

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION  
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES  
--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 : Electrotechnique  
Spécialité : Energie et environnement

Présenté par :  
Habiba DERKI  
Ferial Khadidja RAHALI

Thème

**Dimensionnement d'un système de  
production d'hydrogène en vue  
d'alimenter un véhicule électrique à pile  
à combustible**

Soutenu publiquement, le 02/ 07/ 2024, devant le jury composé de :

|                     |         |               |                      |
|---------------------|---------|---------------|----------------------|
| Mme. I. Nedjar      | MCB     | ESSA. Tlemcen | Président            |
| M. M. Mebrouki      | MCA     | ESSA. Tlemcen | Directeur de mémoire |
| Mme I.S. Bousmaha   | MCA     | ESSA. Tlemcen | Examinateur 1        |
| M. A.E.K. Ghezouani | Docteur | ESSA. Tlemcen | Examinateur 2        |

Année universitaire : 2023 / 2024

لو عرض كتاب سبعين مرة لوجد فيه خطأ  
أبي الله أن يكون صحيحا غير كتابه

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Remerciements

En tout premier lieu et traditionnellement, nous voulons rendre grâce à Dieu, le Tout-Puissant, pour l'abondance de force, de volonté et de patience qu'il nous a données tout au long de nos années d'études, ainsi que pour la bénédiction de pouvoir accomplir ce travail avec succès.

Nous tenons à remercier chaleureusement notre encadreur, Monsieur Mohamed Mebrouki. Votre expertise, patience et engagement ont été essentiels à notre réussite. Vos conseils avisés et soutien constant nous ont permis de surmonter les défis et de développer nos compétences. Votre disponibilité, écoute attentive et guidance ont juste été très appréciées. Merci infiniment pour votre temps, énergie, passion et dévouement inspirants. Nous espérons

mettre en pratique les connaissances acquises grâce à vous. Nous tenons à remercier monsieur Abdelkader Ghazouani, exprimer notre plus sincère gratitude pour votre inestimable soutien tout au long de notre travail pour ce mémoire .

Votre expertise, votre disponibilité et votre patience envers nous ont été d'une aide précieuse, et nous tenions à vous en remercier chaleureusement.

Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance envers tous les professeurs de notre établissement. Leurs connaissances approfondies, leurs cours inspirants et leurs encouragements constants ont été une véritable source de motivation pour nous. Leur approfondissement à l'enseignement et leur engagement envers notre réussite académique méritent d'être hautement salués. Nous souhaitons également exprimer notre gratitude à chaque membre de l'équipe pour sa contribution précieuse à la rédaction de notre mémoire. Votre soutien constant et indéfectible a été un véritable moteur dans la réalisation de ce travail de recherche.

Que Dieu accorde ses plus belles bénédictions à tous ceux qui se sont investis à nos côtés et nous ont permis d'en arriver à ce point.

# Dédicaces

Je dédie ce travail à:

Ma très chère maman Moulay Kheira , ce mémoire t'est dédié. Merci d'avoir toujours été là pour moi, de m'avoir soutenu tout au long de mes études. Ton amour inconditionnel, ta sagesse et ta force m'ont été d'un soutien inestimable. Merci d'être la mère exceptionnelle que tu es.

Mon frère Houcine ,qui m'a soutenu moralement tout au long de mon parcours universitaire. Souhaitons que nous puissions poursuivre notre partage de nombreuses années de rires et de souvenirs mémorables.

Ma chère amie, compagne et sœur Ferial, je te connais depuis l'ENPO, Mais je ne m'attendais pas à ce que tu sois aussi simple, compréhensive et humble. Depuis que nous sommes arrivés à l'ESSAT et que je t'ai connu, je me suis rendu compte que je n'avais jamais rencontré une amie comme toi dans ma vie. Tu as été mon soutien, mon confident, ma sœur et ma meilleure amie. Tu as su me comprendre, me conseiller et me soutenir dans les moments les plus difficiles. Tu as été une présence constante et une source d'inspiration dans mon cheminement. Merci d'être dans ma vie, de m'accepter tel que je suis et de me soutenir dans mes rêves et mes objectifs. Je suis reconnaissante pour chaque moment que nous avons passé ensemble, chaque rire, chaque larme et chaque moment que nous avons partagé. Je suis convaincue que nous continuerons ensemble inshallah, à vivre des instants mémorables et à bâtir un avenir prometteur.

Ma chère amie Douane Marwa ,Je suis éternellement reconnaissante pour tout ce que tu as fait pour moi, et mes mots ne pourront jamais exprimer pleinement ma gratitude envers toi. Nous avons partagé le bon et le mauvais ensemble et vécu des aventures inoubliables et nous continuerons ensemble ces aventures dans le future inshallah . je te souhaite le succès .

Toute ma grande famille .

Mon grand-père Moulay Hadj, qui a su être un père pour moi .

Mes amis et mes camarades de l'ESSAT.

Fadli Abderrachid, Djazzar Abdelkarim, mes amis et mes frères, je vous remercie pour tous vos conseils, vos idées et votre aide précieuse. Merci beaucoup. Je vous souhaite tout le bonheur et la réussite que la vie peut offrir. Que chaque jour soit rempli de joie et d'accomplissements.

Ma grand-mère Aouali Yamina ,que Dieu ait pitié d'elle. Elle a été pour moi une véritable deuxième mère, me guidant avec amour, sagesse, et bienveillance tout au long de ma vie.

Avec une profonde gratitude,

# Dédicaces

Avec une profonde reconnaissance, je dédie ce travail à ceux qui, quels que soient les termes utilisés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

À ma chère mère, Bahia ADDOU, qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse.

À mon cher père, Djamel, à qui je dois ma vie, ma réussite et tout mon respect.

À mon grand-père, qui n'est plus de ce monde, ADDOU Aboubaker, Même si tu n'es plus là physiquement, ton souvenir et ton esprit me guident encore aujourd'hui. Je tiens à te remercier pour tout ce que tu m'as enseigné, pour tout ce que tu m'as donné. Ton soutien et ton amour ont été des éléments essentiels pour moi. Tu m'as laissé un héritage précieux, un héritage de valeurs et de principes qui me guideront tout au long de ma vie. Même si tu n'es plus là, ton influence continue de se faire sentir en moi. Je te remercie de tout, grand-père. Tu es parti, mais ton souvenir et ton esprit vivent en moi. Tu as été un modèle pour moi, une source d'inspiration constante.

À ma chère sœur, Marwa, qui a toujours été là pour moi, dans les moments de joie comme dans les moments de peine.

À ma chère sœur, Nihel, tu es la lumière de ma vie, mon refuge, mon soutien et mon amour. Tu es la personne qui a toujours été présente, qui m'a toujours écoutée et qui m'a toujours encouragée.

À ma petite sœur, Riheme, qui sait toujours comment procurer la joie et le bonheur pour toute la famille.

À mon cher CHERROUN Mohamed Saad El Hachemi pour ses conseils, nos chemins se sont croisés il y a quelques années et depuis, tu es devenu bien plus qu'un simple camarade. Tu es devenu un pilier dans ma vie, un confident, un soutien indéfectible.

À mon binôme et ma chère amie, DERKI Habiba, depuis le premier jour, tu as été bien plus qu'une simple camarade pour moi. Tu es devenue une amie chère à mon cœur, une confidente avec qui je partage

mes joies et mes peines. Au-delà de ce projet, tu es devenue une part importante de ma vie. Nos fous rires, nos confidences et nos moments de détente ont créé des souvenirs inoubliables. Ce travail, fruit de notre collaboration, t'est dédié. Merci d'avoir été là, merci d'être toi.

