d'eau de mer exploité par un mécanisme de migration basé sur la transition de phase liquide-gaz-liquide, qui montre le processus de purification et de migration de l'eau et la force motrice [23].

**D** : Plusieurs voies possibles pour la séparation indirecte de l'eau de mer moins coûteuse en intégrant la distillation membranaire en cascade à l'électrolyse de l'eau [24].

L'électrolyse de l'eau de mer est aux premiers stades de développement par rapport à l'électrolyse de l'eau pure en raison d'inconvénients tels que la corrosion des électrodes, la réaction de dégagement d'oxygène (OER) sélective, etc.

## 8 Conclusion

A la lumière de la présente analyse, les conclusions suivantes peuvent être tirées : L'hydrogène apparaît comme un vecteur d'énergie propre, compétitif et prometteur pour répondre aux besoins énergétiques durable de tout développements industriels et économiques en faisant face à tous les défis environnementaux et énergétiques actuels.

L'Algérie est appelée, plus que jamais, à accélérer sa transition énergétique en considérant l'hydrogène vert comme composant essentiel et ce à la fois pour assurer sa sécurité énergétique et pour occuper une place de choix dans le marché international de l'hydrogène vert profitant, ainsi, des avantages qui sont en sa possession. Les systèmes énergétiques hybrides solaire-hydrogène offrent également des opportunités intéressantes pour une production décentralisée d'hydrogène.

Pour lancer la filière hydrogène vert, il est primordial de mettre en place une stratégie et un plan d'action en tenant compte de tous les aspects liés à la maîtrise de toute la chaîne de valeur ; notamment le besoin en eau et de se diriger vers une source alternative d'eau.



# Chapitre 2

## Dimensionnement et réalisation

### 1 Introduction

Dans notre travail, nous avons réalisé un prototype de générateur d'hydrogène à partir de panneaux solaires. Nous avons utilisé une batterie pour stocker l'énergie solaire et l'utiliser ultérieurement afin d'alimenter le générateur, même pendant les périodes nocturnes. Pour optimiser l'efficacité énergétique, nous avons intégré un système de gestion d'énergie photovoltaïque (PV). L'objectif principal de ce prototype à petite échelle était de vérifier la faisabilité de produire de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire. Le prototype se compose de trois parties principales : une partie mécanique comprenant le générateur d'hydrogène, une partie électronique comprenant le circuit MPPT (Maximum Power Point Tracking), et une partie de commande implémentée à l'aide d'un programme Arduino. Cette approche intégrée nous permet d'explorer les aspects techniques et opérationnels de la production d'hydrogène solaire tout en offrant une flexibilité pour l'optimisation future du système.

### 2 Présentation d'un système

Le principe du système est illustré dans les figures (2.1) et (2.2). Le système utilisé est constitué d'un générateur PV (panneau solaire) et un électrolyseur d'eau de type alcalin. Le système PV-électrolyseur est une configuration qui utilise l'énergie solaire photovoltaïque pour alimenter un électrolyseur afin de produire de l'hydrogène. Cette approche offre une solution durable et respectueuse de l'environnement pour la production d'hydrogène, une source d'énergie propre et polyvalente. Il existe deux façons de connecter le générateur PV à l'électrolyseur, chacune avec ses avantages et inconvénients :

- La connexion directe entre les panneaux photovoltaïques et l'électrolyseur (figure 2.1) présente des avantages en termes de fiabilité et de réduction des risques de défaillance par rapport à une connexion indirecte impliquant plus de composants. Cette approche peut également offrir une meilleure efficacité, à condition que les courbes I-V des panneaux photovoltaïques soient correctement adaptées à celles de l'électrolyseur ; mais cela est vraie uniquement dans certaines conditions d'irradiation. Cependant, il y a des inconvénients à prendre en compte. Par exemple, avec cette configuration, il est difficile

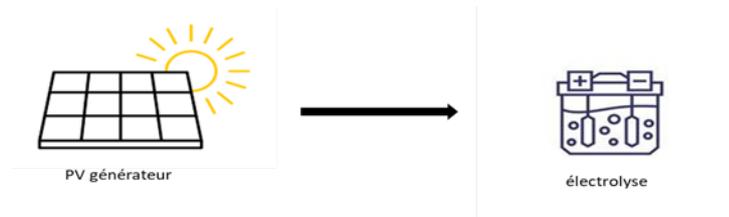


FIGURE 2.1 – Connexion directe de PV et électrolyseur

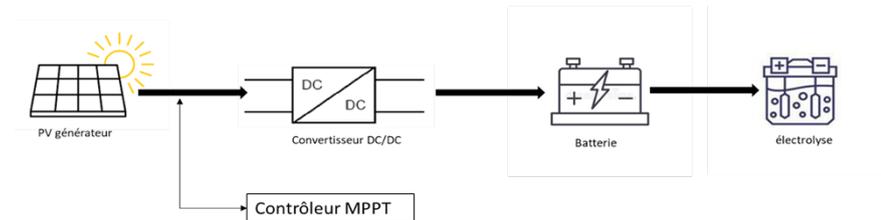


FIGURE 2.2 – Connexion indirecte de PV et électrolyseur

de contrôler le transfert de puissance entre les panneaux photovoltaïques et l'électrolyseur. De plus, l'efficacité sera réduite car la puissance maximale des panneaux photovoltaïques dépend des conditions météorologiques et de la température des cellules [25].

- Dans le système de connexion indirecte (voir figure 2.2) avec stockage intermédiaire, l'électricité produite par les panneaux photovoltaïques est d'abord convertie en courant continu (DC) à l'aide d'un convertisseur DC-DC. Ce convertisseur permet d'adapter la tension et le courant de sortie des panneaux photovoltaïques pour les rendre compatibles avec la batterie. est convertie et stockée dans une batterie, ensuite utilisée pour alimenter l'électrolyseur au moment opportun. Cette approche offre une flexibilité dans la gestion de l'énergie solaire, en permettant l'utilisation de l'électricité générée pendant les périodes ensoleillées pour alimenter l'électrolyseur même lorsque le soleil ne brille pas. Ainsi, l'énergie solaire peut être utilisée de manière plus efficace et continue, même en l'absence de rayonnement solaire direct [25].

Nous avons choisi d'adopter le système de raccordement indirect pour notre projet. Pour cela, nous utilisons les composants suivants :

1. Générateur PV : Le générateur photovoltaïque représente la partie de production d'énergie électrique.
2. Contrôleur de charge solaire : Son rôle principal est de réguler le flux de courant électrique provenant des panneaux solaires vers une batterie ou un groupe de batteries. Aussi, il a pour fonction de garantir que la batterie n'est ni surchargée ni sous-chargée.
3. Convertisseur Buck DC/DC : Le convertisseur Buck permet d'adapter la tension de la batterie (qui peut varier en fonction de son niveau de charge) à la tension requise par l'électrolyseur. Il abaisse la tension de la batterie afin de garantir un fonctionnement optimal et une efficacité maximale de l'électrolyseur. Cela permet d'optimiser la conversion de l'énergie solaire en hydrogène, en assurant un transfert de puissance efficace et en évitant les surcharges et les sous-charges potentiellement dommageables. Le fonctionnement d'un

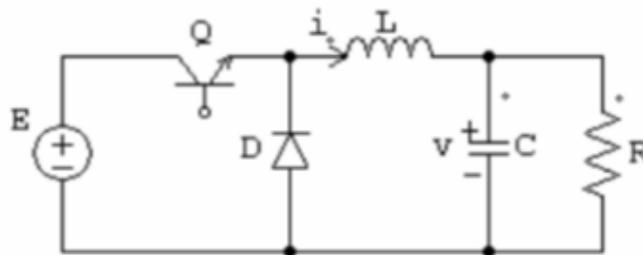


FIGURE 2.3 – Schéma de base d'un convertisseur Buck

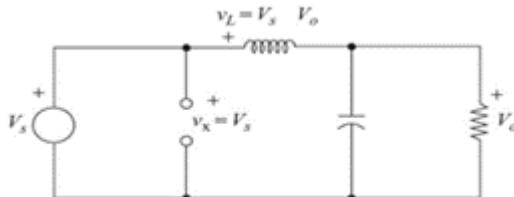


FIGURE 2.4 – Circuit équivalent pour période de mise sous tension

convertisseur Buck peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur Q (voir figure 2.3) :

- Dans l'état passant, l'interrupteur Q (voir figure 2.4) est fermé. Le courant fourni par le générateur, initialement nul, augmente linéairement et traverse l'inductance, laquelle s'oppose à cette augmentation du courant, produisant une tension opposée, en stockant l'énergie reçue sous forme magnétique. La diode étant polarisée en inverse avec la tension du générateur, ne laisse aucun courant la traverser.
- L'interrupteur est ouvert voir circuit en figure 2.5 . Plus aucun courant ne traverse l'inductance. La diode devient passante afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance. Le courant traversant l'inductance décroît. L'inductance s'oppose à cette réduction du courant, produisant une tension qui la met en situation de source pour le circuit aval, en utilisant l'énergie magnétique stockée à la phase précédente.

Le rapport cyclique des états activé et désactivé est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$D = V_0/V_s \quad (2.1)$$

où,  $D$  : rapport cyclique

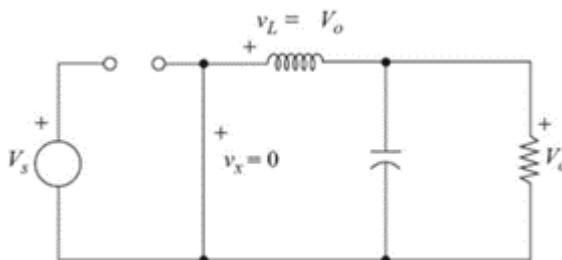


FIGURE 2.5 – Circuit équivalent pour la période d'arrêt

$V_0$  : tension d'entrée solaire  
 $V_s$  : Tension de sortie vers la charge

4. Batterie : La batterie joue un rôle essentiel dans ce système. Voici quelques-uns des rôles importants de la batterie dans ce système :
- Stockage de l'énergie solaire.
  - Stabilisation de la tension et du courant.
  - Gestion de la demande d'énergie et facilite l'intégration avec l'électrolyseur.
  - Optimisation de la performance et de la fiabilité globale du système.
- Son utilisation efficace contribue à optimiser la performance et la fiabilité du système.

5. L'électrolyseur : Il sert à la séparation électrochimique de l'eau en hydrogène et en oxygène à l'aide d'un courant continu cyclé entre deux électrodes. Il permet la production de l'hydrogène en utilisant l'énergie solaire excédentaire. Il existe deux types de générateur d'hydrogène :
- un générateur submergé où les plaques sont à l'intérieur de l'eau
  - un générateur non submergé où l'eau circule entre les plaques en toute étanchéité.

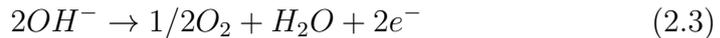
Un électrolyseur a les caractéristiques suivantes :

- la réaction d'électrolyse de l'eau : cette réaction se produit à la surface de l'électrode émergée dans un électrolyte de l'eau alcaline, L'hydrogène est produit à la cathode, tandis que l'oxygène est produit à l'anode. Les réactions dans les deux électrodes sont décrites par (2.2) (2.3) :

Cathode :



Anode :



avec les potentiels d'équilibre :

$$E_0 (\text{Cathode}) = -0,83 \text{ V}, E_0 (\text{Anode}) = 0,40 \text{ V}$$

- Tension réversible : est la tension minimale qui doit être fournie pour déclencher une réaction électrochimique. La contrainte réversible peut être déterminée par l'équation (2.4), énergie libre de Gibb ( $\Delta G$ ).

$$\Delta G = nFV_{\text{rev}} \quad (2.4)$$

donc

$$V_{\text{rev}} = \frac{\Delta G}{nF} \quad (2.5)$$

- Tension minimale : Tension de cellule requise pour l'électrolyse de l'eau est liée à l'enthalpie de la réaction et est appelée tension d'enthalpie ou tension de cellule thermo-neutre ( $V_{\text{enth}}$ ), comme (2.6), [26] :

$$V_{\text{enth}} = \frac{\Delta H}{nF} \quad (2.6)$$

Où :

$H$  est le changement standard dans l'enthalpie ( $\Delta H = 286 \text{ kJ/mol}$ ) et  $S$  l'entropie du processus d'électrolyse à une température ( $T$ ) où les conditions standard ( $T = 298 \text{ Kelvin}$  et  $1 \text{ atm}$ ) Gibbs énergie libre ( $\Delta G = 237,2 \text{ kJ/mol}$ ) pour la séparation de l'eau [27].

la valeur de la constante de Faraday ( $F = 96485 \text{ C/mol}$ ) et le nombre d'électrons ( $n = 2$ ), d'où :

$$V_{\text{rev}} = \Delta G/nF = 237,2/(2 * 96485) = 1.229 \text{ v} \quad (2.7)$$

et

$$V_{\text{enth}} = 286/(2 * 96485) = 1.482 \text{ V} \quad (2.8)$$

La tension réversible et la tension d'enthalpie n'est suffisante pour déclencher une réaction chimique, un potentiel supplémentaire est fourni qui est connu comme la tension d'activation ( $V_{\text{act}}$ ).

- Tension d'activation : Elle est fonction du coefficient d'électrode et de la température. La tension d'activation pour une température donnée peut être calculée en utilisant (2.9) à une température constante de 273o K.

$$V_{\text{act}} = A + B \cdot \log(I) \quad (2.9)$$

où  $I$  est le courant et  $A$  et  $B$  sont les constantes anodique et cathodique, où les valeurs constantes de la littérature révèlent que l'acier inoxydable 316 présente une densité de courant de  $10 \text{ mA.cm}^2$  avec une tension = 370 mV (0.37 V) dans une solution de  $1,0 \text{ mol/L}$  de  $KOH$  [28].

Pour un courant désiré égal à  $I = 20 \text{ A}$ , la tension d'activation est obtenue en utilisant équation (2.9) comme suit :

$$V_{\text{act}} = 0.37 + 0.37.\log(20) = 0.8513 \text{ V} \quad (2.10)$$

- La tension ohmique : elle représente les pertes de tension qui se produit en raison de la résistance de l'électrolyte, des électrodes et des fils électriques, etc. Collectivement représenté comme des tensions ohmiques ( $V_{\text{ohm}}$ ), la tension ohmique totale peut être calculée en utilisant (2.11) :

$$V_{\text{ohm}} = \frac{r}{A} \quad (2.11)$$

Enfin, on peut calculer La tension de la cellule ou le potentiel de surtension de la cellule qui est la quantité totale de potentiel appliquée à l'électrolyseur et il s'agit de la somme des tensions enthalpique, d'activation et ohmique. La tension de la cellule peut être calculée par (2.12) :

$$V_{\text{cell}} = V_{\text{enth}} + V_{\text{act}} + V_{\text{ohm}} \quad (2.12)$$

Dans la conception, la molarité de la solution est négligée, l'électrode est conçue avec une surface de  $A = 1,2 \text{ m}^2$ , et la valeur de résistance

( $r = 0,21\Omega/m^2$ ) à une distance de l'électrode de  $0,006\text{ m}$ . En utilisant (2.11) la valeur de tension ohmique est obtenue comme :

$$V_{\text{ohm}} = \frac{r}{A} \quad (2.13)$$

$$V_{\text{cell}} = V_{\text{enth}} + V_{\text{act}} + V_{\text{ohm}} \quad (2.14)$$

$$V_{\text{cell}} = 1.482 + 0.8513 + 3.5 \quad (2.15)$$

$$V_{\text{cell}} = 5.8333\text{ V} \quad (2.16)$$

— L'efficacité de la production d'hydrogène : pendant le processus d'électrolyse peut être calculée à l'aide des équations suivantes :  $V_M$  : le volume molaire du gaz parfait (litres/mol) exprimé par :

$$V_M = n \cdot R \cdot F / P \quad (2.17)$$

$V_M = (1 \cdot 0.082\text{ L atm molK} \cdot 273\text{ Kelvin}) / (1\text{ atm}) = 22.4\text{ L/mol}$ . En utilisant la loi de Faraday de l'électrolyse, le volume idéal de  $H_2$  ( $V_{H_2\text{idéal}}$ ) est calculé comme suit :

$$V_{H_2\text{idéal}} = \frac{I \cdot V_m \cdot t}{n \cdot F} \quad (2.18)$$

Où :  $I$  est le courant (en Ampère) passant à travers la cellule pendant la période  $t$  (en secondes)

$$V_{H_2O} = 20\text{ A} \cdot 22.4\text{ Liter/mol} \cdot 3600\text{ S} \cdot \frac{1}{96485\text{ C/mol}}$$

$$V_{H_2O} = 16.7155516\text{ Liter}$$

et  $Eff(\%)$  (en pourcentage) est le rapport entre le volume de gaz mesuré ( $V_{H_2\text{réel}}$ ) et le volume idéal de  $H_2$  ( $V_{H_2\text{idéal}}$ ) :

$$Eff(\%) = \left( \frac{V_{H_2\text{réel}}}{V_{H_2\text{idéal}}} \right) \cdot 100\% \quad (2.19)$$

avec

$$V_{H_2\text{réel}} = V_{H_2}(\text{mesuré}) \cdot (T_{\text{standard}}) / (T_{\text{mesurée}}) \quad (2.20)$$

Où :  $V_{H_2}(\text{mesuré})$  est le volume obtenu par déplacement d'eau alcaline (l),  $T_{\text{standard}}$  est la température standard (273 Kelvin) et  $T_{\text{mesurée}}$  est la température ambiante (en Kelvin)

Ainsi, à partir de ces équations un tableau d'estimations de la quantité théorique de gaz  $H_2$  peut être établi en fonction du fort courant électrique circulant dans la cellule, indiqué dans le tableau 2.1.