Puissions-nous continuer à

avancer ensemble, dans nos projets futurs comme dans la vie.

À ma chère Douane Marwa, Je ne pourrai jamais assez te remercier pour tout ce que tu as fait pour moi. Tu es bien plus qu'une amie, tu es ma moitié, mon âme sœur

Je tiens également à remercier mes chers amis, pour leurs conseils, leurs encouragements et leur soutien tout au long de mes études.

Que Dieu les protège et leur offre la chance et le bonheur.

À ma grand-mère Taleb Nouria , mon oncle ADDOU Mohamed et ma tante ADDOU Khadra . Que Dieu leur donne une longue et joyeuse vie.

Mon club Ecogeeks a été bien plus qu'un simple regroupement d'étudiants pour moi. Il a été un lieu d'échanges, de partage et de soutien mutuel. Ce travail vous est dédié, à vous tous qui œuvrez pour un avenir plus vert et plus durable.

À toute la famille de l'ESSAT que j'ai connue jusqu'à maintenant. Merci pour votre amour et vos encouragements. Je vous remercie de votre soutien et de votre amour.

## ملخص

يتزايد الاهتمام بالطاقة المتجددة في العالم المعاصر بهدف تقليل التلوث والانبعاثات الغازية المسببة للاحتباس الحراري المرتبطة بالطاقة غير المتجددة مثل الوقود الأحفوري. توفر الألواح الشمسية الكهروضوئية أفقاً كبيراً لتوليد الكهرباء بطريقة بيئية ومستدامة. يمكن استخدام أنظمة إنتاج الهيدروجين عن طريق التحليل الكهربائي للماء لتخزين الطاقة في شكل هيدروجين، ويُستخدم هذا الهيدروجين في خلايا الوقود لتوليد الكهرباء وتغذية المركبات الكهربائية التي تعمل بخلايا الوقود، مما يعزز التنقل الخالي من الكربون.

### الكلمات المفتاحية

الطاقة المتجددة، التلوث البيئي، الاحتباس الحراري، الطاقة غير المتجددة، الوقود الأحفوري، الألواح الشمسية الكهروضوئية، توليد الكهرباء، بيئية ومستدامة، أنظمة إنتاج الهيدروجين، التحليل الكهربائي للماء، تخزين الطاقة، الهيدروجين، خلايا الوقود، المركبات الكهربائية، التنقل الخالي من الكربون.

## Résumé

L'intérêt grandissant pour les énergies renouvelables, observé dans le monde contemporain, vise à diminuer la pollution et les émissions de gaz à effet de serre associées aux énergies non renouvelables comme les combustibles fossiles. Les panneaux solaires photovoltaïques (PV) offrent de grandes perspectives pour générer de l'électricité de manière écologique et durable. Les systèmes de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau peuvent être associés, permettant de stocker l'énergie sous forme d'hydrogène, utilisé ensuite dans des piles à combustible pour générer de l'électricité et alimenter des véhicules électriques à pile à combustible, favorisant ainsi une mobilité décarbonée.

### Mots clés

Énergies renouvelables, Intérêt croissant, Pollution, Émissions de gaz à effet de serre, Réduction des émissions, Énergies non renouvelables, Combustibles fossiles, Panneaux solaires photovoltaïques, Énergie solaire, Génération d'électricité, Écologique, Durable, Production d'hydrogène, Électrolyse de l'eau, Stockage d'énergie, Hydrogène, Piles à combustible, Véhicules électriques, Pile à combustible, Mobilité décarbonée, Transport durable.

## Abstract

The growing interest in renewable energy observed in the contemporary world aims to reduce pollution and greenhouse gas emissions associated with non-renewable energy sources such as fossil fuels. Photovoltaic (PV) solar panels offer great potential for generating electricity in an ecological and sustainable manner. Hydrogen production systems through water electrolysis can be integrated, allowing energy to be stored in the form of hydrogen. This hydrogen is then used in

fuel cells to generate electricity and power fuel cell electric vehicles, thus promoting decarbonized mobility.

**Keywords**

Renewable Energy, Photovoltaic Solar Panels, Hydrogen Production, Water Electrolysis, Fuel Cells, Decarbonized Mobility, Sustainable Energy, Greenhouse Gas Emissions, Clean Energy Solutions, Energy Storage.

# Tableau de matières

|  |            |
|--|------------|
| <b>Resume</b>  | <b>XI</b>  |
| <b>Tableau de matières</b>   | <b>XI</b>  |
| <b>Table de figures</b>  | <b>XIV</b> |
| <b>Liste de figures</b>  | <b>XIV</b> |
| <b>Abbréviations</b>   | <b>1</b>   |
| <b>INTRODUCTION GENERALE</b>   | <b>2</b>   |
| <b>Introduction Générale</b>   | <b>2</b>   |
| <b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>   | <b>3</b>   |
| <b>Chapitre N°01 :Généralités sur le véhicule à pile à combustible</b>         | <b>4</b>   |
| I.1 Introduction . . . . .   | 5          |
| I.2 Véhicule électriques . . . . .   | 5          |
| I.2.1 Véhicule à batterie . . . . .  | 6          |
| I.2.2 Véhicule hybride . . . . .   | 6          |
| I.2.3 Véhicule hybride rechargeable . . . . .                                  | 6          |
| I.2.4 Véhicule à hydrogène . . . . .   | 6          |
| I.3 Véhicule électrique à hydrogène et statistique . . . . .                   | 7          |
| I.3.1 Avantages . . . . .  | 8          |
| I.3.2 Inconvénients . . . . .  | 8          |
| I.4 Architecture d'un véhicule à pile à combustible . . . . .                  | 9          |
| I.5 Intégration d'une pile à combustible dans un vehicule électrique . . . . . | 9          |
| I.5.1 Alimentation du moteur électrique dans un véhicule électrique . . . . .  | 10         |
| I.6 Pile à combustible (PAC) . . . . .   | 10         |
| I.6.1 Fonctionnement de PAC . . . . .  | 10         |
| I.6.2 Avantages de la pile à combustible . . . . .                             | 11         |
| I.6.3 Inconvénients de la pile à combustible . . . . .                         | 11         |
| I.7 Hydrogène . . . . .  | 12         |

|  |   |           |
|--|---|-----------|
| I.7.1  | Historique . . . . .  | 12        |
| I.7.2  | Types d'hydrogène (gris, vert et bleu) . . . . .  | 13        |
| I.8  | Hydrogène vert . . . . .  | 14        |
| I.8.1  | Production . . . . .  | 14        |
| I.8.2  | Transport et stockage . . . . .   | 14        |
| I.9  | Electrolyseurs . . . . .  | 14        |
| I.9.1  | Types d'électrolyseurs[14] . . . . .  | 14        |
| I.9.2  | Production d'hydrogène à partir de l'électrolyse d'alcaline . . . . .                                   | 15        |
| I.10   | Conclusion . . . . .  | 16        |
| <br><b>Chapitre N°02 :Dimensionnement et modélisation</b>                    |   | <b>17</b> |
| II.1   | Introduction . . . . .  | 18        |
| II.2   | Dimensionnement de système photovoltaïque . . . . .   | 18        |
| II.2.1   | Choix de l'électrolyseur et détermination d'énergie crête nécessaire                                    | 18        |
| II.2.2   | Calcul de l'énergie électrique . . . . .  | 20        |
| II.2.3   | Calcul de la puissance maximale (puissance crête) . . . . .   | 21        |
| II.2.4   | Choix du type de modules PV . . . . .   | 22        |
| II.2.5   | Calcul du nombre total d'unités PV . . . . .  | 22        |
| II.2.6   | Installation de modules photovoltaïques . . . . .   | 22        |
| II.2.7   | Calcul du nombre de batteries . . . . .   | 22        |
| II.3   | Conclusion . . . . .  | 25        |
| <br><b>Chapitre N°03 : Modélisation du système de production d'hydrogène</b> |   | <b>26</b> |
| III.1  | Introduction . . . . .  | 27        |
| III.2  | Présentation du système de production d'hydrogène solaire basé sur la<br>technologie alcaline . . . . . | 27        |
| III.3  | Données d'entrée et de sortie du programme de simulation . . . . .                                      | 28        |
| III.3.1  | Données météorologiques et demande de charge d'utilisateur . . . . .                                    | 28        |
| III.4  | Paramètres des composants du système . . . . .  | 30        |
| III.5  | Données du système de sortie . . . . .  | 30        |
| III.5.1  | Hypothèses de simulation . . . . .  | 30        |
| III.5.2  | Dimensionnement des composants du système . . . . .   | 31        |
| III.6  | Résultats de simulation . . . . .   | 39        |

|  |           |
|--|-----------|
| III.7 Analyse des résultats . . . . .              | 41        |
| III.7.1 1 er scénario (solstice d’hiver) . . . . . | 42        |
| III.7.2 2 ème scénario (solstice d’été) . . . . .  | 44        |
| III.8 Conclusion . . . . .                         | 45        |
| <b>Conclusion générale</b>                         | <b>46</b> |
| <b>Références</b>                                  | <b>48</b> |
| <b>Bibliographie</b>                               | <b>48</b> |

# Liste de figures

|        |  |    |
|--------|--|----|
| I.1    | les composants de VEPC.[15]  | 8  |
| I.2    | Principe de fonctionnement d'une pile à combustible [17]   | 11 |
| II.1   | Schéma de l'électrolyse alcaline[20]   | 19 |
| III.1  | Schéma de principe de l'installation de production d'hydrogène par voie solaire[2]                                   | 28 |
| III.2  | Données météorologiques du solstice d'hiver.   | 29 |
| III.3  | Données météorologiques du solstice d'été.   | 29 |
| III.4  | Schéma équivalent électrique de la cellule PV[2]   | 31 |
| III.5  | Courbe I-V pour différentes de l'éclairement à température constante   | 33 |
| III.6  | Courbe I-V pour différentes températures,et $E=1000W/m^2$  | 33 |
| III.7  | Les entrées et sorties principales d'un électrolyseur  | 34 |
| III.8  | Schématisation d'un système PAC.   | 37 |
| III.9  | Capacité de stockage du réservoir  | 38 |
| III.10 | les irradiations du solstice d'hiver.  | 39 |
| III.11 | Voltage (Batterie,Réseau) Charge Batterie (Courant [electrolyseur,Stockage , Solaire ](A) Production d'hydrogène(kg) | 39 |
| III.12 | La consommation électrique du système (production et stockage d'hydrogène)   | 40 |
| III.13 | Puissance électrolyseur,solaire,stockage(kw)..   | 40 |
| III.14 | Les irradiations du solstice d'été   | 40 |
| III.15 | La tension de batterie   | 41 |
| III.16 | consommation électrique du système (production et stockage d'hydrogène)  | 41 |
| III.17 | Puissance de( l'électrolyseur, PV, batterie)   | 41 |
| III.18 | Puissance de( l'électrolyseur, PV, batterie)   | 42 |
| III.19 | le courant (d'electrolyseur, de bateerie, de PV)   | 42 |

---

## Abbreviations

**BEV** les véhicules à batterie

**DoD** profondeur de décharge

**FCEV** Fuel Cell Electric Vehicle

**MCE** Modèle par circuit équivalent

**PàC** pile à combustible

**réf** référence

**Uco** Tension de circuit ouvert

**VE** Véhicule électrique

**VH** Véhicule hybride

# Introduction Générale

Dans le contexte actuel de transition énergétique vers des solutions de transport plus durables et moins polluantes, l'hydrogène apparaît comme une alternative prometteuse aux carburants fossiles. En particulier, les véhicules électriques à pile à combustible (VPEC) représentent une avancée technologique majeure, offrant la possibilité de réduire drastiquement les émissions de gaz à effet de serre et de diminuer la dépendance aux énergies non renouvelables.

Le développement d'un système de production d'hydrogène adapté à l'alimentation de ces VPEC revêt donc une importance capitale. Ce système, souvent désigné sous le nom de "station hydrogène", doit être conçu avec précision pour assurer une production d'hydrogène efficace, économiquement viable et respectueuse de l'environnement. Le dimensionnement de cette infrastructure nécessite une compréhension approfondie des besoins énergétiques du véhicule, des contraintes technologiques liées aux piles à combustible, ainsi que des spécificités des sources d'approvisionnement en hydrogène.

Le présent mémoire est structuré de la manière suivante : Le premier chapitre aborde les généralités sur le véhicule à pile à combustible. Le deuxième chapitre passe en revue le dimensionnement. Le troisième chapitre présente les résultats de la simulation réalisée avec Matlab, accompagnés de commentaires et de discussions approfondies.

Chapitre N°01 :  
Généralités sur le véhicule à pile à  
combustible

### I.1 Introduction

L'invasion de l'Ukraine par la Russie au début de l'année 2022 a mis un terme à la reprise de la consommation mondiale d'énergie qui avait suivi le déclin induit par la pandémie du COVID en 2020. Cette invasion a provoqué des turbulences sur les marchés de l'énergie dans le monde entier, alimenté les pressions inflationnistes et ralenti l'expansion économique. L'invasion russe de l'Ukraine n'a pas déclenché les tensions sur les marchés, mais elle les a considérablement intensifiées. Les prix de l'énergie ont ainsi fluctué et grimpé en flèche, en particulier pour le gaz naturel sur les marchés européens, et il existe un risque sérieux que l'approvisionnement continue d'être perturbé.[1]

Devant ces défis, il est plus urgent que jamais de passer à des systèmes énergétiques plus variés, décarbonés et résistants. Il est essentiel d'accélérer les investissements dans les énergies renouvelables, l'efficacité énergétique et les technologies de stockage afin de réduire la vulnérabilité aux changements

géopolitiques et climatiques. Ces défis technologiques sont à relever pour adapter les véhicules aux piles à combustible.

### I.2 Véhicule électriques

Les véhicules électriques ont une histoire qui remonte aux débuts du XIXe siècle, ils ont été créés et expérimentés pour la première fois dans les années 1830. La première voiture électrique a été inventée en 1832 par l'entrepreneur écossais Robert Anderson, puis en 1835 par le professeur Sibrandus Stratingh de Groningen, aux Pays-Bas, qui a construit une petite voiture électrique. Bien que les voitures électriques aient connu un succès initial et des records de vitesse, elles ont été éclipsées par les moteurs à combustion interne en raison de contraintes technologiques et de coûts des batteries. Toutefois, ces dernières décennies ont connu un regain d'intérêt pour les voitures électriques, avec des progrès importants dans les technologies de batterie et l'apparition de modèles populaires tels que la Tesla Model S et la Nissan Leaf. De nos jours, les véhicules électriques sont de plus en plus prisés en raison de leur faible impact sur l'environnement et des avancées continues dans les infrastructures de recharge.[6]

### I.2.1 Véhicule à batterie

Un véhicule électrique est alimenté exclusivement par un ou plusieurs moteurs électriques alimentés par une batterie rechargeable. Il ne possède pas d'élément thermique. La capacité de la batterie, habituellement de type lithium-ion, varie de 17 kWh à plus de 100 kWh en fonction du modèle. Il est nécessaire de recharger le véhicule électrique à l'aide d'une prise de courant de 120V, 240V ou de bornes de recharge rapide. Il peut avoir une autonomie de 80 à plus de 600 km.