TABLEAU 2.1 – Calcul de volume théorique de gaz  $H_2$

V cellule (V)	I cellule (A)	Puissance (W)	H théorique volume (L)	Watt/Litre H2
5.8	20	116,7	16.7	7.0
5.7	19	107,5	15.9	6.8
5.5	18	98,7	15,0	6.6
5.3	17	90.2	14.2	6.4
5.1	16	82.1	13.4	6.1
5.0	15	74,4	12.5	5.9
4.8	14	67,0	11.7	5.7
4.6	13	59,9	10.9	5.5
4.4	12	53.2	10.0	5.3
4.3	11	46,8	9.2	5.1
4.1	10	40,8	8.4	4.9
3.9	9	35.2	7.5	4.7
3.7	8	29,9	6.7	4.5
3.6	7	24,9	5.9	4.3
3.4	6	20.3	5.0	4.0
3.2	5	16.0	4.2	3.8
3.0	4	12.1	3.3	3.6
2.9	3	8.6	2.5	3.4
2.7	2	5.4	1.7	3.2
2.5	1	2.5	0,8	3.0
2.3	0	0.0	0.0	-

Selon le tableau 2.1, on constate que la variation de la tension et du courant dans le tableau montre que des niveaux plus élevés de tension et de courant favorisent une production d'hydrogène plus importante, mais cela entraîne une augmentation de la puissance nécessaire et une réduction de l'efficacité globale.

### 3 Conception et dimensionnement du prototype :

Dans cette partie, nous allons dimensionner les différentes parties du système.

#### 3.1 Dimensionnement et conception du générateur d'hydrogène

Le schéma illustré dans la figure 2.6 de notre générateur d'hydrogène non submergé (dry genertor ) comprend les éléments suivants : deux électrodes, une anode et une cathode, ainsi que quatre plaques neutres, des joints d'étanchéité et des plaques d'extrémités.

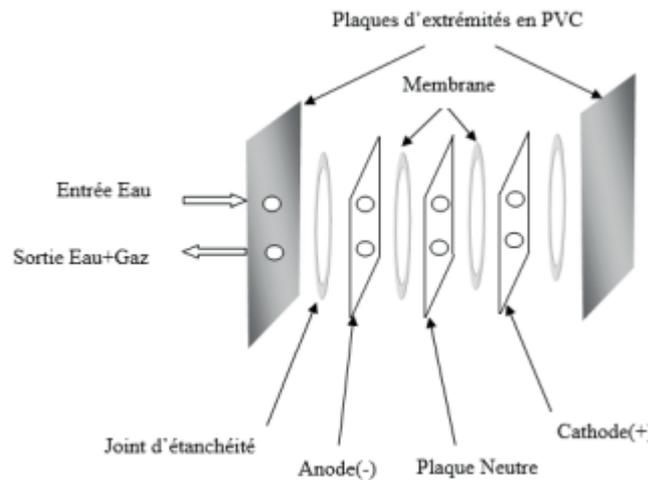


FIGURE 2.6 – Schéma synoptique d'un générateur d'Hydrogène

##### 1. électrodes :

Les électrodes sont des composants essentiels dans l'électrolyse. Elles sont responsables de l'introduction du courant électrique dans le système et des réactions électrochimiques qui se produisent à l'intérieur de la cellule électrolytique. Les électrodes sont des plaques en acier inoxydable avec dimension de largeur de 7.5cm et longueur de 9.5cm.

##### 2. plaques neutres :

Nous utilisons également quatre plaques neutres avec les mêmes dimensions que les électrodes. L'ajout de ces plaques neutres présente plusieurs avantages. Tout d'abord, il augmente la surface de production des gaz, ce qui favorise une production plus efficace d'hydrogène. De plus, cela permet de réduire la tension entre les plaques du générateur, ce qui aide à prévenir la surchauffe de l'eau et la formation de vapeur d'eau indésirable.

##### 3. choix de matériaux :

L'acier inoxydable est largement reconnu pour sa résistance à la corrosion, ce qui est particulièrement important dans un environnement électrolytique où des réactions chimiques se produisent. Cela assure la durabilité et la performance optimale des électrodes et des plaques neutres sur une longue période. En outre, l'acier inoxydable offre une bonne conductivité électrique, ce qui est essentiel pour un transfert

efficace du courant électrique lors du processus d'électrolyse. Cela favorise une conversion efficace de l'eau en hydrogène et en oxygène.

#### 4. Joint d'étanchéité :

Les joints en caoutchouc assurant l'étanchéité entre les plaques. Ils créent des chambres fermées individuelles en agissant comme une barrière entre chaque plaque. Les joints en caoutchouc sont spécifiquement conçus pour garantir une isolation adéquate entre les plaques, empêchant ainsi toute fuite d'eau ou de gaz. Cela contribue à assurer l'efficacité et la sécurité du processus d'électrolyse dans notre générateur d'hydrogène.

Ces joints en caoutchouc sont dimensionnés pour correspondre aux dimensions des plaques du générateur. Leur taille extérieure, avec une largeur de 7,5 cm et une longueur de 9,5 cm, permet de créer des chambres fermées de taille appropriée. De même, leur taille intérieure correspondante garantit un ajustement précis entre les plaques, assurant ainsi l'étanchéité.

#### 5. Joints d'extrémité

En utilisant des joints d'extrémité en plexiglas, nous assurons la protection et l'intégrité du générateur d'hydrogène, tout en permettant une observation directe de son fonctionnement. Cela contribue à la fiabilité et à la sécurité du système global de génération d'hydrogène (voir figure 2.7).

#### 6. Alimentation de générateur d'hydrogène :

L'alimentation du générateur d'hydrogène nécessite à la fois une alimentation électrique et une alimentation en eau.

- Alimentation en eau : Lorsqu'il s'agit d'alimenter le générateur d'hydrogène en eau, plusieurs sources d'eau peuvent être utilisées, notamment l'eau usée et d'autres sources d'eau.

- Alimentation électrique : Lors des tests effectués sur le générateur d'hydrogène, il a été observé que la tension maximale générée était d'environ 12 à 13 volts (V), avec un courant 3A.

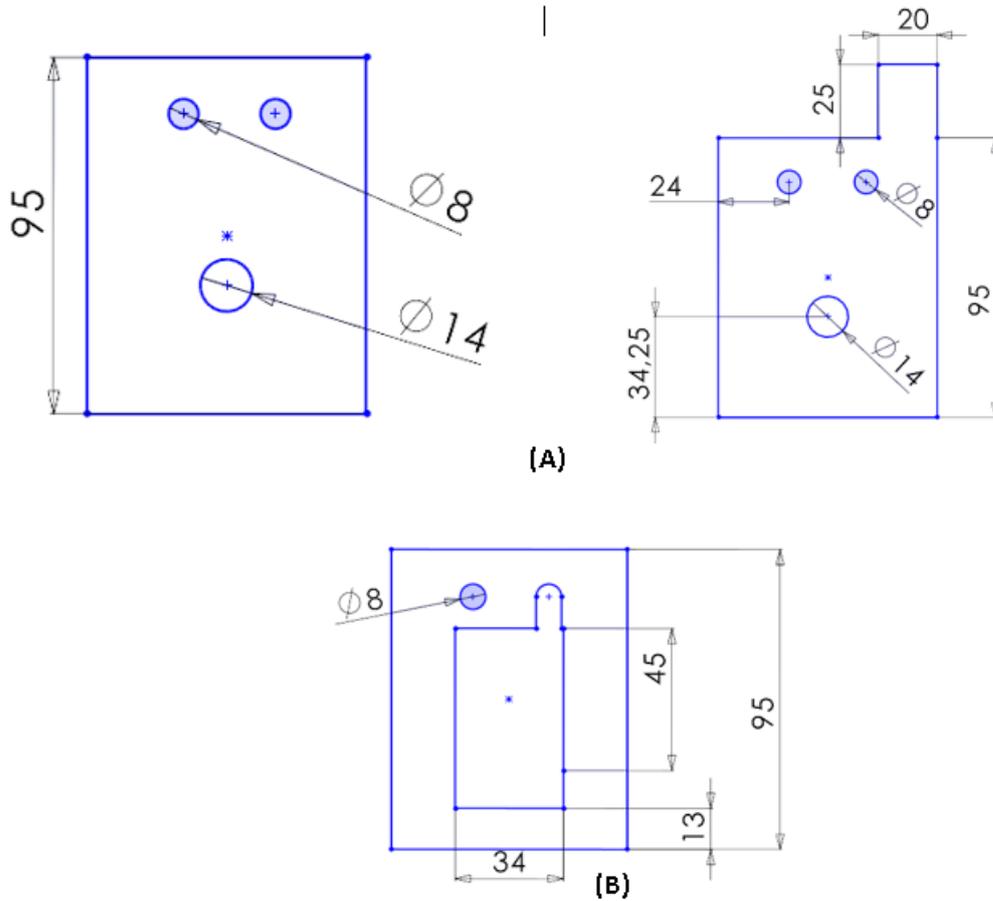


FIGURE 2.7 – Le dimensionnement des plaques en acier inoxydable, les électrodes cathode, anode (A), et le joint d’étanchéité(B)

### 3.2 Dimensionnement du système PV :

-D’après les résultats obtenus lors des tests, la tension maximale de l’électrolyseur est d’environ 12 volts (V) avec un courant de 3 ampères (A). Nous avons choisi le panneau solaire disponible avec les caractéristiques suivantes (voir tableau 3.2) :

Pour atteindre les valeurs nécessaires pour alimenté l’électrolyseur nous avons placé trois (03) panneaux en série, en parallèle avec d’autres 3 panneaux en série (voir figure 2.8).

-Pour charger une batterie de 12V et 7Ah avec des panneaux solaires de 12V et 278mA (0,278A) :

La surface d’une cellule est égale à  $S = 0.170 \text{ m} \times 0.220 \text{ m} = 0.0374 \text{ m}^2$ .

Pour un éclairage standard  $E = 1000 \text{ W/m}^2$ , on aura une puissance d’entrée pour une cellule égale à

$$P_e = 1000 \text{ W/m}^2 \times 0.0374 \text{ m}^2 = 37.4 \text{ W}$$

Or, selon le datasheet de la cellule, la puissance crête est égale à  $P_c = 5 \text{ W}$ , ce qui donne un rendement de la cellule  $\eta = \frac{5 \text{ W}}{37.4 \text{ W}} = 0.13$  (13%).

Type	CNC170X220-18
Dimensions	170 x 220 x 3 mm
$V_{co}$	22V
$I_{cc}$	
Tension de sortie	0-18V
Courant nominal	278 mA
Puissance	5W

TABLEAU 2.2 – Caractéristiques des panneaux choisis

Nous prenons un éclairage moyen pendant une journée moyennement ensoleillée (de 8 heures) égal à  $E = 600 \text{ W/m}^2$ . Cela donne la puissance électrique moyenne produite par une cellule égale à

$$P_m = 600 \text{ W/m}^2 \times 0.0374 \text{ m}^2 \times 0.13 = 2.92 \text{ W}$$

Cette même cellule produira donc une énergie électrique par jour égale à

$$P_j = P_m \times 8 = 2.92 \text{ W} \times 8 = 10.50 \text{ Wh}$$

Prenons une tension moyenne de fonctionnement pendant une journée d'une cellule égale à 18 V (la valeur moyenne n'est pas très loin de 22 V du  $V_{co}$ ). Le courant moyen de la cellule est égal à

$$I_m = \frac{2.92 \text{ W}}{18 \text{ V}} = 0.162 \text{ A} = 162 \text{ mA}$$

La tension de chaque branche est  $V_b = 18 \text{ V} \times 3 = 54 \text{ V}$ . Pour le courant totale nous aurons donc un courant total de 324 mA avec une puissance moyenne totale (pour l'ensemble des 6 cellules) égale à  $P_t = 54 \text{ V} \times 0.324 \text{ A} = 17.5 \text{ W}$ .

Pour une batterie de 12 V et une capacité de 7 Ah, l'énergie contenue dans celle-ci (à 100 % de sa capacité) est égale à  $C = 12 \text{ V} \times 7 \text{ Ah} = 84 \text{ Wh}$ . Cependant, nous devons prendre en compte une profondeur de décharge de 20 %, ce qui signifie que seulement 80 % la capacité de la batterie est utilisée par l'électrolyseur :  $C_{ef} = C \times 0.8 = 84 \text{ Wh} \times 0.8 = 67.2 \text{ Wh}$ . C'est cette énergie que les cellules solaires doivent fournir à la batterie pour la charger complètement.

L'ensemble des six cellules peut fournir une énergie moyenne pendant 8 heures égale à  $E_m = P_t \times 8 = 17.5 \text{ W} \times 8 = 140 \text{ Wh}$ .

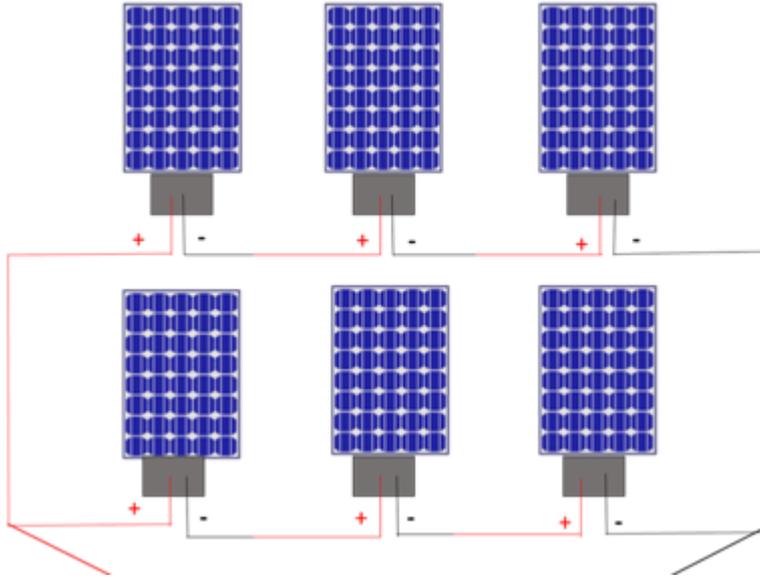


FIGURE 2.8 – Schéma de raccordement des panneaux solaire

Si, au lever du soleil, la batterie était à 20% de sa capacité, celle-ci prendra un temps égal à

$$t = \frac{67.2}{17.5} = 3.84 \text{ h}$$

Pour se charger complètement, mais on sait qu'une batterie a un rendement de charge, pris généralement au voisinage de  $\eta_{cha} = 0.8$  (pour la technologie Plomb-acide). Le temps réel nécessaire pour la charge de la batterie est donc égal à

$$t_r = \frac{t}{0.8} = 4.8 \text{ h}$$

Pendant les 3.2 heures restantes de la journée, l'électrolyseur peut fonctionner avec la puissance moyenne 17.5 W fournie par les cellules solaires. Pendant la nuit, la batterie étant complètement chargée, l'électrolyseur peut aussi fonctionner en tirant son énergie de la batterie jusqu'à 20% de sa capacité.