### I.2.2 Véhicule hybride

Un véhicule hybride est un véhicule à deux sources d'énergie : un moteur thermique (essence ou diesel) et un moteur électrique alimenté par une batterie. La batterie est rechargée par un moteur thermique qui aide le moteur électrique à la propulsion. La batterie se recharge également en utilisant l'énergie récupérée lors du freinage. Il n'est pas nécessaire de connecter un véhicule hybride pour recharger sa batterie.

### I.2.3 Véhicule hybride rechargeable

Un véhicule hybride rechargeable est une évolution de l'hybride classique. Il a une batterie plus grande qui peut être rechargée sur le réseau électrique en plus d'être rechargée par le moteur thermique et la récupération d'énergie. Cela lui permet de rouler en mode 100%électrique sur plusieurs dizaines de kilomètres avant que le moteur thermique ne prenne le relais

### I.2.4 Véhicule à hydrogène

Un véhicule à hydrogène est un véhicule électrique muni d'une pile à combustible (PAC) et non d'une batterie. La PAC génère de l'électricité en utilisant de l'hydrogène stocké sous pression dans un réservoir et de l'oxygène prélevé dans l'atmosphère. L'unique émission est de l'eau. Selon le modèle, l'autonomie d'un véhicule à hydrogène peut varier de 400 à 700 km [11].

Les véhicules électriques à batterie et les véhicules électriques à hydrogène sont deux technologies distinctes qui ont des avantages et des inconvénients différents. Les véhicules électriques à batterie sont plus efficaces et plus économiques, mais ont une autonomie

limitée. Les véhicules électriques à hydrogène ont une autonomie plus élevée et peuvent être rechargés rapidement.

### I.3 Véhicule électrique à hydrogène et statistique

Les véhicules électriques à pile à combustible (VEPC) fonctionnant à l'hydrogène, ainsi que l'infrastructure permettant de les alimenter, en sont à un stade précoce de déploiement et de commercialisation pour des applications civiles, et des véhicules d'essai sont disponibles en nombre limité pour des organisations sélectionnées ayant accès à des stations de ravitaillement en hydrogène. L'hydrogène a une énergie spécifique très élevée (environ trois fois supérieure à celle de l'essence) mais une énergie volumétrique très faible (quatre fois inférieure à celle de l'essence à l'état liquide) et doit donc être pressurisé à 350 ou 700 bars pour réduire le poids et le volume du système de stockage du gaz. Les véhicules légers à pile à combustible avec 4 à 10 kg d'hydrogène à bord ont une autonomie de plus de 450 km. À titre d'exemple, environ 300 Mercedes Classe B F-Cell alimentées par des piles à combustible circulent en Europe et aux États-Unis pour des essais sur route, l'idée étant d'introduire cette technologie sur le marché d'ici trois ans. Bien que les systèmes de piles à combustible fournissent l'énergie élevée nécessaire à une longue autonomie, il est nécessaire d'hybrider les piles à combustible avec des batteries et/ou des supercapacités pour les fréquents démarrages et arrêts de la voiture et la demande d'énergie très variable de la conduite quotidienne. Les systèmes de stockage d'énergie contribueront à l'économie de carburant des véhicules en captant l'énergie par régénération, freinage régénératif et permettront d'utiliser des piles à combustible de taille adaptée. Les véhicules électriques commencent à se développer en Algérie, avec des initiatives visant à favoriser leur adoption. La première voiture importée 100% électrique est arrivée en Algérie en 2023, marquant un tournant dans le marché automobile du pays. Des mesures incitatives telles que des exonérations de droits de douane jusqu'à 80% pour l'importation de véhicules électriques ont été mises en place. De plus, le gouvernement algérien prévoit d'installer 1000 bornes de recharge électriques d'ici 2025 sur tout le territoire national. Le Centre de recherche en technologie industrielle (CRTI) a également joué un rôle dans le développement des véhicules électriques en Algérie. Ces avancées avancent l'intérêt croissant du pays pour les véhicules électriques, en ligne avec les efforts mondiaux pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et promouvoir une mobilité plus durable [5].

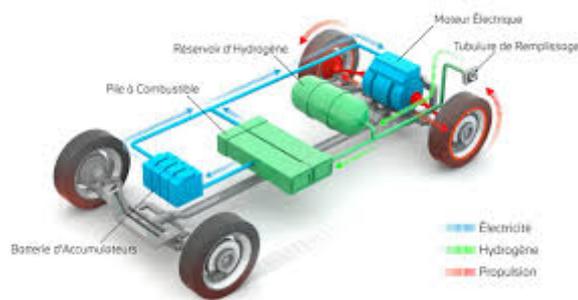


Figure I.1: les composants de VEPC.[15]

### I.3.1 Avantages

- Émission de CO<sub>2</sub> et de particules fines nulles, seule la vapeur d'eau est éjectée à l'échappement .
- La Hyundai Nexo offre une autonomie supérieure aux véhicules électriques, atteignant jusqu'à 700 km et même 1360 km pour la Toyota Mirai.
- La recharge est extrêmement rapide, ne prenant que quelques minutes, comme pour un véhicule à essence ou diesel.
- La conduite est plaisante, calme et sans aucune odeur. L'hydrogène est un élément abondant dans la nature donc ses réserves ne s'épuisent pas [15].

### I.3.2 Inconvénients

- Une consommation d'énergie globale faible, il faut environ 2 kWh d'énergie pour générer 1 kWh d'hydrogène
- Le coût des véhicules est élevé, à partir de 74 900 € pour la Toyota Mirai et 79 900 € pour la Hyundai Nexo
- Le stockage et le transport de l'hydrogène sont complexes et coûteux en énergie.
- L'hydrogène présente un risque d'inflammabilité, ce qui peut poser des problèmes de sécurité.[15]

### I.4 Architecture d'un véhicule à pile à combustible

Un véhicule à pile à combustible est essentiellement conçu autour des composants suivants:

- Un stockage d'hydrogène ou un système de production d'hydrogène
- Une pile à combustible,
- Un système de stockage d'électricité fonctionnant en parallèle avec la pile (batterie ou super capacités)
- Un moteur électrique entraînant les roues
- Un compresseur d'air (les piles fonctionnent avec de l'air à une pression comprise entre 1,2 et 5 bars absolus) .
- Des échangeurs de chaleur et un radiateur pour évacuer la chaleur produite par la pile .
- Divers composants spécifiques : pompes, capteurs, séparateurs, convertisseur de courant, contrôle commande...[15].

### I.5 Intégration d'une pile à combustible dans un véhicule électrique

Les piles à combustible sont des systèmes de conversion de l'énergie beaucoup plus efficaces que les moteurs à combustion interne classiques, et les véhicules électriques alimentés par des piles à combustible H<sub>2</sub> qui ne produisent que de la vapeur d'eau, sont des véhicules à zéro émission. Les domaines d'application des piles à combustible sont très diversifiés. Au niveau de la mobilité, elles servent par exemple à propulser des voitures, ainsi que des bus et des navires. Comme nous l'avons vu plus haut, les piles à combustible peuvent également servir à la génération stationnaire d'électricité ou à la cogénération de chaleur et d'électricité. Elles équipent enfin les sous-marins et les satellites. Chacun de ces usages nécessite une puissance, une température et un combustible (hydrogène, oxygène, méthanol...) distincts et qui correspondent à un type spécifique de pile. Fonctionnant à faible température, les AFC, PEMFC et DMFC produisent au maximum quelques dizaines de kW. On les utilise donc généralement pour alimenter des véhicules ou des

appareils mobiles. Les VEPC fonctionnent quant à eux à moyenne température. Leur puissance va de 50 à 200 kW. Étant modulables, elles peuvent servir de générateurs de secours stationnaires de 10 mégawatts. Les MCFC et SOFC fonctionnant à température très élevée et délivrent une grande puissance. Elles servent notamment à alimenter en chaleur et en électricité des habitations ou des structures industrielles [15].

### I.5.1 Alimentation du moteur électrique dans un véhicule électrique

- Dans une voiture à pile à combustible à hydrogène, le moteur électrique qui entraîne les roues est alimenté par le courant électrique produit par la pile à combustible -la pile à combustible génère en permanence de l'électricité grâce à la réaction chimique entre l'hydrogène stocké dans les réservoirs et l'oxygène de l'air -Cette électricité produite par la pile à combustible alimente directement le moteur électrique, permettant la propulsion du véhicule
- Une batterie de traction de plus faible capacité peut être utilisée en complément pour fournir un appoint de puissance lors des accélérations ou récupérer l'énergie au freinage
- Contrairement aux véhicules électriques à batterie, la voiture à pile à combustible n'a pas besoin d'être rechargée régulièrement, le plein d'hydrogène suffisant pour alimenter la pile

## I.6 Pile à combustible (PAC)

### I.6.1 Fonctionnement de PAC

La pile à combustible ou PAC est un convertisseur d'énergie qui transforme directement l'hydrogène et l'oxygène en électricité, en eau et en chaleur. Son fonctionnement repose sur une réaction électrochimique d'oxydoréduction : L'hydrogène est décomposé à l'anode en électrons et ions hydrogène, sous l'effet d'un catalyseur. Les ions hydrogène traversent l'électrolyte vers la cathode, tandis que les électrons passent par un circuit électrique, générant ainsi de l'électricité. À la cathode, l'oxygène de l'air et les électrons provenant du circuit électrique se combinent pour former de l'eau.

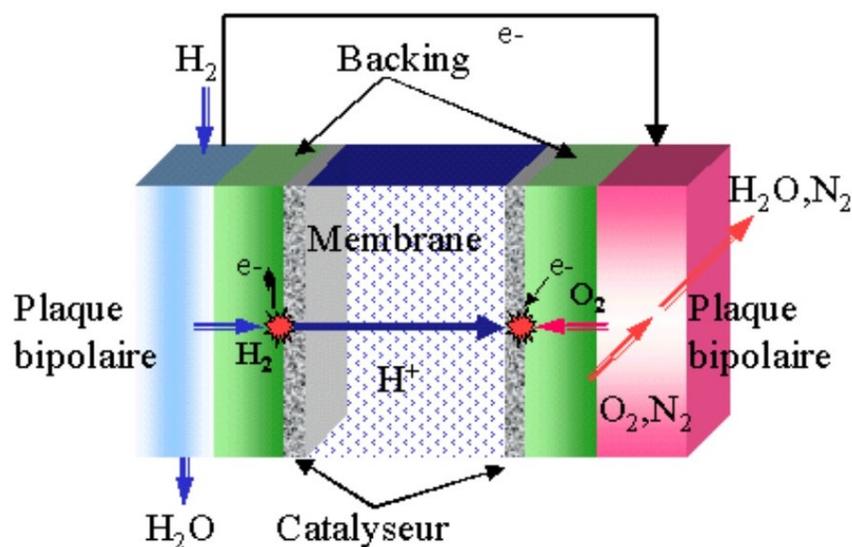


Figure I.2: Principe de fonctionnement d'une pile à combustible [17]

### I.6.2 Avantages de la pile à combustible

Les piles à hydrogène présentent de nombreux avantages. En premier lieu, elles ne dégagent aucune émission locale (hormis de l'eau), ce qui constitue un atout de taille pour la qualité de l'air, notamment dans les centres urbains. Elles offrent également des rendements supérieurs à un moteur thermique (mais inférieur à une batterie), sont silencieuses, peuvent être modulées, supportent des températures allant jusqu'à 1000 degrés Celsius (dans le cas des piles SOFC) et peuvent être utilisées pour des applications très variées (véhicules, bâtiments, etc.).

### I.6.3 Inconvénients de la pile à combustible

Le coût est le principal inconvénient de la pile à combustible. Comme expliqué plus haut, l'usage de matériaux chers et les volumes de production encore limités ne permettent pas de diminuer les prix de façon suffisante. A cela s'ajoutent la problématique de la durée de vie, jugée encore insuffisante pour des applications larges. Sur le volet environnemental, la question de la source énergétique doit aussi être posée. Si une pile à combustible affiche un fonctionnement (zéro émission), la source d'énergie en amont doit être évidemment prise en compte. Gris, bleu, vert, selon sa couleur, l'hydrogène est plus ou moins émetteur de CO<sub>2</sub>.

### I.7 Hydrogène

#### I.7.1 Historique

L'histoire de l'hydrogène remonte au début du XVI<sup>e</sup> (16<sup>ème</sup>) siècle [13] lorsque l'alchimiste suisse Paracelse étudie l'effet du vitriol (acide sulfurique) sur des copeaux de fer. Il remarqua que ce processus générait un gaz inodore qui s'échappait. Néanmoins, il faut attendre le XVII<sup>e</sup> (17<sup>ème</sup>) siècle pour que l'hydrogène soit trouvé et défini officiellement. En 1671, le chercheur britannique Robert Boyle effectua des expériences où il plongeait des métaux dans de l'acide, ce qui provoque des réactions de déplacement simples. Pendant ces expériences, il constata que les atomes d'hydrogène restants se combinent pour former du gaz d'hydrogène. En 1776, un autre chercheur britannique, Henry Cavendish, confirme que l'hydrogène était un élément différent. Il remarqua également que cet objet était extrêmement inflammable, ce qui en a fait un élément très dangereux [4]. L'hydrogène fut nommé en 1788 par le chimiste français Antoine Lavoisier, en référence au grec ( hydro ) qui signifie ( eau ) et ( gènes ) qui signifie (né de ) [9]. Dans les années 1800, l'hydrogène fut employé dans l'industrie en raison de ses caractéristiques chimiques, sans poser de problèmes spécifiques en matière de sécurité. Toutefois, en raison de la diminution des ressources fossiles et de la nécessité de lutter contre les changements climatiques, l'hydrogène est devenu un élément essentiel dans la transition énergétique [13].