### 3.3 Caractéristiques de la batterie choisie

Nous avons choisi d'utiliser une batterie au plomb-acide, avec les caractéristiques illustrées dans le tableau 2.3, pour alimenter notre générateur d'hydrogène. Cette décision a été motivée par plusieurs avantages clés associés à cette technologie, notamment sa disponibilité, sa fiabilité, son coût abordable et sa simplicité d'entretien. Nous sommes convaincus que l'utilisation de cette batterie répondra de manière optimale à nos besoins énergétiques et nous permettra d'atteindre nos objectifs de production d'hydrogène de manière efficace et économique.

Paramètre	Valeur
Type	NP17-12I
Tension nominale (V)	12
Capacité	7 Ah
Durée de vie	3 à 5 ans

TABLEAU 2.3 – Caractéristiques de la batterie choisie

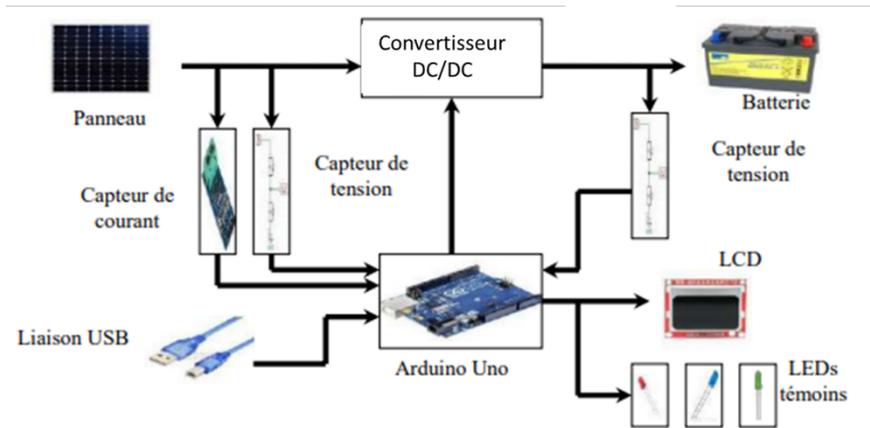


FIGURE 2.9 – Schéma fonctionnel du chargeur de batterie

### 3.4 Contrôleur de charge (MPPT)

Le circuit MPPT (Maximum Power Point Tracker) est basé sur un circuit convertisseur abaisseur synchrone. Il abaisse la tension supérieure du panneau solaire jusqu'à la tension de charge de la batterie.

#### Calcul et choix des composants du convertisseur Buck

En général, un convertisseur Buck comprend deux parties principales : la partie de puissance, qui utilise un MOSFET, et la partie de commande, qui régule le flux unidirectionnel de puissance de l'entrée vers la sortie. Les inductances et les capacités sont utilisées pour filtrer le courant et réduire le taux d'ondulation de la tension à l'entrée et à la sortie du convertisseur.

(a) Choix de la fréquence du signal de commande :

Le choix de la fréquence du signal de commande est un élément important dans la conception d'un convertisseur Buck. Cette fréquence est déterminée en fonction des exigences d'efficacité et de rendement, car des fréquences de commutation plus élevées permettent de réduire les pertes de commutation. En outre, une fréquence de commutation plus élevée permet d'utiliser des composants réactifs de plus petite taille telles que les capacités et les inductances, ce qui réduit le retard de la sortie par rapport à l'entrée dû au temps de commutation. Pour notre application, nous avons choisi une fréquence de découpage de 50 KHz.

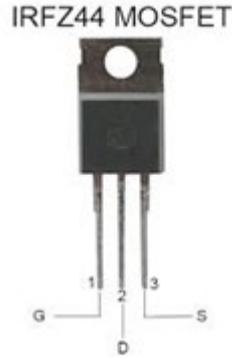


FIGURE 2.10 – MOSFET (IRFZ44N)

Pour atteindre cette fréquence, nous avons utilisé une inductance de  $L = 33 \mu H$  et un condensateur de capacité égale à  $C = 220 \mu F$

(b) Choix de MOSFET :

Le MOSFET présente une commutation ohmique faible et rapide. Les principaux critères du MOSFET sont :

- Courant de commutation ( $I_{DS}$ ) : Le MOSFET doit être capable de supporter un courant de commutation élevé. Dans ce cas, il doit être supérieur ou égal au courant de court-circuit maximal du panneau solaire ( $I_{sc}$ ) à un ensoleillement maximal.
- Fréquence de commutation : La bande passante du MOSFET doit être supérieure à la fréquence du signal de commande utilisé pour contrôler le transistor.
- Résistance à l'état fermé : La résistance du MOSFET à l'état fermé doit être aussi faible que possible. Cela permet de réduire les pertes par effet joule et d'améliorer l'efficacité du convertisseur Buck.  
Pour cela, nous avons choisi MOSFET *IRFZ44N* (voir figure 2.10).

(c) Choix d'un pilote de MOSFET :

Pour piloter le MOSFET, nous avons choisi le pilote IR2110 qui pilote les MOSFET haut et bas en utilisant le signal *PWM* qui adapte les tensions logiques du Arduino et permet la commande du MOSFET utilisé. Ce choix est dicté par le fait que les tensions de sortie de microcontrôleur varient entre 0 et 5V, tandis que la commande de la gâchette nécessite des tensions entre 0 et 10V. Comme illustré dans la figure 2.11 du schéma de câblage du driver IR2110, il est important de noter que le circuit intégré IR2110 est très sensible. Par conséquent, il est recommandé d'utiliser des diodes pour éviter tout signal de retour qui pourrait endommager l'IR2110, ainsi que des condensateurs pour le filtrage du signal.

(d) choix de la diode :

Nous avons choisi une diode de référence 1N4001 qui supporte le courant qui la traverse. Le courant et la tension maximum du panneau





FIGURE 2.12 – Capteur de courant type ACS712

Il existe deux circuits diviseurs de tension pour mesurer respectivement les tensions du panneau solaire et de la batterie. Il utilise deux résistances. La tension de sortie résultante est une fraction de la tension d'entrée due à la distribution de la tension entre les deux résistances. Les valeurs des deux résistances sont sélectionnées de sorte que la tension de sortie soit dans la plage acceptable de l'Arduino afin de la convertir en une valeur numérique (voir figure 2.13).

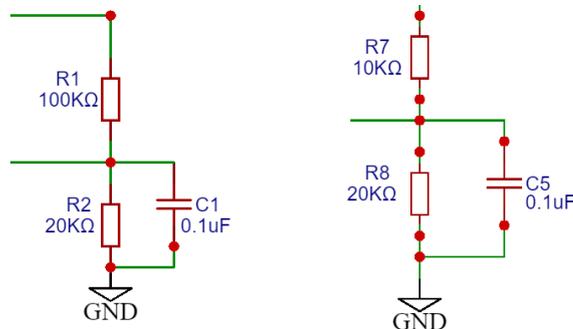


FIGURE 2.13 – Capteur de tension

### 3.6 Partie affichage :

Nous avons utilisé un afficheur de type écran LCD 20x4 d'un convertisseur I2C qui permet la connexion à Arduino, pour afficher des informations pertinentes telles que les données de tension, de courant, de puissance et d'état du système. L'utilisation d'un écran LCD peut faciliter la visualisation et la surveillance en temps réel des paramètres du MPPT.

## 4 Réalisation du prototype

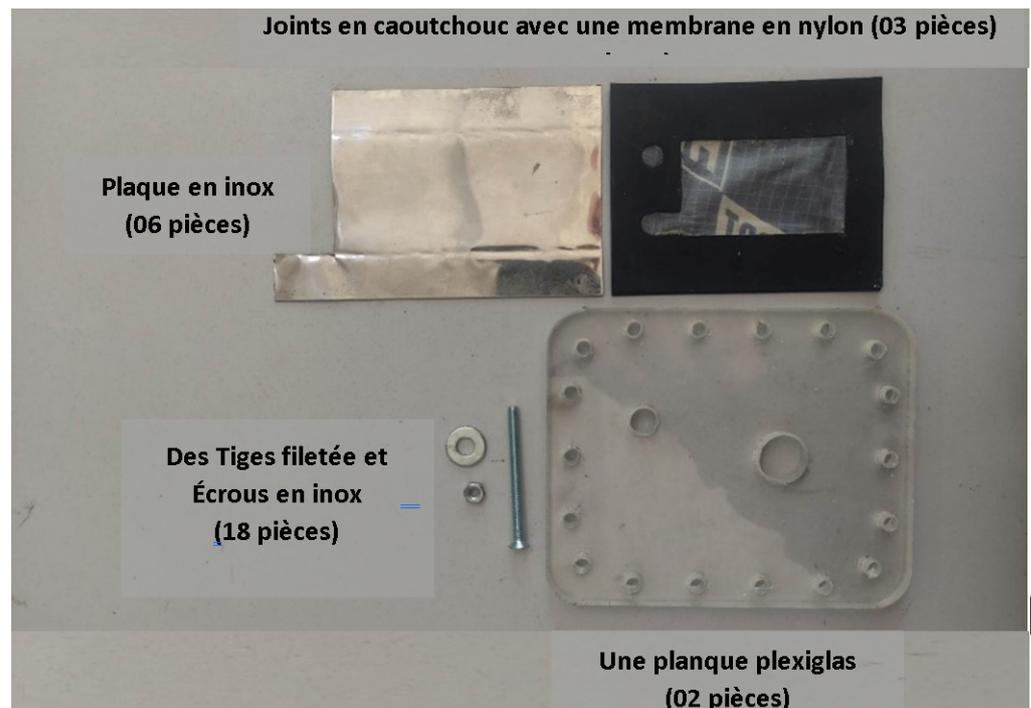
### 4.1 partie mécanique :

Pour réaliser notre prototype, nous avons besoin de plusieurs équipements pour mener à bien le processus de production d'hydrogène. Voici une liste des différents équipements nécessaires :

- Plaques en inox épaisseur 0.5 mm ;
- Tiges filetées en inox 6 ;
- Écrous en inox ;
- Une planque plexiglas en épaisseur 8 mm ;
- Joints en caoutchouc ;
- Câbles électriques ;
- Réservoir et barboteur ;

Les outils utilisés sont

- Guillotine ;
- Scie à ruban ;
- Perceuse.



Équipements nécessaires pour notre électrolyseur

## 4.2 Réalisation de la partie électronique :

Pour la simulation de notre circuit MPPT, nous avons utilisé le logiciel ISIS Proteus. Ce logiciel est largement reconnu pour son utilité dans l'édition de schémas électriques, mais il offre également des fonctionnalités de simulation qui permettent de détecter les erreurs dès la phase de conception.

Le circuit électronique avec ses différents éléments dans ISIS Proteus est illustré sur la figure 2.14, un panneau solaire générera différentes tensions en fonction de différents paramètres tels que la quantité de lumière solaire, la charge connectée et la température du panneau solaire.

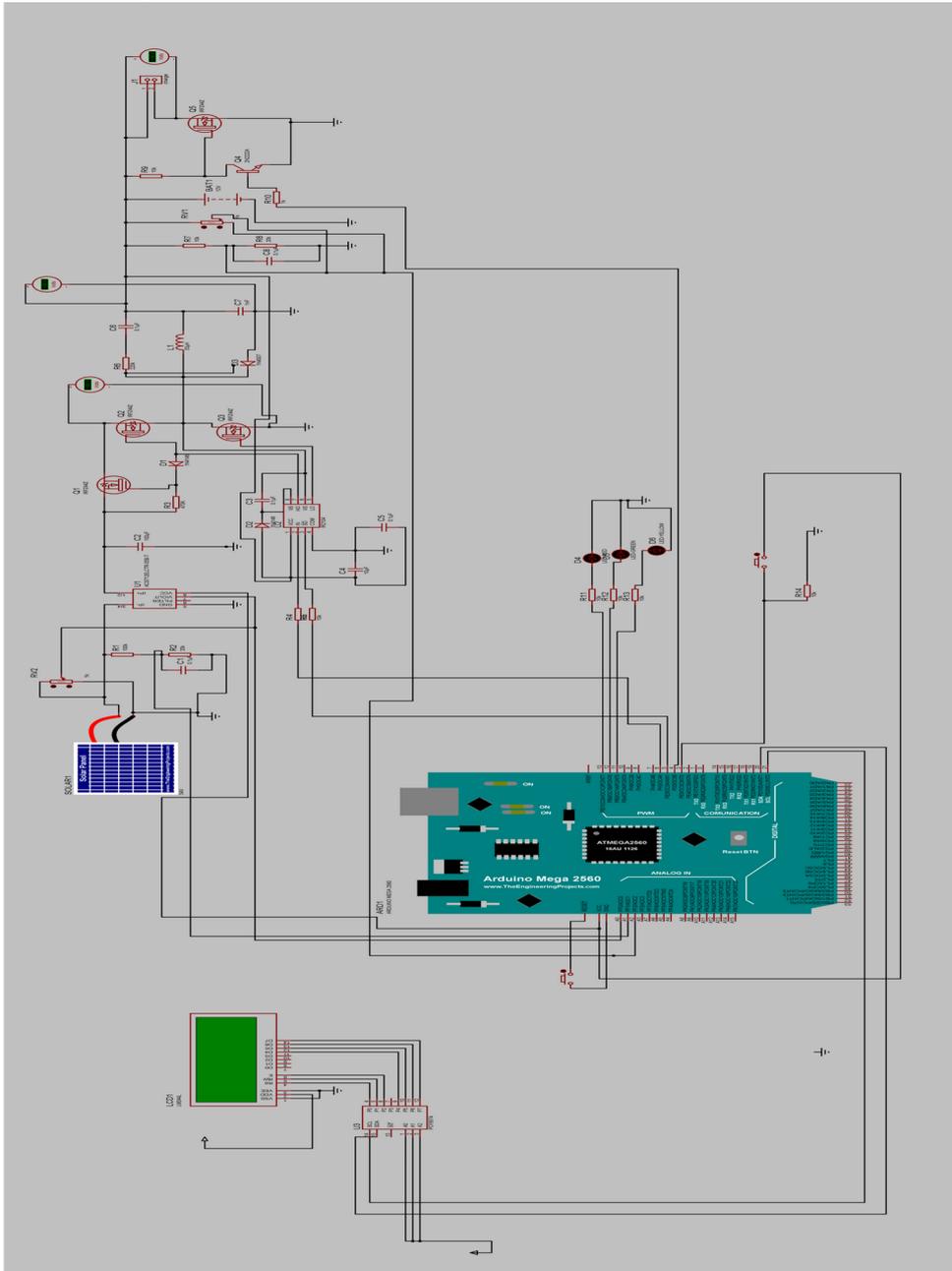


FIGURE 2.14 – Partie électronique de prototype circuit MPPT

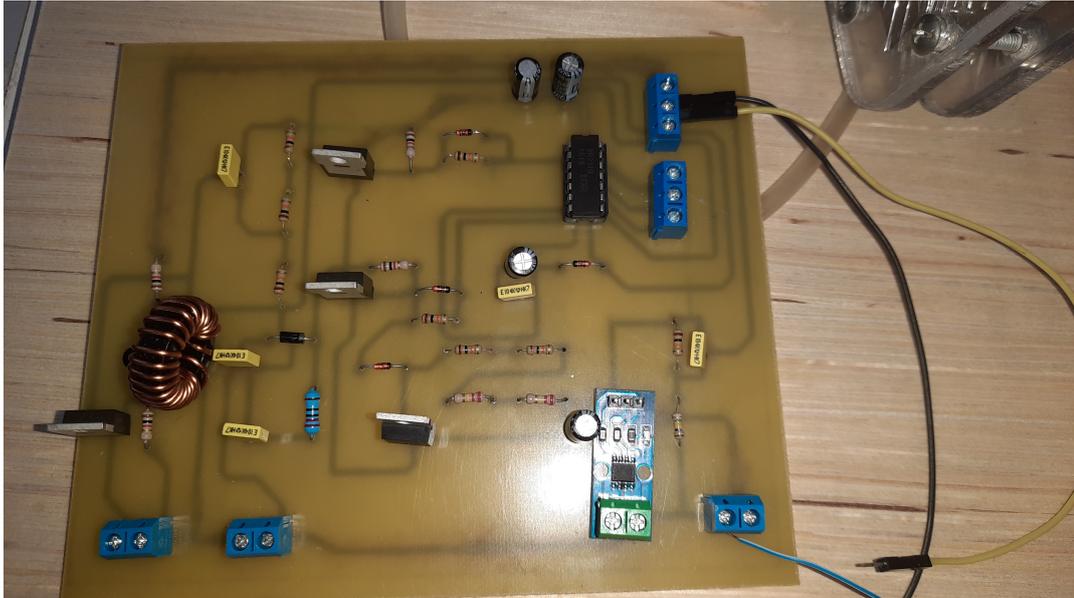


FIGURE 2.15 – Circuit imprimé réalisé

### 4.3 Programme Arduino de notre projet

Nous pouvons utiliser l'IDE Arduino pour écrire le code du projet du contrôleur de charge solaire MPPT. Le code contient tous les paramètres et fonctions pour mesurer la tension, le courant, la puissance, la tension de la batterie, l'état du chargeur le cycle de service PWM et l'état de charge du panneau solaire. L'écran LCD  $20 \times 4$  affichera l'état en temps réel de ces paramètres.