Dans les années 1937, l'explosion du dirigeable allemand Hindenburg a causé la mort de 36 personnes. Cela a entraîné une phase d'abandon de l'hydrogène en

tant que gaz de combustible [4]. Les recherches et les projets sur le développement de technologies d'énergie hydrogène ont commencé plus tard, principalement dans les années 1990 et 2000. Les pays qui ont mené des recherches et des projets sur le développement de technologies d'énergie hydrogène incluent :

- Allemagne : Le projet "Technologie et développement socioéconomique des énergies renouvelables et de l'hydrogène vert en Algérie a été lancé en 2022 et vise à développer le secteur des énergies renouvelables et de l'hydrogène vert en Algérie[7].
- France : La France a mis en place des stratégies pour développer l'hydrogène bas-carbone et renouvelable, notamment pour alimenter le secteur des transports et décarboner certains secteurs industriels[10].

- Autriche : VERBUND, un leader autrichien de l'électricité, a signé un accord avec la Tunisie pour étudier la mise en œuvre du projet d'hydrogène vert "H2 Notos" pour l'exportation à grande échelle vers l'Europe centrale[16]
- Algérie : L'Algérie a lancé des projets pilotes de production d'hydrogène vert et a mis en place une stratégie nationale pour le développement de la filière de l'hydrogène à grande échelle [8].

### I.7.2 Types d'hydrogène (gris, vert et bleu)

- L'hydrogène gris (le plus utilisé): La majorité de l'hydrogène est aujourd'hui produite à partir de gaz naturel, par la vaporeformage , qui consiste à séparer les molécules d'hydrogène des molécules de carbone à l'aide de vapeur d'eau. Toutefois, cette méthode en deux étapes et à une température élevée (de 700°C à 1000°C) génère également de la CO<sub>2</sub>. L'hydrogène généré est désigné comme gris l'équation du vapo



- L'hydrogène bleu: Lorsque les émissions de CO<sub>2</sub> générées lors du processus de vaporeformage sont captées et stockées sous terre grâce à des techniques industrielles de capture et de stockage de CO<sub>2</sub> (CSC), l'hydrogène est considéré comme bleu . Ainsi, l'hydrogène bleu est généralement perçu comme une source d'énergie sans carbone.
- L'hydrogène vert est une variété d'hydrogène générée grâce à des sources d'énergie renouvelable comme l'énergie éolienne ou solaire. L'électrolyse de l'eau est le moyen de produire de l'hydrogène vert, sans émission de gaz à effet de serre. C'est un vecteur énergétique écologique qui offre la possibilité de varier le mix énergétique et de promouvoir la transition énergétique. Grâce à l'hydrogène vert, il est possible de diminuer la dépendance aux énergies fossiles et de générer une énergie plus locale. La décarbonation des secteurs de la mobilité et de l'industrie présente de nombreuses perspectives prometteuses [18].

### I.8 Hydrogène vert

#### I.8.1 Production

Comme nous l'avons observé, la production d'hydrogène vert implique l'utilisation exclusivement de la méthode de l'électrolyse de l'eau (pour ne produire aucun carbone) combinée à une électricité renouvelable. De cette façon, tout au long du processus de production, il n'y a aucune émission de carbone. En résumé, l'électrolyse d'une molécule d'eau ( $H_2O$ ) permet de rompre les liens atomiques afin de séparer deux atomes d'hydrogène (H) et un atome d'oxygène (O). Le dihydrogène est produit par paire d'atomes d'hydrogène et le dioxygène par paire d'atomes d'oxygène. On récupère alors l'hydrogène sous forme gazeuse dans un récipient spécialement conçu à cet effet.

#### I.8.2 Transport et stockage

Il est important de se rappeler que l'hydrogène est le composé chimique le plus léger dans l'univers ( $0,090 \text{ kg/m}^3$ )[\[3\]](#) et qu'il est la molécule gazeuse la plus petite. Il n'est donc pas facile de le retenir. Ainsi, les défis liés au transport et au stockage sont évidents. Après l'électrolyse, il est nécessaire de modifier l'état de l'hydrogène si l'on veut le conserver ou le transporter. Il existe deux options envisageables. L'hydrogène est comprimé à une pression élevée (700 bars) pour atteindre une masse volumique de  $42 \text{ kg/m}^3$ [\[3\]](#). De cette manière, il est possible de conserver 5 kilos d'hydrogène dans un réservoir de 125 litres. La liquéfaction de l'hydrogène se fait à une température de  $-253 \text{ °C}$ . En tant que liquide, l'hydrogène a une masse volumique de  $71 \text{ kg/m}^3$ , ce qui permet de stocker 5 kilos d'hydrogène dans un réservoir de 75 litres [\[3\]](#). Les problèmes de transport et de stockage de l'hydrogène, qu'il soit vert, gris, ou bleu, sont identiques, car la molécule d'hydrogène est identique. La seule modification est la façon dont l'hydrogène est produit.

### I.9 Electrolyseurs

#### I.9.1 Types d'électrolyseurs[\[14\]](#)

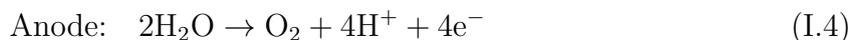
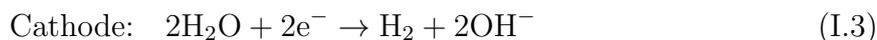
Il existe actuellement trois types d'électrolyseurs d'eau qui sont classés en fonction de la nature de leur électrolyte, ce qui entraîne une différence de température de fonctionnement:

- - Les électrolyseurs Alcalins : commercialisés et représentant la quasi-totalité des ventes d'électrolyseurs. L'électrolyse est réalisée à partir d'une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH) dont la concentration varie en fonction de la température de fonctionnement.
- Les électrolyseurs SOE (Solid Oxide Electrolyser) à oxyde solide : un électrolyte en céramique, conducteur à haute température sont encore au stade de la recherche. Cette technologie est directement issue des développements de piles à combustible de type SOFC "Solid Oxide Fuel Cell" ou pile à oxyde solide, fonctionnant entre 600 et 1100°C et cet électrolyse à haute température (EHT) est un des procédés de production d'hydrogène à grande échelle les plus prometteurs pour le futur.
- Les électrolyseurs à membrane échangeuse de protons (PEM) sont encore en cours de développement mais proches de la commercialisation. Cette technologie se distingue par un électrolyte solide à membrane polymère conductrice de protons PEM à basse température.

### I.9.2 Production d'hydrogène à partir de l'électrolyse d'alcaline

L'utilisation de l'hydrogène comme source d'énergie est motivée par la nécessité de restreindre l'utilisation des hydrocarbures en raison de la limitation des stocks disponibles, ainsi que par des raisons économiques. Leur utilisation entraîne des émissions de gaz à effet de serre. À cet égard, les technologies de production d'hydrogène basées sur les énergies renouvelables (solaire, éolien, géothermique et hydraulique) sont en cours de mise au point. Une utilisation traditionnelle est évidemment la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables et l'utilisation de cette électricité pour l'électrolyse de l'eau. La réaction d'oxydo-réduction de l'eau implique la séparation de l'eau H<sub>2</sub>O en hydrogène H<sub>2</sub> et oxygène O<sub>2</sub> lors de l'électrolyse. Cette électrolyse est réalisée à l'aide d'électricité, c'est le procédé industriel actuellement disponible. Étant donné le prix de la production par l'électrolyse de l'eau consiste en deux réactions chimiques ayant lieu séparément sur deux électrodes. A la cathode se produit la réduction de l'eau suivant

l'équation (I.3) et à l'anode l'oxydation des ions hydroxydes selon l'équation (4).