## 5 Présentation du prototype réalisé

Après avoir effectué les dimensionnements nécessaires pour notre générateur d'hydrogène et élaboré le circuit, la figure ci-dessous met en lumière le résultat final de notre travail.

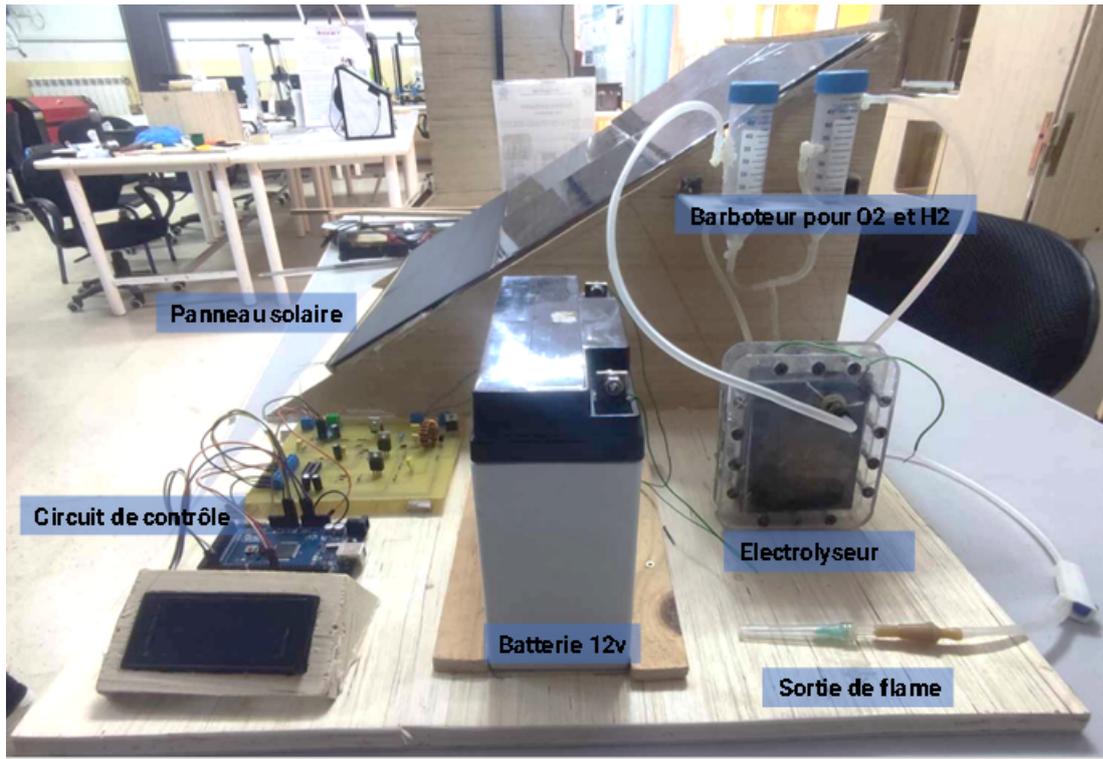


FIGURE 2.16 – Prototype final

## 6 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la sélection d'une configuration spécifique pour notre système de production d'hydrogène solaire, à savoir le système PV-électrolyseur de raccordement indirect. Cette approche consiste à utiliser l'énergie solaire photovoltaïque et stoker dans les batteries pour alimenter un électrolyseur, qui transforme l'eau en hydrogène, offrant ainsi une solution respectueuse de l'environnement pour la production d'hydrogène, une source d'énergie propre et polyvalente. Dans un premier temps, nous avons entrepris le dimensionnement minutieux des différentes composantes de ce système. Il était essentiel de déterminer les besoins énergétiques spécifiques de notre projet. Cette analyse approfondie a permis de définir les spécifications techniques requises pour le générateur d'hydrogène, garantissant ainsi son efficacité et sa performance. Le dimensionnement n'a pas été limité au générateur d'hydrogène, car une attention égale a été portée à la partie du contrôleur de charge MPPT. Le choix des composants et leur dimensionnement précis ont été effectués en cohérence avec les besoins identifiés, assurant ainsi une compatibilité et une efficacité optimales de tout le système. Par la suite, nous avons développé un design détaillé pour le générateur d'hydrogène, en prenant en compte les spécifications dimensionnelles, les matériaux, et les éléments de sécurité nécessaires. Cette phase de conception a été cruciale pour assurer la cohérence entre la théorie et la pratique, et garantir la faisabilité du projet. Le contrôleur de charge MPPT a également été soumis à un processus de conception méticuleux, intégrant des algorithmes avancés

pour suivre en temps réel le point de puissance maximale des panneaux solaires et ainsi optimiser le rendement de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Enfin, nous avons procédé à la réalisation concrète de notre système, en assemblant les composants soigneusement sélectionnés et en testant sa performance sous diverses conditions. Les résultats obtenus ont confirmé la viabilité de notre approche et la capacité du système à produire de l'hydrogène de manière propre et efficace.



# Chapitre 3

## Résultats et perspectives

### 1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats de nos expériences et discuterons de leurs implications. Après avoir expliqué la conception et le dimensionnement de notre générateur d'hydrogène solaire dans le chapitre précédent, nous passons maintenant à l'évaluation de ses performances en conditions réelles. Nous aborderons également la séparation des gaz dans le processus de production d'hydrogène, ainsi que les perspectives futures pour notre prototype.

### 2 1<sup>ère</sup> expérience : quantité des gaz

#### 2.1 Description de l'expérience.

L'expérience menée consistait à alimenter le générateur d'hydrogène avec une source d'alimentation variable de 23 volts et 3 ampères. Plusieurs variables ont été prises en compte dans cette étude expérimentale, notamment les variations du courant électrique réglé à 2A, 2,5A et 3A, ainsi que la quantité de catalyseur  $KOH$  (hydroxyde de potassium) dans la solution, variant de 5% à 25%. L'objectif principal était de mesurer le débit de gaz produit en fonction du temps pour différentes conditions expérimentales. Le schéma général de l'expérience est illustré dans la figure 3.1. Pour le besoin de l'expérience, nous avons utilisé un chronomètre, une alimentation à courant continu, un électrolyseur et un bécher gradué et émergé pour mesurer le volume du gaz produit.

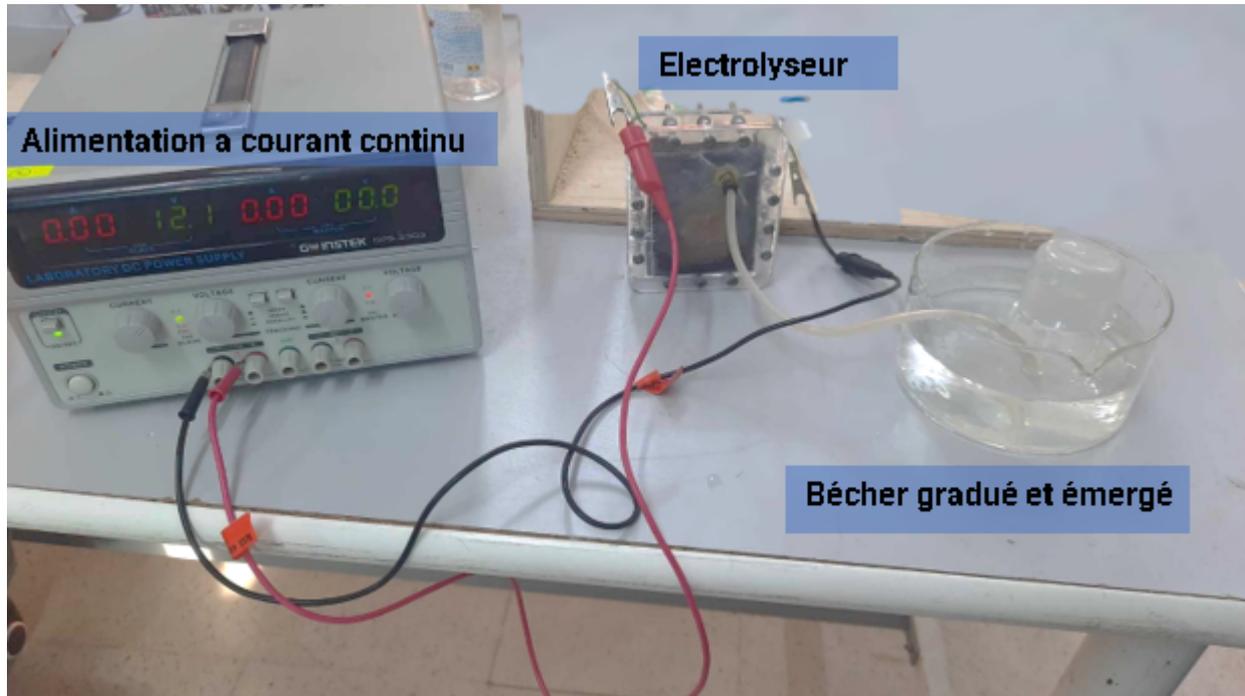


FIGURE 3.1 – 1<sup>ère</sup> expérience : mesure de la quantité des gaz produits par l'électrolyseur

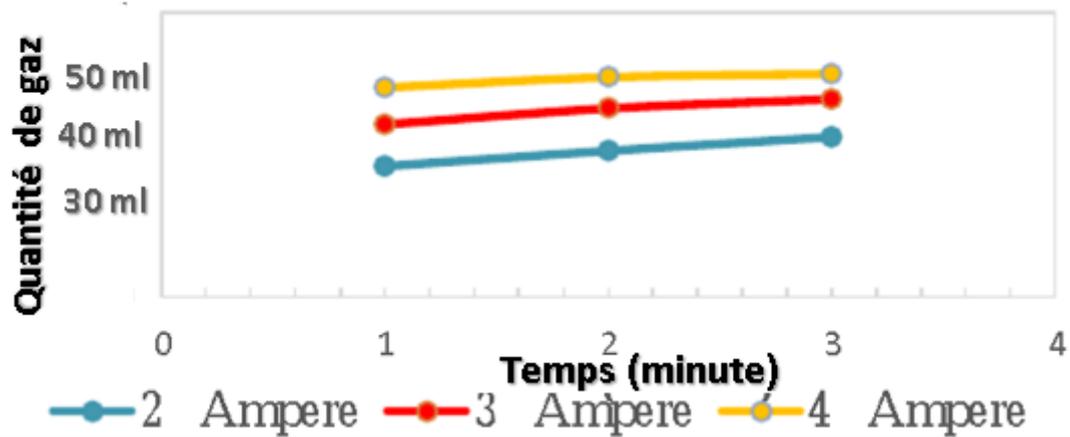


FIGURE 3.2 – Variation du gaz produit en fonction de courant

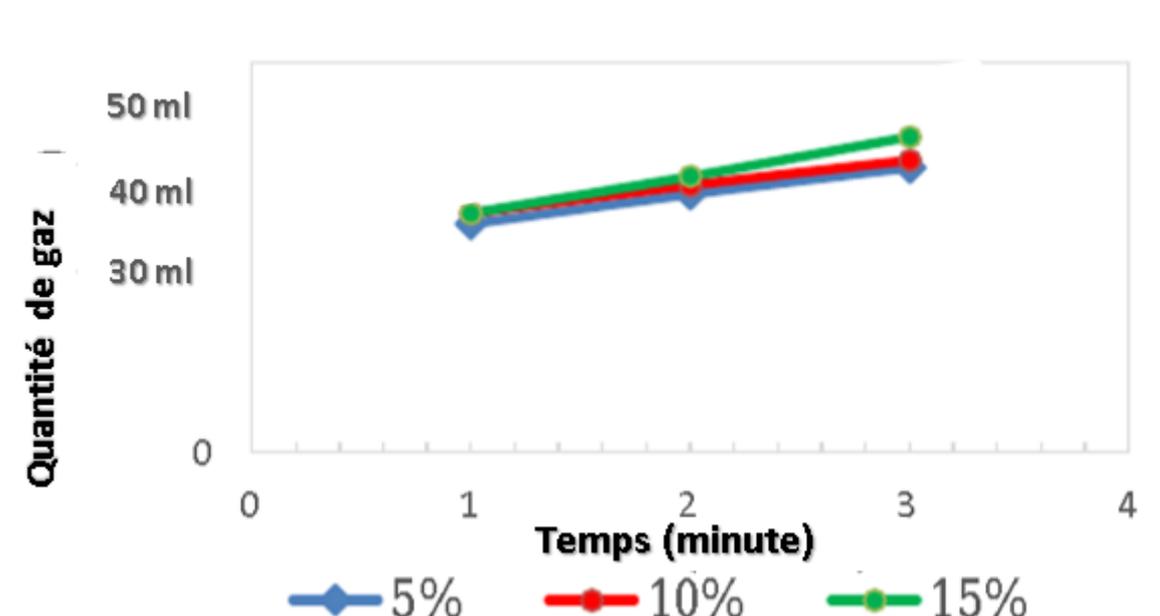


FIGURE 3.3 – Variation du gaz produit en fonction de concentration d'électrolyte koh

La figure( 3.2) montre la variation de la quantité de gaz (hydrogène + oxygène) produit dans le temps pour trois intensités de courant ( $I = 2, 3, 4 A$ ). (3.3) La plus forte augmentation de la décharge de gaz HHO en 3 minutes s'est produite à un courant de 4 ampères d'une quantité de 50 ml, alors que la plus faible décharge de gaz HHO produite est à un courant de 2 ampères avec un débit de 35 ml. Cela montre que plus le courant électrique est élevé pour fournir de l'électricité au générateur HHO, plus le gaz HHO produit est important. D'autre part, la figure (3.3) montre la variation de la quantité de gaz (hydrogène+oxygène) produite en fonction du temps et ce pour trois concentrations du *KOH* avec un ourant d'intensité égale à 3 Ampères. Avec 15% de *KOH*, la décharge maximale de gaz HHO lors de l'utilisation d'un courant de 4 ampères. Ainsi, on peut dire que plus le niveau de concentration du *KOH* est élevé plus les réactions de réduction et d'oxydation se dérouleront de manière plus optimale. À partir des résultats de l'étude ci-dessus, on peut conclure que le meilleur courant électrique pour produire la quantité de décharge de gaz HHO est un courant électrique de 3 ampères. En effet, plus la source de courant électrique est importante, plus le processus de réaction est rapide.