### I.10 Conclusion

Dans ce chapitre a présenté une introduction approfondie aux véhicules à pile combustible, en explorant les différents types de véhicules électriques, notamment les véhicules à batterie, les véhicules hybrides, les véhicules hybrides rechargeables et les véhicules à hydrogène. Nous avons également détaillé l'architecture des véhicules à pile à combustible, incluant les composants et systèmes nécessaires pour fonctionner. De plus, nous avons examiné comment intégrer une pile à combustible dans un véhicule électrique, ainsi que les principes de base de la pile à combustible, les propriétés de l'hydrogène et l'électrolyseur. Nous avons également étudié les avantages et inconvénients de la pile à combustible, notamment son coût élevé, la nécessité de trouver des solutions pour stocker et produire de l'hydrogène, ainsi que les problèmes de sécurité et d'environnement. En fin de compte, la pile à combustible représente une technologie prometteuse pour le futur de l'industrie automobile, mais il est essentiel de résoudre ces défis pour la rendre viable et durable.

Chapitre N°02 :  
Dimensionnement et modélisation

### II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons d'abord dimensionner un système photovoltaïque capable d'alimenter un électrolyseur industriel pour la production d'hydrogène vert à grande échelle. Pour cela, nous utiliserons les caractéristiques de certains électrolyseurs industriels choisis sur le marché. Ensuite, nous allons analyser les impacts économiques et environnementaux de ce système photovoltaïque en utilisant le logiciel Homer.

### II.2 Dimensionnement de système photovoltaïque

#### II.2.1 Choix de l'électrolyseur et détermination d'énergie crête nécessaire

Après une longue exploration du domaine des électrolyseurs sur internet, nous avons décidé que l'électrolyseur alcalin, comme le montre la Figure II.1 était le plus approprié pour notre projet en raison d'attractivité économique de son électrolyseur alcalin en raison de sa non-utilisation de métaux rares, ce qui le rend moins coûteux que d'autres technologies. Malgré sa réaction lente aux variations et son temps de démarrage d'environ 20 minutes, il s'agit d'une solution fiable et éprouvée pour la production d'hydrogène. En outre, les électrolyseurs alcalins ont la capacité de fonctionner à des pressions de sortie relativement basses, ce qui les rend adaptés aux stations de recharge VEPC.

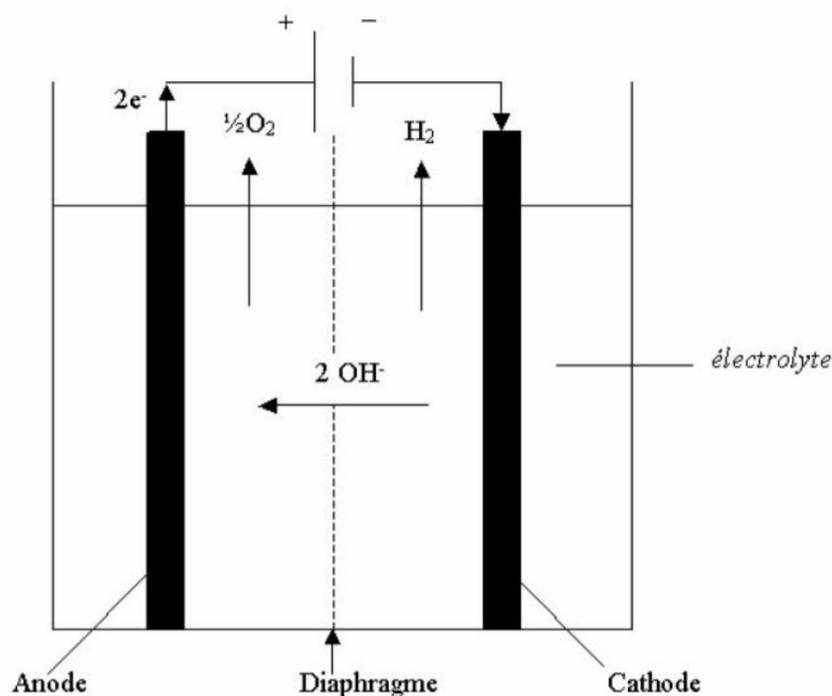


Figure II.1: Schéma de l'électrolyse alcaline[20]

### Caractéristiques de l'électrolyseur

- **Rendement énergétique** : 77%, ce qui signifie que 77% de l'énergie électrique est utilisée efficacement dans le processus d'électrolyse.
- **Efficacité** : 90%, ce qui signifie que 90% de l'énergie électrique utilisée est convertie en énergie chimique dans l'hydrogène produit.
- **Coût** : Moins cher que d'autres technologies d'électrolyse en raison de la non-utilisation de métaux rares.
- **Durée de vie** : Plus courte que d'autres technologies.
- **Maintenances** : Moins nécessaires que d'autres technologies car les matériaux utilisés ne réagissent pas avec l'électrolyte liquide.
- **Pression de sortie** : Relativement faible, adaptée aux stations de recharge VPAC.
- **Consommation électrique** : Nécessite environ 4,5 à 5 kWh d'électricité pour générer 1 Nm<sup>3</sup> d'hydrogène vert dans une station de charge pour véhicules à pile à combustible (VPAC).

- Surface de l'électrolyseur :  $1000 \text{ cm}^2$  ou  $0,1 \text{ m}^2$ .

### Remarque

1  $Nm^3$  représente le volume qu'occupe un mole de gaz dans les condition normales.

### II.2.2 Calcul de l'énergie électrique

Tout d'abord, nous devons convertir la surface de l'électrolyseur en mètres carrés ( $m^2$ ) :

$$\text{Surface de l'électrolyseur} = 1000 \text{ cm}^2 = 0,1 \text{ m}^2$$

Ensuite, nous avons utilisé la formule suivante pour calculer l'énergie nécessaire pour produire 1 kg d'hydrogène :

$$\text{Énergie nécessaire (kWh)} = \frac{\text{Quantité d'énergie nécessaire par unité de surface} \times \text{surface de l'électrolyseur}}{\text{Efficacité de l'électrolyseur} \times \text{Rendement énergétique}}$$

Maintenant, nous devons déterminer la quantité d'énergie nécessaire par unité de surface. Cette valeur dépend de la densité de courant appliquée et d'autres paramètres spécifiques à l'électrolyseur, mais pour simplifier, nous pouvons utiliser une estimation générale.

Disons que la quantité d'énergie nécessaire par unité de surface est de  $50 \text{ kWh/m}^2/\text{kg}$  d'hydrogène produit.

Nous avons utilisé la formule :

$$\text{Énergie nécessaire (kWh)} = \frac{50 \text{ kWh/m}^2/\text{kg} \times 0,1 \text{ m}^2}{0,90 \times 0,77} \quad (\text{II.5})$$

$$\text{Énergie nécessaire (kWh)} = \frac{5 \text{ kWh/kg}}{0,693} \quad (\text{II.6})$$

$$\text{Énergie nécessaire (kWh)} = 7,22 \text{ kWh/kg} \quad (\text{II.7})$$

Donc, pour produire 1 kg d'hydrogène avec cet électrolyseur, environ 7,22 kWh d'énergie électrique seraient nécessaires.

La puissance nécessaire pour produire 1 kg d'hydrogène avec cet électrolyseur peut

être calculée en utilisant la formule de la puissance :

$$\text{Puissance (kW)} = \frac{\text{Énergie nécessaire (kWh)}}{\text{Temps (heure)}} \quad (\text{II.8})$$

Dans ce cas, nous avons trouvé que pour produire 1 kg d'hydrogène, environ 7,22 kWh d'énergie électrique sont nécessaires. Supposons que cette énergie soit consommée en 5 heures d'après PSH, alors :

$$\text{Puissance (kW)} = \frac{7,22 \text{ kWh}}{5 \text{ h}} \quad (\text{II.9})$$

$$\text{Puissance (kW)} = 1,444 \text{ kW} \quad (\text{II.10})$$

Donc, pour produire 1 kg d'hydrogène avec cet électrolyseur en 5 heures, environ 1,444 kW de puissance électrique seraient nécessaires.