## 2.2 Discussion globale des résultats de la première expérience.

Les résultats de cette expérience ont été essentiels pour comprendre le comportement du générateur d'hydrogène solaire sous différentes conditions et configurations. Voici les principales conclusions obtenues :

**Effet du courant électrique :** Les débits d'hydrogène ont augmenté avec l'augmentation du courant électrique. Cependant, il existe une limite au-delà

de laquelle l'augmentation du courant ne se traduit pas nécessairement par une production d'hydrogène accrue. Il est essentiel de trouver un équilibre entre le courant électrique et la production d'hydrogène maximale. L'alimentation en courants électriques intenses accélère la décharge du gaz HHO et chauffe rapidement le générateur, tout en observant un dégagement de vapeur d'eau.

**Influence du catalyseur KOH :** L'augmentation de la quantité de *KOH* en tant que catalyseur dans la solution n'a pas eu, selon nos observations, d'effet significatif sur la décharge du gaz produit. Des expériences plus élaborées pourront confirmer ou infirmer cette constatation.

### 3 2<sup>ème</sup> expérience : Séparation des gaz.

L'expérience a été menée en utilisant le générateur HHO précédemment configuré a comme objectif de déterminer dans quelle mesure la membrane en nylon parvient à séparer l'hydrogène de l'oxygène produit dans le générateur HHO. Ainsi, pour favoriser la production massive de gaz et en se basant sur les résultats précédents, une solution contenant 15% de *KOH* a été utilisée. De plus, un courant électrique de 3 ampères a été appliqué pour stimuler la production de gaz. Un capteur de gaz hydrogène de type Q8 a été placé à la sortie du générateur pour mesurer la concentration d'hydrogène dans le flux de gaz produit. Ce capteur a été placé à la fois à la sortie du gaz hydrogène et du gaz oxygène comme cela est illustré sur la figure 3.4

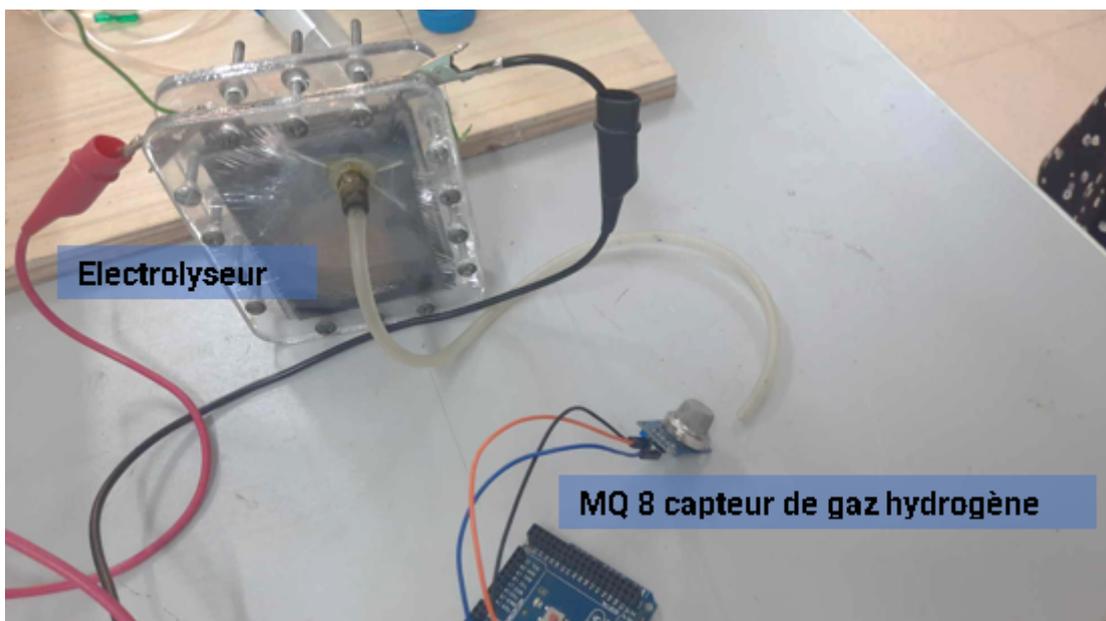


FIGURE 3.4 – 2<sup>ème</sup> expérience : Séparation des gaz.

### 3.1 Évaluation de l'efficacité de la séparation des gaz.

À la première sortie (photo (1) de la figure 3.5), la concentration d'hydrogène mesurée était entre 20 et 22 ppm (partie par million). À la deuxième sortie (photo (2) de la figure 3.5), la concentration d'hydrogène mesurée était comprise entre 950 et 1070 ppm. Cette différence de concentration entre les deux sorties indique que la première sortie correspond au gaz d'hydrogène, tandis que la deuxième sortie est dédiée au gaz oxygène.

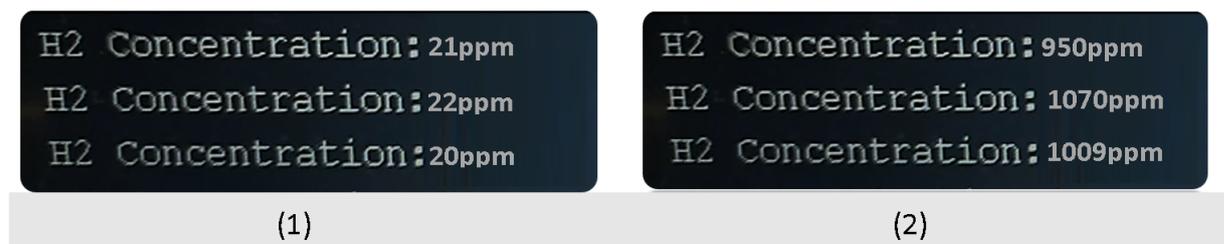


FIGURE 3.5 – Résultats obtenus par le capteur d'hydrogène pour les deux sorties (1) et (2)

### 3.2 Interprétation des résultats de la 2ème expérience

Les résultats de cette expérience montrent que l'utilisation de la membrane en nylon a eu un effet de blocage sur les gaz produits par le générateur. La très grande différence de concentration d'hydrogène mesurée entre les deux sorties indique que la séparation a été achevée avec succès. Cependant, il est important de noter que le capteur Q8 présente une marge d'erreur importante, et en raison du manque de matériel sophistiqué, il n'est pas possible d'affirmer de manière définitive ce type de séparation.

## 4 Perspectives futures et améliorations possibles

**Intégration de panneaux solaires :** En raison des contraintes de temps, il n'a pas été possible d'explorer pleinement l'intégration de panneaux solaires de pointe dans le système. Cependant, cette étape reste une perspective prometteuse pour l'avenir. L'idée est d'incorporer des panneaux solaires hautement efficaces en utilisant le circuit développé dans le chapitre 2. Cela permettrait d'augmenter la production d'électricité solaire et, par conséquent, la production d'hydrogène.

**Contrôle et Automatisation :** Pour rendre le système plus autonome et réactif à la demande, il serait bénéfique d'intégrer un système de contrôle et d'automatisation avancé. Ce système serait capable de surveiller en temps réel les paramètres de l'électrolyseur, tels que la pression, la température, la qualité de l'eau et la demande en hydrogène. En fonction de ces données, il ajusterait automatiquement les conditions de production pour maximiser l'efficacité et la sécurité du système.

**Exploration des frontières de l'électrochimie :** Au cours de cette période

de six mois dédiés à notre projet de fin d'études, nous avons eu l'opportunité d'explorer diverses expériences et recherches effectuées par des scientifiques dans le domaine de l'électrochimie, tout en capitalisant sur les connaissances acquises lors de nos stages au cours des trois années de notre formation à l'école. Parmi les réalisations notables, nous avons développé un électrolyseur qui, théoriquement, fonctionnerait avec de l'eau non distillée (voir figure 3.6). Cette approche s'inspire des théories et des procédures utilisées dans le processus de dessalement. Cependant, il est important de noter que la mise en œuvre pratique de ce concept exigerait davantage de temps et de ressources que ce qui est disponible dans le cadre d'un projet de fin d'études standard.

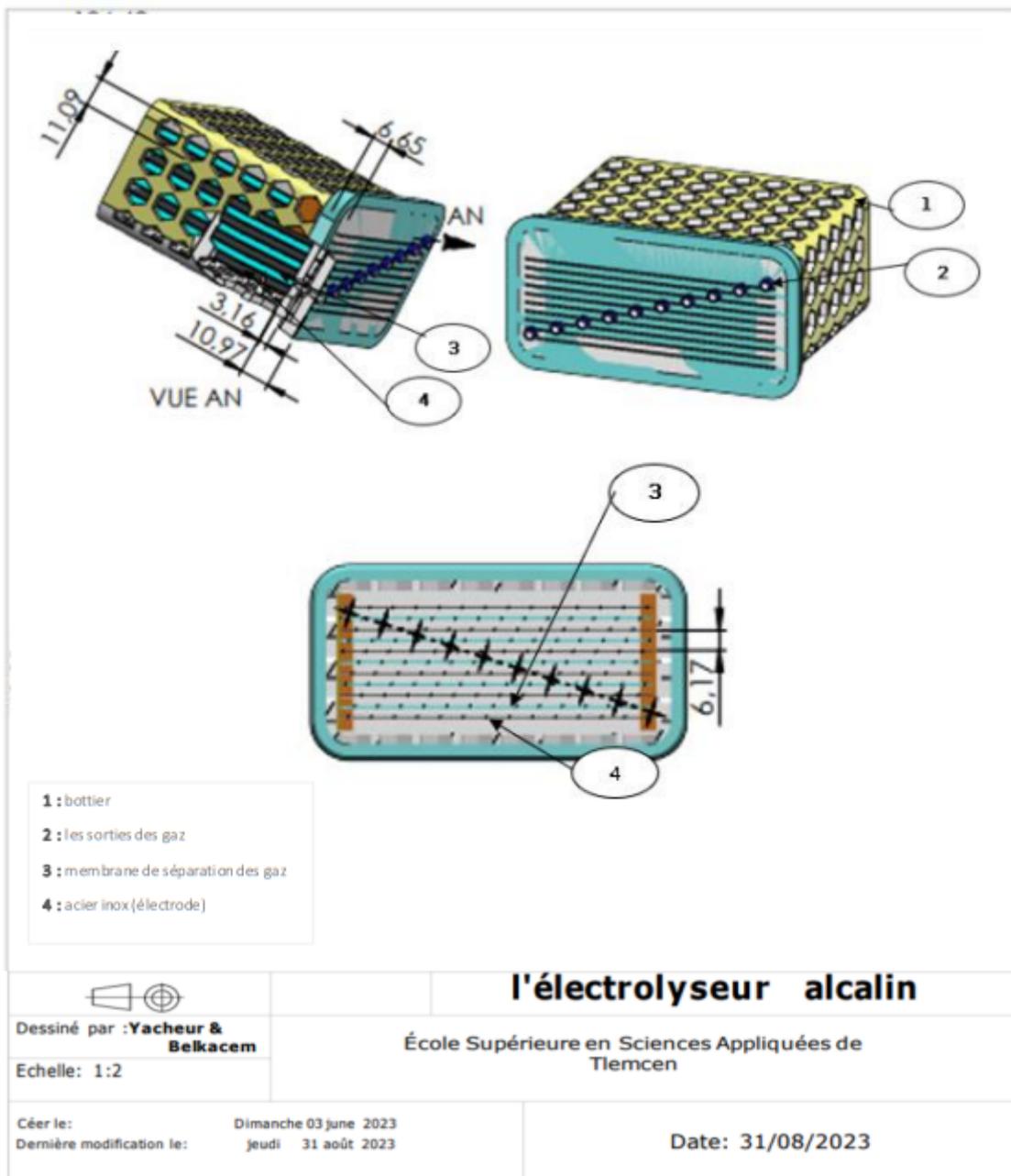


FIGURE 3.6 – Innovations dans la conception de l'électrolyseur type alcalin

## 5 Défis et contraintes lors de la mise en œuvre de notre projet

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, nous avons été confrontés à divers défis et contraintes qui ont nécessité des efforts supplémentaires et une résolution créative de problèmes.

### 5.1 Défi : Sélection et choix des composants appropriés

L'un des principaux défis auxquels nous avons été confrontés était de trouver les composants appropriés pour assurer le bon fonctionnement du prototype. Cela concernait la recherche de composants compatibles entre eux et répondant aux exigences spécifiques du projet, tels que la précision, la durabilité et la compatibilité électrique.

6. Il était difficile de trouver les composants nécessaires localement, ce qui a entraîné des retards dans la réalisation du prototype, des efforts supplémentaires ont été déployés à la recherche de fournisseurs ou explorer des alternatives pour trouver des composants adaptables.
7. Par exemple, la recherche de matériaux tels que l'acier inoxydable de type 316L ou 314L s'est avérée particulièrement difficile, car selon les cadres responsables d'une entreprise spécialisées dans la fabrication du mobiliers métalliques sis à la Zone industrielle -Chetouane, ce type d'acier n'existe plus et n'est plus importés depuis 2017. Malgré les contacts avec plusieurs entreprises nationales, aucune n'a pu nous fournir des échantillons de ces matériaux. Par ailleurs, plusieurs autres entreprises et centres de recherche, tels que, l'entreprise MYRIAD DISTRIBUTION qui est une société de commercialisation de fournitures industrielles située à Oran ; et le centre de recherche 'CDER' -Alger, ont été contactés par e-mail pour des orientations et assistances, mais sans succès.
8. La disponibilité de plexiglas de qualité suffisante pour des applications nécessitant une résistance mécanique élevée était un facteur limitant. En effet, l'utilisation du seul plexiglas disponible, fragile et moins rigide n'a pas pu résister à la pression exercée causant ainsi des fissures, limitant ainsi son utilisation dans des applications nécessitant une résistance mécanique élevée telle que notre projet. Cela nous a pris beaucoup de temps et des essais pour trouver la bonne configuration afin d'assurer une adhésion adéquate et équilibrée pour la cellule

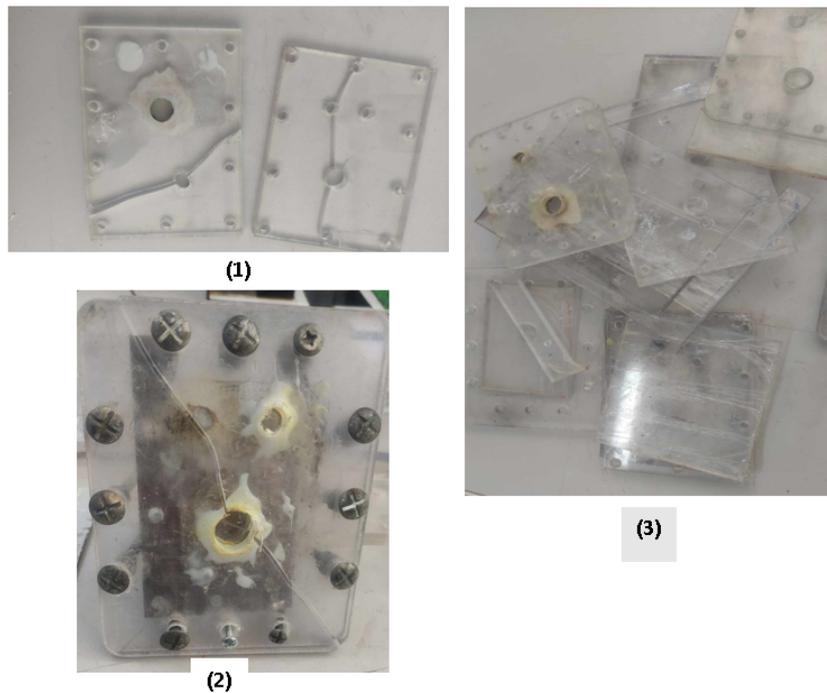


FIGURE 3.7 – Défi du choix du Plexiglas :

- (1) Plexiglas avec Cassure Durant l'Expérience
- (2) Vue Rapprochée de la Cassure dans la Photo 1
- (3) tous les Plexiglas Casés Utilisés durant le Projet (Total : 25 Pièces)

9. Le développement du circuit dédié à notre électrolyseur a également été difficile. Bien que sa simulation ait été réussie, la réalisation du circuit imprimé a pris plusieurs semaines. En utilisant un circuit intégré très sensible, il était nécessaire de le protéger contre les surtensions en l'insérant dans un circuit imprimé. Il nous a fallu plusieurs démarches avec l'université de Tlemcen pour trouver ce circuit intégré et construire la plaque de circuit imprimé et ce en raison du manque de composants et d'appareils PBC non disponibles au niveau de l'ESSAT.

## 5.2 Défi : Disponibilité des ressources humaines qualifiées

La disponibilité de personnes compétentes et expertes pour nous assister a été une contrainte majeure. Nous avons rencontré des difficultés administratives qui ont retardé la conception du projet et empêché l'obtention d'une convention au sein de l'entreprise aquaculture. Au cours des cinq premiers mois, malgré nos multiples tentatives de demandes d'aide et d'orientation vers des enseignants d'université, nous n'avons pas obtenu de réponse favorable. Nous avons également sollicité des collaborations avec des centres de recherche, mais sans succès. Nous avons introduit plusieurs demandes auprès d'enseignants d'université, et nous nous sommes même inscrits à la plateforme "Ibtikar" et avons envoyé plusieurs demandes, mais jusqu'à présent, nous n'avons reçu aucune réponse. Nous avons également sollicité le centre

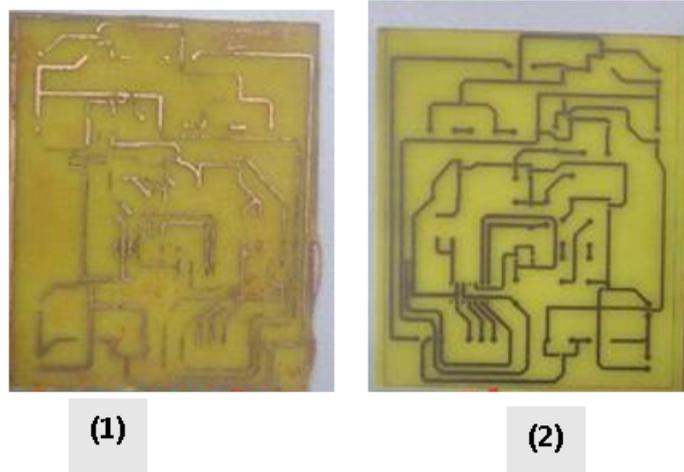


FIGURE 3.8 – Défi développement du circuit :  
 (1) Circuit Développé par nos Propres Moyennes (Durée : 2 semaines)  
 (2) Circuit Développé au Niveau de l'Université de Tlemcen (Durée : moins d'une heure)

de recherche du CDER qui dispose d'un prototype similaire à notre objet de recherche, pour une visite ou un stage, mais cela n'a pas abouti.

### 5.3 Défi : Intégration des technologies

L'intégration de différentes technologies, telles que l'électronique, la génie chimie et électrochimie, ainsi que les mécanismes physiques, a été un défi majeur. Coordonner ces différentes technologies et assurer leur fonctionnement harmonieux a exigé de nous des efforts considérables pour une compréhension approfondie des interfaces et des protocoles de communication entre les composants, ainsi que des compétences techniques avancées.

### 5.4 Contrainte : Limitations de temps et de budget

Comme pour la plupart des projets, nous avons dû faire face à des limitations de temps et de budget. Le projet s'inscrivait dans le cadre d'un décret ministériel encourageant les étudiants à présenter des projets innovants et à créer des entreprises, mais les ressources budgétaires spécifiques à ces projets (nécessaires pour l'achat des composants spécifiques indispensables pour la réalisation de notre prototype) n'étaient pas disponibles. Cela nous a obligé à rechercher des solutions palliatives et l'utilisation de moyens de bords existants, et trouver des solutions abordables sans compromettre le fonctionnement du prototype. Malgré les défis et contraintes rencontrés, nous avons réussi à surmonter ces obstacles grâce à notre persévérance et à notre détermination. En réalisant un prototype fonctionnel qui répond aux objectifs du projet. Nous tenons à remercier encore une fois toutes les personnes qui nous ont soutenues tout au long de ce processus.

## 6 Conclusion

En conclusion, le chapitre trois (03) a été consacré à la présentation des résultats de nos expériences et à la discussion de ses résultats. Nous avons abordé les différentes expériences que nous avons menées pour évaluer les performances de notre générateur d'hydrogène solaire. Les résultats de ces expériences ont été présentés en détail, mettant en lumière la capacité de notre générateur à produire de l'hydrogène. Une partie importante de ce chapitre a également été consacrée à l'étude de la séparation des gaz dans le processus de production d'hydrogène.

# Chapitre 4

## Étude économique

### 1 Introduction

Dans ce chapitre, nous explorerons l'opportunité commerciale exceptionnelle que représente notre générateur d'hydrogène solaire. Cette innovation offre une multitude d'applications potentielles, chacune ouvrant la voie à des opportunités commerciales significatives. De plus, nous entreprendrons une analyse économique complète pour évaluer la viabilité financière du projet, tout en comparant notre solution aux méthodes de soudage traditionnelles, telles que le chalumeau oxyacétylénique, pour mettre en lumière ses avantages économiques et environnementaux.

### 2 Applications commerciales du générateur d'hydrogène

Un des problèmes principaux des méthodes traditionnelles de soudage est qu'elles sont trop coûteuses et dépendent de l'oxygène en bouteille, provoquant des émissions de gaz toxiques qui affectent la santé de l'utilisateur et l'environnement, mais aussi les coûts élevés associés à l'approvisionnement en oxygène gazeux. Le soudage dépend également fortement des sources d'énergie non renouvelables. De plus, pendant la pandémie de Covid-19, il y a eu une pénurie d'oxygène dans tout le pays, ce qui a conduit à l'arrêt total du travail dans les usines et chez les artisans.

Cette idée a été développée grâce à la recherche et au développement pour utiliser l'eau uniquement comme source d'énergie thermique propre et rentable où la chaleur élevée et la vapeur d'eau sont les sous-produits, éliminant les émissions de gaz toxiques, contribuant à l'élimination des restrictions liées à l'économie d'oxygène et à la réduction des coûts. De multiples applications de cette idée, y compris le soudage, le chauffage et la cuisson, ont été explorées. Les panneaux solaires pour alimenter le générateur ont également inclus l'énergie thermique, renforçant notre engagement envers la durabilité environnementale dans la conception de ces solutions et la recherche d'un meilleur avenir en termes d'environnement, d'économie et de santé.

Nous avons entrepris une étude de marché approfondie pour évaluer le potentiel de notre solution novatrice de soudage et de chauffage à l'eau avec intégration d'énergie solaire. Cette étude vise à identifier les opportunités, les concurrents, les segments de marché cibles et les facteurs clés de succès de notre produit.

### 2.1 Analyse du marché

**1- Taille du marché :** Le marché de soudage, de chauffage et des applications industrielles connexes est vaste et en constante évolution. Il est difficile de quantifier précisément la taille du marché, mais il est estimé à plusieurs milliards de dollars dans le monde.

**2-Tendances du marché :** Le marché de soudage, de chauffage et des applications industrielles évolue constamment en raison de l'innovation technologique. On observe une tendance vers l'automatisation et la robotisation des processus de soudage et de chauffage pour améliorer l'efficacité et la qualité. De plus, les préoccupations environnementales ont conduit à la recherche de solutions de soudage et de chauffage plus respectueuses de l'environnement. Notre solution s'aligne parfaitement avec ces tendances en éliminant les émissions toxiques et en intégrant l'énergie solaire.

**3-Segmentation du marché :** Nous identifions plusieurs segments de marché potentiels pour notre produit :

-Industrie de soudage : Cela inclut les ateliers de soudage indépendants, les petites installations industrielles de fabrication et de soudage. Ces acteurs recherchent des solutions plus propres et rentables.

-Secteur automobile : Les entreprises de services automobiles, y compris les ateliers de réparation et les services de décalaminage à l'hydrogène, représentent un segment clé. La réduction des émissions est essentielle dans ce secteur.

-Éducation et recherche : Les universités et les départements de chimie, de physique et d'ingénierie représentent un segment de marché pour l'enseignement, la recherche et la formation liés à notre technologie.

-Énergies renouvelables : Les projets de recherche et de développement liés à l'énergie solaire et aux énergies renouvelables peuvent bénéficier de notre solution pour le stockage d'énergie thermique.

- Loisirs en plein air : Les campeurs et les amateurs de plein air cherchant des solutions de chauffage et de cuisson durables constituent un marché niche.

-Développement communautaire : Les gouvernements et les ONG travaillant dans des zones sans accès au gaz peuvent utiliser notre technologie pour améliorer l'accès à l'énergie propre.

### 2.2 Analyse de la concurrence :

À ce stade, il existe peu de concurrents directs proposant une technologie similaire.

**2.2.1 Opportunités et marchés potentiels :** Le générateur d'hydrogène

solaire que nous avons développé offre une multitude de perspectives commerciales prometteuses. Parmi elles, l'une des plus pertinentes concerne l'utilisation de notre système pour le chauffage. Dans cette section, nous examinerons en détail comment notre générateur d'hydrogène solaire peut être employé comme source de chaleur propre. Cette section se concentrera sur une comparaison approfondie des performances d'un chalumeau alimenté par l'hydrogène produit par notre générateur, par rapport à celles des chalumeaux traditionnels classiquement utilisés dans diverses industries.

**2.2.2 Comparaison des performances d'un chalumeau à hydrogène avec le chalumeau classique :** Il est difficile de comparer les caractéristiques techniques de différents chalumeaux, car elles varient selon le calibre de la buse étant donné que c'est elle qui contrôle le débit et pression d'admission du mélange gazeux, et par conséquent l'intensité et la dimension de la flamme. Cette comparaison se limitera aux chalumeaux oxyacétylénique et oxyhydrique, vu que les deux donnent la flamme la plus puissante et sont les plus utilisés dans l'industrie :

Température : Les deux combinaisons de gaz produisent des flammes intenses, mais l'oxyhydrique peut aller jusqu'à 3300°C, dépassant l'oxyacétylénique qui va jusqu'à environ 3200°C.

Soudage : Pour le soudage les deux types de chalumeaux peuvent être utilisés pour souder ou brasser différents métaux : alliages d'acier, alliages d'aluminium, fonte, bronze, or et argent, etc... avec des épaisseurs de soudages pouvant aller jusqu'à 25 mm. La différence entre les deux chalumeaux c'est la consommation des gaz, que l'on peut évaluer par le débit qui va de 25 l/h jusqu'à 1000 l/h pour les chalumeaux oxyacétyléniques et de 60 l/h jusqu'à 650 l/h pour les chalumeaux oxyhydriques.

Coupage : Pour le coupage, l'épaisseur maximum varie selon le métal à découper. En moyenne les deux chalumeaux peuvent découper une épaisseur allant de 4 mm jusqu'à 80 mm. Certaines entreprises comme KOMATSU, ont développé des chalumeaux de coupage à hydrogène avec une vitesse de coupage qui atteint 520 mm/min pour une plaque de 16 mm d'épaisseur, une vitesse supérieure de 30% à celle des chalumeaux ordinaires.

Pression de fonctionnement : La pression de fonctionnement de l'acétylène ne doit pas dépasser 1.5 bar car, au-delà de cette limite, l'acétylène devient instable ce qui cause une chute importante de la température de la flamme. Par contre, pour l'hydrogène on peut aller jusqu'à 3.5 bar sans danger et la flamme reste plus ou moins stable même en cas de fausses manœuvres.

Pré-mélange : Avec le chalumeau oxyacétylénique, la combinaison oxygène-acétylène est séparée dans deux cylindres distincts et cela peut compliquer le processus. Étant donné que les volumes des cylindres diffèrent, le tirage peut être inégal, par conséquent on a le risque de perturbation dû à un mauvais mélange. Le chalumeau à hydrogène ne nécessite qu'un seul récipient qui, dans la plupart des cas, est l'endroit où se produit l'électrolyse de l'eau. Ceci simplifie énormément son utilisation.

Coût : Les deux applications sont relativement coûteuses. Puisque le proces-

sus de séparer l'eau en deux parties, l'oxygène et l'hydrogène, exige beaucoup d'énergie, le chalumeau à hydrogène coûte plus cher. Le chalumeau classique est également coûteux, le coût des deux cylindres d'oxygène et d'acétylène étant à prendre en compte.

Sécurité : Les deux chalumeaux possèdent leurs parts de risques. Si la prudence n'est pas respectée, la présence de l'oxygène et de l'acétylène peut entraîner un retour de flamme, dû à l'inflammation des gaz mélangés. L'absence de carbone dans le chalumeau à hydrogène entraîne l'émission d'un feu clair. Ce feu peut ne pas être perçu facilement ce qui est potentiellement dangereux. Entre autres, l'hydrogène peut parfois fuir en raison de sa consistance. Il faut soigneusement vérifier qu'il n'y ait pas de fuites avant chaque utilisation et utiliser le chalumeau uniquement dans des zones bien ventilées.

### **2.2.4 Avantages et inconvénients des chalumeaux à hydrogène et chalumeau classiques :**

les avantages et inconvénients de chaque chalumeau sont mentionnées ci-dessus :

#### **Chalumeau type Oxhydrique :**

##### Avantages :

- Produit une flamme de très haute température, 3300 C ;
- utilise un combustible renouvelable ;
- La flamme d'hydrogène est propre et n'apporte pas d'impuretés lors du soudage ;
- consommation réduite (650l/h au max) ;
- vitesse de coupage assez élevée 520mm/min ;
- peut fonctionner à une haute pression, ce qui permet son utilisation sous l'eau, (6m de profondeur).
- ne contient que le dispositif d'électrolyse et donc peu encombrant ;
- les gaz sont dans un même réservoir, donc pas de problème de dosage du mélange ;
- ne produit que de l'eau, donc respectueuse de l'environnement et de l'opérateur.
- Peut être utilisée pour diverses applications, y compris le soudage, le chauffage et la cuisson.

##### Inconvénients :

- produit de l'hydrogène et consomme de l'énergie.
- dispositif relativement chère et lourd.
- la flamme peut être invisible.
- problème de stockage et risque de fuite de l'hydrogène vu sa faible densité.
- technologie nouvelle et peu disponible sur le marché.

#### **Chalumeau type Oxyacétylénique :**

##### Avantages :

- produit une flamme assez puissante, 3200 C ;
- disponible sur le marché ;
- relativement pas chère.

Inconvénients :

- utilise un combustible fossile ;
- produit du  $CO_2$  qui est néfaste pour l'environnement et l'opérateur.
- ne peut être utilisé qu'à des pressions relativement basses.
- consomme beaucoup de combustible 1000 l/h.
- dispositif encombrant.
- les gaz sont dans des réservoirs séparés, ce qui complique le mélange des deux.
- risque de retour de flamme.

Par cette comparaison on peut déduire que les chalumeaux classique et à hydrogène sont très efficaces pour produire des flammes de chaleur élevée et chaque dispositif présente des avantages et des inconvénients. Bien qu'ils produisent une chaleur élevée la chaleur à hydrogène présente l'avantage d'être plus respectueux de l'environnement et qu'il soit plus facile à utiliser que le chalumeau classique.

### 2.3 Étude économique

**Coût du chalumeau :**

Coût de fabrication : Les différents éléments constitutifs de notre chalumeau ainsi que leur prix sont spécifiés dans le tableau 2.3. Le prix de

TABLEAU 4.1 – Prix des différents composants en dinar algérien

Élément	Nombre	Prix à l'unité (DA)	Prix total (DA)
Plaque en inox 304	12	170	2045
Plaque en plexiglas	2	400	800
Tige filetée	7	95	665
Ecrou	134	2	268
Rondelle	54	3	162
Joint	13	230	3000
Tétine en inox	2	140	280
Raccord	1	120	120
Collier	3	25	75
Réservoir	1	3000	3000
Support	2	65	130
Boite buller	1	50	50
Clapet anti-retour de flamme	1	600	600
Bec du chalumeau	1	1800	1800
Tuyau en plastique 17	0.3 mètre	50 DA le mètre	15
Tuyau en polyuréthane 12	0.5 mètre	250 DA le mètre	125
Tuyau en polyuréthane 8	2.5 mètres	180 DA le mètre	450
Câble électrique 4	3 mètres	75 DA le mètre	225
TOTAL			13670 DA

fabrication de notre prototype de chalumeau oxyhydrique est de 13670

DA, ce qui correspond à 99,75\$.

Afin d'effectuer un bénéfice de vente de 133 %, le prix de vente de notre chalumeau sera :

$$99,75 * 2,33 = 233\$ \quad (4.1)$$

Coût énergétique : Afin de fonctionner normalement pendant une heure, notre chalumeau nécessite une solution de 3 l à base d'eau distillé avec une concentration de 15% de soude correspondant à 450 grammes. Il nécessite entre autres une tension de 12 V ainsi qu'un courant de 30 A environ. Il consomme ainsi :

$$12 \times 30 = 360 \text{ WH}$$

. Notre chalumeau consommera alors : 360 Wh.

Le prix du kwh en Algérie est de 4,179 DA [29].

Le prix de Hydroxyde de potassium (KOH) est de 0,043 \$/kg [30].

Le prix de l'eau distillée est de 120 DA/l ce qui correspond à 0,8 \$/l.

Le tableau 2.3 résume le coût énergétique de notre prototype.

TABLEAU 4.2 – Coûts détaillés des différents composants de notre chalumeau.

	Eau distillée	Electricité	KOH
Consommation par heure	3 L/h	0.36KWh	0.45 kg/h
Prix de vente	0.88 \$/L	0.04\$/kWh	0.043 \$/kg
Coût par heure (\$/h)	2.64 \$/h	0.0144\$/h	0.02 \$/h
Coût total (\$/h)		2.673 \$/h	

**Comparaison avec un chalumeau oxyhydrique sur le marché :**

Après de nombreuses recherches sur le web, nous avons trouvé en vente un chalumeau oxyhydrique avec des performances semblables aux nôtres, sont prix étant fixé à 580 \$ [31]. Après de nombreuses recherches sur le web, nous avons trouvé en vente un chalumeau oxyhydrique avec des performances semblables aux nôtres, son prix étant fixé à 580 \$ [31].

$$\frac{\text{prix d'un chalumeau sur le marché}}{\text{prix de notre chalumeau}} = \frac{580}{125,7} = 4,7 = 5 \quad (4.2)$$

Le coût de fabrication de notre chalumeau est donc 5 fois moins cher que le prix de vente d'un chalumeau possédant les mêmes performances.

$$\frac{580}{233} = 2,5 \quad (4.3)$$

Au final, même avec un gain de 133%, notre chalumeau sera toujours 3 fois moins cher à la vente que ceux trouvés sur le marché.

**Comparaison avec un chalumeau oxyacétylénique :**

Comparaison de coût de fabrication : Le prix d'un chalumeau oxyacétylénique sur le marché est de 470 \$ [32]. Afin de comparer ses performances avec notre chalumeau oxyhydrique, nous devons ajouter à ce dernier un

transformateur 12 V/300 A coûtant sur le marché 60,89 \$ [33]. Le prix sera alors :

$$233 + 60.89 = 293.86\$ \quad (4.4)$$

Le prix de notre chalumeau avec transformateur sera donc de 293.86 \$. Le gain sera :

$$470 - 293 = 177\$ \quad (4.5)$$

Notre chalumeau sera donc 177 \$ moins cher qu'un chalumeau classique. Comparaison du coût énergétique : Le tableau 2.3 résume le coût énergétique du chalumeau classique.

TABLEAU 4.3 – Coût énergétique du chalumeau classique.

Gaz	Acétylène[34]	Oxygène [35]
Consommation (L/h)	80	85
Prix de vente	494,96 \$ pour 1600 L	425,77 € pour 2300 L
Coût par heure (\$/h)	24.7 \$/h	15 \$/h
Coût total		39.7 \$/h

Comparaison globale : Le chalumeau oxyacétylénique plus cher à l'achat que notre chalumeau oxyhydrique. Calculons à partir de combien d'heures il sera plus rentable d'utiliser notre chalumeau plutôt qu'un chalumeau classique que l'on trouve sur le marché.

$$(4.6) \quad \frac{\text{prix de notre chalumeau} - \text{prix du modèle classique}}{\text{coût énergétique de notre chalumeau} - \text{coût énergétique du modèle classique}}$$

$$\frac{470 - 293}{39,7 - 3,641} = 4 \quad (4.7)$$

Notre chalumeau sera donc plus rentable qu'un chalumeau classique à partir de 4 heures d'utilisation.

### 3 But du projet

Nous citons ci-après les principaux objectifs de notre projet de travail :

**Réduction des coûts de production** : L'objectif principal de notre projet est de développer un chalumeau oxyhydrique qui soit plus abordable à produire que les modèles existants sur le marché.

**Amélioration de l'efficacité énergétique** : Un chalumeau oxyhydrique plus efficace sur le plan énergétique pourrait réduire la consommation de gaz et d'oxygène, ce qui permettrait aux utilisateurs de réaliser des économies à long terme .

**Durabilité et longévité** : Un chalumeau oxyhydrique qui dure plus longtemps nécessitera moins de remplacements et générera moins de déchets. L'objectif est de concevoir un produit robuste et durable qui puisse résister à une utilisation intensive.

**Facilité d'utilisation :** simplifier les opérations, de fournir une formation facile à suivre et de concevoir une interface utilisateur intuitive.

**Respect de l'environnement :** réduire les émissions de gaz à effet de serre ou de promouvoir des pratiques d'utilisation plus respectueuses de l'environnement. Construire une source précieuse d'oxygène pour les malades tout en utilisant une source non exploitable.

Contribuer à la promotion et au développement de cette technologie en Algérie en collaborant avec les centres de recherche spécialisé dans la technologie de l'électrolyseur. Réduire la dépendance excessive au gaz fossile. Fournir une source de chaleur pour les zones éloignées.

## 4 Partenaires stratégiques

### 1-Organisations environnementales et gouvernementales :

Green Algeria Fondation Algérienne pour la Recherche en Environnement (FARE) , Algerian Startup Fund (ASF), Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER).

### 2-Fournisseurs de matières premières pour panneaux solaires :

- Algerian PV Company à Tlemcen ;
- Energies Renouvelables Algérie (ERA) ;
- Algerian Solar Company.

### 3-Fournisseurs de batteries :

- EnerPlus ;
- Batterie Power solution ;
- CHAFEK BATTERIES SOCIETY,SARL ;
- HABCHI AUTO DISTRIBUTION, SARL.

### 4- Fournisseurs d'acier Inoxydable :

- myriad distribution ;
- NATRA INTERNATIONAL, SPA ;

### 5- Les fournisseurs d'équipements et de produits chimiques spécialisés :

- GBS MÉDIC ;
- 2MP DISTRIBUTION, SARL.

## 5 Activités clés

Voici notre vision pour l'avenir de notre entreprise :

**Formation et sensibilisation :** Nous prévoyons d'investir dans des programmes de formation approfondis pour notre équipe de vente et de marketing, afin qu'ils puissent communiquer efficacement les avantages environnementaux et économiques de notre technologie à nos clients potentiels. Notre objectif est que chaque interaction soit à la fois

**Pré-étude du besoin énergétique thermique :** Nous reconnaissons que chaque client est unique, et nous sommes déterminés à comprendre leurs besoins spécifiques en matière d'énergie thermique. Cette étape est cruciale pour personnaliser notre

solution et garantir une satisfaction client maximale.

**Recherche et développement :** L'innovation est notre moteur. Nous allons investir dans la recherche et le développement continu de notre générateur d'hydrogène solaire pour le rendre plus efficace, plus durable et plus adaptable aux besoins de nos clients.

**Fabrication, conception, installation et mise en marche :** La qualité est notre priorité. Chaque unité que nous produisons doit être conçue avec soin, fabriquée avec précision et installée correctement pour garantir un fonctionnement sans faille.

**Conception de systèmes portables :** Nous sommes flexibles et prêts à répondre à diverses applications, notamment le camping et les activités de plein air. Nous avons l'intention de concevoir des systèmes portables adaptés aux besoins des clients qui souhaitent emporter notre technologie partout où ils vont.

**Tests et évaluation de la performance :** Chaque unité que nous produisons subira des tests rigoureux pour garantir qu'elle répond à nos normes de qualité élevées. Nous ne compromettrons jamais sur la performance de notre technologie.

**Gestion de la chaîne d'approvisionnement et Partenariats :** Nous établirons des partenariats solides avec des fournisseurs fiables pour maintenir une chaîne d'approvisionnement stable et garantir que nous avons accès aux composants essentiels.

**Service après-vente - maintenance et support technique :** Notre engagement envers nos clients ne s'arrête pas à la vente. Nous offrirons un service après-vente de première classe, avec une équipe de support technique dédiée pour résoudre les problèmes et assurer une utilisation continue et satisfaisante de notre technologie.

**Marketing et promotion :** Notre équipe de marketing travaillera sans relâche pour promouvoir notre solution auprès des segments de clientèle cibles. Nous utiliserons des stratégies innovantes pour sensibiliser le marché et atteindre notre public.

## 6 Ressources clés

Pour soutenir les activités-clés liées à votre produit, un générateur d'hydrogène et un chalumeau oxyhydrique, nous avons besoin de diverses ressources clés. Voici quelques-unes des ressources essentielles :

### **Ressources humaines :**

- Expertise technique (ingénieurs et techniciens spécialisés), personnel de fabrication.
- Équipe de contrôle qualité (3 personnes).
- Équipe de marketing et des ventes (2 personnes).
- Personnel du service client.
- Équipe de recherche et développement (les fondateurs du projet).
- Personnel administratif et financier (2 personnes)

### **Ressources physiques :**

- location de l'atelier pour abriter les activités de conception, de fabrication et d'assemblage.
- Équipements de production et d'assemblage : circuit de contrôle, plaque en inox 304, plaque en plexiglas, tige filetée, écrou, rondelle, joint, tétine en inox, raccord, collier, réservoir ,support ,boite buller, clapet anti-retour de flamme , bec du chalumeau, les lignes d'assemblage, les outils de soudage, les machines de découpe, tuyau en plastique (17), tuyau en polyuréthane (12), tuyau en polyuréthane (8), Câble électrique (4).

- Alimentation électrique pour les machines et les équipements de production.
- Accès à un approvisionnement en eau pour les besoins de refroidissement et de production.
- Connexion Internet pour la gestion des opérations, la communication et la surveillance à distance.
- Équipements de sécurité, tels que des extincteurs, des détecteurs de gaz et des équipements de protection individuelle, pour garantir la sécurité des employés travaillant avec l'hydrogène et d'autres matières dangereuses.

## 7 Propositions de valeur

Les Propositions de valeur de notre produit mettent en évidence des avantages significatifs pour nos clients. Voici ces propositions de valeur :

- Fournir une source d'hydrogène propre et durable, contribuant ainsi à la transition vers des énergies plus respectueuses de l'environnement.
- Réduire les préoccupations liées à la sécurité en éliminant les émissions de gaz toxiques,
- Mettre en avant la performance et l'efficacité énergétique de vos produits, permettant aux clients d'obtenir des résultats optimaux tout en minimisant la consommation d'énergie.
- Compatibilité avec les équipements existants.
- Proposer des solutions personnalisées en fonction des besoins spécifiques de chaque client, garantissant ainsi une utilisation pratique et efficace de nos produits.
- Montrer comment vos produits peuvent être utilisés dans une variété d'applications, ce qui élargit leur utilité et leur pertinence pour différentes industries.
- Économies à long terme significatives.

## 8 Relation client

Nous pouvons développer des relations clients solides en tenant compte de nos propositions de valeur par les actions suivant :

- Impliquer activement nos clients dans la personnalisation de nos produits pour répondre à leurs besoins particuliers.
- Collecter des informations sur leurs exigences et adapter nos solutions en conséquence.
- Offrir l'installation gratuite de nos produits pour simplifier le processus pour nos clients.
- Établir un programme de suivi après-vente pour recueillir les commentaires des clients, résoudre les problèmes potentiels et maintenir une relation continue.
- proposer des programmes de formation pour les utilisateurs de nos produits, ou même pour les enseignants qui pourraient les intégrer dans leurs programmes éducatifs.
- Organisation des événements ou des visioconférences pour maintenir un engagement continu avec vos clients.

## 9 Cibles

- Universités et établissements éducatifs.
- Les ateliers de soudage professionnels bénéficier pour améliorer leur efficacité, réduire les émissions toxiques et fournir des solutions de soudage plus propres.
- Petites installations industrielles de fabrication et de soudage.
- Les amateurs de camping et les activités de loisirs en plein air.

## 10 Canaux

Voici quelques canaux de distribution que nous envisageons pour commercialiser nos produits :

- vente direct de nos produits .
  - vendre nos produits en ligne .
  - Collaboration avec des partenaires stratégiques, tels que des entreprises de technologie verte, des fabricants d'équipements industriels ou des entreprises de formation en soudage, pour une distribution conjointe de nos produits ;
  - Participation à des salons professionnels et à des foires commerciales pour présenter nos produits et établir des contacts avec des clients potentiels.
  - Vente en ligne via des plateformes de commerce électronique telles qu'Amazon ou eBay,
  - Marketing en ligne.
  - Possibilité de location de nos équipements pour une utilisation temporaire ou des projets spécifiques, ce qui peut élargir notre marché.
- Budget de publicité 5000DA/an

## 11 Concurrence

Bien que notre entreprise propose une solution unique et innovante, il est important de reconnaître l'existence de concurrents potentiels sur le marché, notamment :

- **Les entreprises de distribution de gaz** : Ces entreprises ont une présence établie dans le secteur de l'énergie et de la distribution de gaz. Bien que notre technologie puisse représenter une alternative plus propre, elles restent des acteurs importants à surveiller.
- Les fabricants de chauffage/soudage électrique : Les fabricants qui proposent des solutions de chauffage et de soudage électrique pourraient constituer une concurrence, en particulier dans des applications industrielles.
- **Les entreprises internationales opérant dans le secteur** : Des entreprises internationales spécialisées dans les énergies renouvelables ou l'hydrogène pourraient également représenter des concurrents, en fonction de leurs développements technologiques et de leur présence sur le marché.

Bien que la concurrence puisse être un défi, notre entreprise est déterminée à se démarquer grâce à notre innovation, notre engagement envers la qualité et notre capacité à personnaliser nos solutions pour répondre aux besoins spécifiques de nos

clients. Nous considérons également la concurrence comme un moteur de progrès, nous incitant à continuellement améliorer notre technologie et à rester à la pointe de l'industrie.

## 12 Stratégie de vente

### 12.1 Démonstrations du produit

- Identifier les régions éloignées qui n'ont pas accès au gaz naturel.
- Organiser des événements ou des séances de démonstration en collaboration avec des partenaires locaux.
- Faire la promotion de ces démonstrations via les médias locaux et les canaux de communication locaux.

### 12.2 Démonstrations en ligne

Utiliser les réseaux sociaux pour organiser des sessions de démonstration en direct ou des vidéos pré-enregistrées.

Diffuser des vidéos sur des plate-formes populaires et les promouvoir via des publicités cibles.

Encourager l'interaction avec les spectateurs en direct pour créer de l'engagement.

### 12.3 Sensibilisation et éducation

Organisez des séminaires, des webinaires ou des événements pour sensibiliser le marché au chauffage domestique sans émission toxique.

## 13 Structure des coûts

Pour assurer la viabilité financière de notre initiative, il est essentiel de comprendre la répartition de nos coûts. Voici comment nos coûts sont répartis :

1. **Coûts de recherche et développement** : Notre investissement dans la recherche et le développement est essentiel pour l'innovation continue de nos produits. Nous allouons 51 600 *DA* par mois pour soutenir ces activités cruciales.
2. **Coûts de production** : Les coûts de fabrication de chaque produit s'élèvent à 13 670 *DA*. Cette dépense englobe les matériaux, la main-d'œuvre et les coûts de production associés.
3. **Coûts de la main-d'œuvre** : Pour garantir une production efficace, nous allouons 158,3 *DA* par produit pour couvrir les coûts de main-d'œuvre
4. **Coûts liés aux partenariats stratégiques** : Nos partenariats stratégiques sont précieux, mais ils engendrent des dépenses annuelles de 60 000 *DA* pour maintenir ces relations profitables.
5. **Coûts marketing et promotionnels** : Afin de promouvoir nos produits et assurer une visibilité adéquate sur le marché, nous investissons 500 *DA* par produit.

6. **Coûts logistiques** : Les coûts logistiques annuels s'élèvent à 460 000 *DA*, couvrant les frais de transport, de gestion des stocks et de distribution.
7. **Coûts administratifs et généraux** : Pour couvrir les frais administratifs et généraux, tels que les salaires du personnel administratif, les locaux et autres dépenses opérationnelles essentielles, nous allouons un budget de 10 000 000 *DA*.
8. **Coûts de support technique et de service client** : Assurer un excellent support technique et un service client de qualité a un coût de 5 000 *DA* par produit vendu.
9. **Coûts de conformité réglementaire** : Pour nous conformer aux réglementations strictes, nous prévoyons des dépenses annuelles de 100 000 *Da* pour la mise en conformité et 50 000 *Da* pour la certification et l'accréditation.

Cette répartition des coûts nous permet de prendre des décisions éclairées et de gérer efficacement nos ressources pour garantir la réussite de notre entreprise.

## 14 Flux de revenus

Notre vision est de non seulement révolutionner les méthodes de soudage et de chauffage, mais aussi de créer une entreprise prospère et durable. Voici comment nous prévoyons de générer des revenus :

- **Vente directe des générateurs d'hydrogène pour soudage** : Nous mettons à disposition nos générateurs d'hydrogène spécialement conçus pour le soudage, et nous anticipons des ventes directes à nos clients, leur fournissant une solution de qualité à un prix compétitif de 25 000 *DA* par unité.
- **Vente directe des générateurs d'hydrogène pour chauffage** : Notre générateur d'hydrogène adapté au chauffage est un produit phare, et nous visons à le commercialiser directement à un tarif attractif de 26 000 *DA* par unité.
- **Kit éducatif du générateur d'hydrogène pour l'éducation** : Pour soutenir l'apprentissage et la sensibilisation, nous offrons un kit éducatif complet basé sur notre générateur d'hydrogène, accessible à 31 000 *DA* par kit, favorisant ainsi une compréhension approfondie de notre technologie. Maintenance et services de support : Nous assurons un service de maintenance et de support de qualité, à 10 000 *DA*, pour garantir le bon fonctionnement continu de nos produits et la satisfaction de nos clients.
- **Contrats de vente à des partenaires commerciaux** : En établissant des partenariats stratégiques, nous pouvons conclure des contrats de vente avec d'autres entreprises, générant ainsi des revenus variables de 100 000 à 200 000 *DA*, selon les volumes et les accords.
- **Ventes d'accessoires et de services supplémentaires** : Nous proposons des accessoires et des services complémentaires pour répondre aux besoins de nos clients, offrant une source de revenus supplémentaire de 10 000 *DA*.
- **Contrats de services et de maintenance** : La durabilité de nos produits est essentielle, et c'est pourquoi nous concluons des contrats de services et de maintenance, garantissant une stabilité financière avec des revenus de 15 000 *DDA*. Projets de développement clés en main : Nous sommes prêts à prendre

en charge des projets de développement clés en main, apportant des solutions complètes pour des revenus substantiels de 30 000 *DA* par projet.

## 15 Tableau de modèle économique( Business Model Canvas)

Notre Business Model Canvas(voir tableau suivant )dévoile les rouages de notre entreprise innovante, axée sur le développement d'un générateur d'hydrogène révolutionnaire, conçu à la fois pour le soudage et la production d'énergie thermique. Dans un monde qui recherche activement des alternatives énergétiques propres et efficaces, notre projet se positionne en pionnier. Nous croyons fermement que l'hydrogène est la clé pour répondre aux besoins croissants en énergie tout en réduisant l'impact environnemental. Cette toile stratégique met en lumière notre vision, en détaillant les principaux éléments de notre modèle économique, des segments de clientèle aux sources de revenus, en passant par les canaux de distribution et les partenariats clés, tout en révélant comment notre technologie innovante transforme ces concepts en réalité économique.

## Business Model Canvas

Nom du projet:

Générateur d'hydrogène

Créé par :

Yacheur/Bekacem

### PARTENAIRES STRATÉGIQUES

- Organisations environnementales et gouvernementales
- Algerian Startup Fund (ASF)
- Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER).
- Fournisseurs des matières premières

### ACTIVITÉS-CLÉS

- Acquérir les matériaux et composants
- Stockage des matières premières
- Assemblage du générateur
- Tests de qualité de générateur
- Commercialisation et vente
- Formation et support technique
- Recherche et développement continus
- Marketing et promotion pour Atteindre les segments de clientèle cibles

### Ressources clés

- Expert technique ; Expert comptable
- Personnel de fabrication.
- Équipe de contrôle qualité (3 pers).
- Équipe de marketing et de ventes (2 pers).
- Personnel du service client.
- Équipe de R & D (2 pers).
- Équipe administrative / financier (2 pers)
- Atelier,
- Matière première (acier inox+...ect).
- Alimentation électrique, approvisionnement en eau, accès internet, équipements de sécurité,

### Propositions de valeur

- Source d'énergie durable et propre
- Éliminent les risques liés à l'émission de gaz toxiques.
- Performance et efficacité énergétique
- Compatibilité avec les équipements existants
- Solution pratique, personnalisée
- Polyvalence d'application.
- Économies à long terme de 96% par rapport utilisation de gaz fossile.

### Relation Client

- Personnalisation nos produits aux besoins spécifiques de chaque client.
- Installation gratuite
- Suivi après-vente
- La garantie (6 mois).
- Programmes de formation pour les utilisateurs ou les enseignants.
- Des événements/ visioconférences

### Canaux

- Vente directe / en ligne
- Collaboration avec des partenaires stratégiques
- Page publicitaire sponsoring
- Marketing en ligne
- Salons professionnels et des foires commerciales

### cibles

- **B2G** : Universités et établissements éducatifs & projets de recherche .
- **B2B** : Petites installations Industrielles de formage du métal et du Soudage .
- Entreprises de services automobiles : pour le décalaminage à l'hydrogène.
- **B2C** : les habitants des zones éloignées et éparses et inaccessibles au gaz + Camping et loisirs en plein air

### La structure des coûts

- Loyer et frais de bureau+ Salaires emploi+ Assurance
- Matières premières et main-d'œuvre
- Coûts liés aux partenariats stratégiques
- Coûts de fabrication + vente + logistiques + R&D + Services publics
- Services bancaires et financiers

### Flux de revenus

- Vente directe des générateurs d'hydrogène pour soudage & chauffage & kit d'éducation (par commande).
- Services de maintenance + ventes d'accessoires
- Contrats de vente à des partenaires commerciaux + services supplémentaires
- Projets de développement clés en main

## 16 Conclusion

En conclusion, ce chapitre représente le socle de notre plan d'affaires, où nous exposons l'ampleur de l'opportunité commerciale, une analyse détaillée du marché, la compétitivité de notre technologie et la perspective financière qui sous-tend notre projet. De plus, nous avons mis en lumière les avantages du chalumeau à hydrogène, notamment son respect de l'environnement et sa simplicité d'utilisation par rapport aux chalumeaux classiques. Ces éléments seront nos guides pour orienter notre projet et explorer ses applications potentielles. Dans l'ensemble, ce chapitre fournit une vision exhaustive de notre initiative, de sa viabilité économique à sa stratégie de vente, en passant par la gestion de nos coûts et la génération de revenus. Ces éléments constituent les fondations solides de notre entreprise et attestent de notre capacité à prospérer sur le marché.

# Conclusion générale

En conclusion, ce mémoire a exploré en détail le domaine de la production d'hydrogène solaire et de ses implications dans la transition énergétique vers un avenir plus durable. Nous avons examiné les différentes méthodes de production d'hydrogène solaire, en mettant en évidence l'importance croissante de cette technologie dans la recherche de sources d'énergie propres et renouvelables.

Ce travail a également porté sur la réalisation d'un prototype de générateur d'hydrogène solaire, qui utilise des panneaux solaires pour capter l'énergie solaire, stockée dans une batterie pour une utilisation ultérieure, y compris pendant les périodes nocturnes. Pour maximiser l'efficacité énergétique, nous avons intégré un système de gestion d'énergie photovoltaïque (PV).

L'objectif principal de ce prototype à petite échelle était de démontrer la faisabilité de la production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire; permettant ainsi d'explorer les aspects techniques et opérationnels de la production d'hydrogène solaire, tout en offrant une flexibilité pour des améliorations futures.

De plus, nous avons présenté les résultats de nos expériences et discuté en détail de ces résultats, notamment en ce qui concerne la capacité de notre générateur à produire de l'hydrogène. Une partie importante de ce chapitre a également été consacrée à l'étude de la séparation des gaz dans le processus de production d'hydrogène.

Enfin, nous avons exploré les opportunités commerciales exceptionnelles offertes par notre générateur d'hydrogène solaire, en mettant en évidence ses multiples applications potentielles. Nous avons également entrepris une analyse économique approfondie pour évaluer la viabilité financière du projet, avec une comparaison de l'utilisation d'un chalumeau oxyhydrique à celle des méthodes de soudage traditionnelles, telles que l'utilisation du chalumeau oxyacétylénique, ce qui nous a permis de démontrer ses avantages économiques et environnementaux.

En somme, ce mémoire vise à contribuer à l'avancement des solutions novatrices dans le domaine de la production d'hydrogène grâce à l'énergie solaire et ouvre la voie à des opportunités technologiques et commerciales prometteuses jouant ainsi un rôle crucial en répondant aux enjeux environnementaux et en ouvrant la voie à un avenir énergétique plus propre et prometteur.



# Bibliographie

- [1] Ministère de l'Énergie et des Mines, "Perspective de développement des Énergies renouvelables et de l'hydrogène en algérie," janvier 2023.
- [2] Fuel Cell Store, "The use of hydrogen as an energy storage system," année de la consultation, par exemple 2023.
- [3] X. Gu, Z. Ying, X. Zheng, B. Dou, and G. Cui, "Photovoltaic-based energy system coupled with energy storage for all-day stable PEM electrolytic hydrogen production," *Renewable Energy*, 2023.
- [4] K. G. Nayar, J. Fernandes, R. K. McGovern, K. P. Dominguez, A. McCance, B. S. Al-Anzi, and J. H. Lienhard, "Cost and energy requirements of hybrid ro and ed brine concentration systems for salt production," *Desalination*, vol. 456, pp. 97–120, 2019.
- [5] K. Mazloomi and C. Gomes, "Hydrogen as an energy carrier : Prospects and challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 3024–3033, 2012.
- [6] S. Drenkard and A. Mirakyan, "Étude exploratoire sur le potentiel du power-to-x (hydrogène vert) pour l'algérie," novembre 2021. Partenariat Energétique Algéro-Allemand.
- [7] R. Boudries, "Hydrogen as a fuel in the transport sector in algeria," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, pp. 15215–15223, 2014.
- [8] Y. Himri, S. Rehman, A. Mostafaeipour, S. Himri, M. Merzouk, and N. K. Merzouk, "Contribution of renewable energy in algeria," 2023.
- [9] P. Tisheva, "Europe's hydrogen electrolyser capacity set to reach 2.7 gw by 2025," année de publication, par exemple 2023. Renewables Now.
- [10] N. Muhammed, M. Haq, and D. A. Al, "Hydrogen storage in depleted gas reservoirs : A comprehensive review," *Fuel*, année de publication, par exemple 2022.
- [11] M. Ismael, "Latest progress on the key operating parameters affecting the photocatalytic activity of tio<sub>2</sub>-based photocatalysts for hydrogen fuel production : A comprehensive review," *Fuel*, 2021.
- [12] O. Siddiqui and I. Dincer, "Examination of a new solar-based integrated system for desalination, electricity generation and hydrogen production," *Solar Energy*, vol. 163, pp. 224–234, 2018.
- [13] S. T. Le, T. N. Nguyen, S. Linforth, and T. D. Ngo, "Safety investigation of hydrogen energy storage systems using quantitative risk assessment," *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023.

- 
- [14] C. Acar and I. Dincer, "Review and evaluation of hydrogen production options for better environment," *Journal of Cleaner Production*, vol. 218, pp. 835–849, 2019.
- [15] R. Falama, V. Dumbrava, A. Saidi, E. Houdji, C. Salah, and S. Doka, "A comparative-analysis-based multi-criteria assessment of on/off-grid-connected renewable energy systems : A case study," *Energies*, vol. 16, p. 1540, 2023.
- [16] C. You and J. Kim, "Optimal design and global sensitivity analysis of a 100renewable energy sources based smart energy network for electrified and hydrogen cities," *Energy Conversion and Management*, vol. 223, p. 113252, April 2020.
- [17] A. Kovač, M. Paranos, and D. Marciuš, "Hydrogen in energy transition : a review," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 16, pp. 10016–10035, 2021.
- [18] P. Marocco, D. Ferrero, A. Lanzini, and M. Santarelli, "Optimal design of stand-alone solutions based on res + hydrogen storage feeding off-grid communities," *Energy Conversion and Management*, vol. 238, p. 114147, 2021.
- [19] P. Puranen, A. Kosonen, and J. Ahola, "Technical feasibility evaluation of a solar pv based off-grid domestic energy system with battery and hydrogen energy storage in northern climates," *Solar Energy*, vol. 213, pp. 246–259, 2021.
- [20] O. Marchenko and S. Solomin, "Modeling of hydrogen and electrical energy storages in wind/pv energy system on the lake baikal coast," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 15, pp. 9361–9370, 2017.
- [21] H. Kalantari, S. Ghoreishi-Madiseh, and A. Sasmito, "Hybrid renewable hydrogen energy solution for application in remote mines," *Energies*, vol. 13, no. 23, 2020.
- [22] S. Dresp, T. Ngo Thanh, M. Klingenhof, S. Bruckner, P. Hauke, and P. trasser, "Efficient direct seawater electrolyzers using selective alkaline nife-ldh as oer catalyst in asymmetric electrolyte feeds," *Energy & Environmental Science*, vol. 13, pp. 1725–1729, 2020.
- [23] F. Sun, D. He, K. Yang, J. Qiu, and Z. Wang, "Hydrogen production and water desalination with on-demand electricity output enabled by electrochemical neutralization chemistry," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 61, 2022.
- [24] H. Xie, Z. Zhao, T. Liu, Y. Wu, C. Lan, W. Jiang, L. Zhu, Y. Wang, D. Yang, and Z. Shao, "A membrane-based seawater electrolyzer for hydrogen generation," *Nature*, vol. 612, p. 673–678, 2022.
- [25] A. Kalløe, "Development of control strategy of dc-dc converter for optimal operation of pv powered electrolyser," December 2021.
- [26] M. M. Rashid, M. K. A. Mesfer, H. Naseem, and M. Danish, "Hydrogen production by water electrolysis : A review of alkaline water electrolysis, pem water electrolysis and high temperature water electrolysis," *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2015.
- [27] Y. Zheng, J. Wang, B. Yu, W. Zhang, J. Chen, J. Qiao, and J. Zhang, "A review of high temperature co-electrolysis of h<sub>2</sub>o and co<sub>2</sub> to produce sustainable fuels using solid oxide electrolysis cells (soecs) : advanced materials and technology," *Journal Name*, vol. Volume Number, no. Issue Number, p. Page Numbers, 2016.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [28] E. M. Garcia and H. A. Taroco, "Water electrolysis anode based on 430 stainless steel coated with cobalt recycled from li-ion batteries," *Journal Name*, 2018.
- [29] "Prix de l'électricité au maghreb." Consulté le 18 juin 2023.
- [30] Alibaba Group, "Potassium hydroxide koh 90" Consulté le 18 juin 2023.
- [31] Hydrogen Garage, "[https://www.hydrogengarage.com/store/index.php?main\\_page=product\\_info&products\\_id=28.](https://www.hydrogengarage.com/store/index.php?main_page=product_info&products_id=28)" Consulté le 18 juin 2023.
- [32] Amazon, "Forney 1753 tote-a-torch oxyacetylene torch kit." Consulté le 18 juin 2023.
- [33] Farnell, "Transformateur de courant 300a." Consulté le 18 juin 2023.
- [34] La Boutique du Soudeur, "Bouteille de gaz acétylène." Consulté le 18 juin 2023.
- [35] La Boutique du Soudeur, "Bouteille d'oxygène dues mobil 2.3 m3 linde." Consulté le 18 juin 2023.