### II.2.3 Calcul de la puissance maximale (puissance crête)

$$P_c = \frac{E_c \times P_i}{I_r \times K} \quad (\text{II.11})$$

où :

$P_c$  : Puissance crête en kilowatts (kW)

$E_c$  : Consommation journalière d'énergie électrique en kilowatt-heures (kWh)

$P_i$  : Capacité d'éclairement journalier en conditions standards en kilowatts par mètre carré par jour (kW/m<sup>2</sup>/jour)

$I_r$  : Rayonnement quotidien moyen en kilowatt-heures par mètre carré par jour (kWh/m<sup>2</sup>/jour)

$K$  : Facteur de correction total (adimensionnel)

Le facteur de correction total (0.85) dans les panneaux solaires est utilisé pour corriger la puissance crête totale des panneaux. Cette correction est nécessaire car la puissance crête totale est influencée par plusieurs facteurs tels que la température ambiante, la luminosité solaire, la qualité des panneaux, etc. Le facteur de correction total (0.85) est utilisé pour ajuster la puissance crête totale en fonction de ces facteurs pour obtenir une estimation plus précise de la puissance réelle des panneaux.

Application numérique :

$$P_c = \frac{7,22 \text{ kWh} \times 1 \text{ kW/m}^2/\text{j}}{5 \text{ kWh/m}^2/\text{jour} \times 0,85} \quad (\text{II.12})$$

$$P_c = 1,70 \text{ kW} \quad (\text{II.13})$$

### II.2.4 Choix du type de modules PV

Les panneaux solaires les plus efficaces pour produire de l'hydrogène dans une station de charge pour véhicules à pile à combustible (VPAC) en Algérie sont ceux développés par Oxford PV

### II.2.5 Calcul du nombre total d'unités PV

$$N_m = \frac{P_c}{P_m} \quad (\text{II.14})$$

Application numérique :

$$N_m = \frac{1,7 \text{ kW}}{400 \text{ W}} \quad (\text{II.15})$$

$$N_m = 4,25 = 5 \text{ panneaux} \quad (\text{II.16})$$

### II.2.6 Installation de modules photovoltaïques

Les modules photovoltaïques doivent être installés en fonction de la tension maximale et du courant maximum du convertisseur.

### II.2.7 Calcul du nombre de batteries

- La tension du système est de 48 V.
- Le pourcentage de décharge de la batterie est de 80%, ce qui correspond à 0.8.
- La capacité de la batterie est de 200 Ah.

### Calcul de capacité de stockage de la batterie

$$C_t = \frac{E_c \times N}{D \times U} \quad (\text{II.17})$$

où :

$C_t$  : Capacité totale de stockage en Ah

$E_c$  : Consommation journalière d'énergie électrique en Wh/jour

$N$  : Le nombre de jours de réserve (en jours)

$U$  : Tension de la batterie en volts (V)

$D$  : Pourcentage de décharge de la batterie (adimensionnel)

Application numérique:

$$C_t = \frac{7,22 \text{ kWh} \times 1}{0,8 \times 48 \text{ volt}} \quad (\text{II.18})$$

$$C_t = 188,02 \text{ Ah} \quad (\text{II.19})$$

### Calcul du nombre batteries

$$N_b = \frac{C_t}{C_p} \quad (\text{II.20})$$

où :

$C_t$  : Capacité totale de stockage en Ah

$C_p$  : Capacité de stockage de batterie en Ah

Application numérique:

$$N_b = \frac{188,02 \text{ Ah}}{200 \text{ Ah}} \quad (\text{II.21})$$

$$N_b = 1 \text{ batterie}$$

Pour calculer la consommation d'hydrogène d'un véhicule à pile à combustible (VPEC) pour une distance de 600 km, nous devons connaître la consommation d'hydrogène du VPEC par unité de distance parcourue. En utilisant les données que vous avez fournies (6 kg d'hydrogène pour une distance de 600 km), pour convertir la consommation d'hydrogène d'un VPEC de 6 kg pour une distance donnée en kg/100 km, nous devons d'abord connaître la distance pour laquelle ces 6 kg d'hydrogène sont utilisés. Une fois que nous avons cette information, nous pouvons utiliser la formule suivante pour

calculer la consommation d'hydrogène du VPEC en kg/100 km :

$$C_{VPEC} = \left( \frac{\text{Quantité d'hydrogène (kg)}}{\text{Distance parcourue (km)}} \right) \times 100 \quad (\text{II.22})$$

En utilisant les données que vous avez fournies (6 kg d'hydrogène pour une distance de 600 km), nous pouvons calculer la consommation d'hydrogène du VPEC en kg/100 km :

$$C_{VPEC} = \frac{6 \text{ kg}}{600 \text{ km}} \times 100 = 1 \text{ kg/100 km} \quad (\text{II.23})$$

Donc, la consommation d'hydrogène du VPEC serait de 1 kg pour parcourir 100 kilomètres.  
ce qui équivaut à 43,32 kWh d'énergie électrique serait nécessaire.

$$P_c = \frac{E_c \times P_i}{I_r \times K} \quad (\text{II.24})$$

$$P_c = \frac{43.32 \times 1}{5 \times 0.85} \quad (\text{II.25})$$

$$P_c = 10.20 \text{ kW} \quad (\text{II.26})$$

$$N_m = \frac{P_c}{P_m} \quad (\text{II.27})$$

où :

$N_m$ : Nombre de modules.

$P_m$ : Puissance d'un module PV.

Application numérique :

$$N_m = \frac{10.20 \text{ kW}}{400 \text{ W}} \quad (\text{II.28})$$

$$N_m = \frac{21.20 \text{ kW}}{400 \text{ W}} = 26 \text{ panneaux} \quad (\text{II.29})$$

$$C_t = \frac{E_c \times N}{D \times U} \quad (\text{II.30})$$

Application numérique:

$$C_t = \frac{43,32 \text{ kWh} \times 1}{0,8 \times 48 \text{ volt}} \quad (\text{II.31})$$

$$C_t = 1128,125 \text{ Ah} \quad (\text{II.32})$$

Calcul du nombre batteries

$$N_b = \frac{C_t}{C_p} \quad (\text{II.33})$$

Application numérique:

$$N_b = \frac{1128,125 \text{ Ah}}{200 \text{ Ah}} \quad (\text{II.34})$$

$$N_b = 6 \text{ batterie}$$

### II.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les principales étapes pour évaluer le dimensionnement d'un système d'hydrogène. Des éléments spécifiques du système tels que la puissance des panneaux solaires, la capacité des batteries et les caractéristiques de l'électrolyseur doivent être pris en compte. En tenant compte de ces facteurs, nous pouvons garantir une bonne fonctionnalité et une durée de vie prolongée du système.

Chapitre N°03 :  
Modélisation du système de production  
d'hydrogène

### III.1 Introduction

Le système de recharge de véhicule à hydrogène est un projet innovant qui vise à offrir une solution durable et efficace pour les véhicules à hydrogène. Dans ce chapitre, nous présentons l'étude d'un système de production d'hydrogène solaire par le couplage entre le modèle photovoltaïque et l'électrolyseur. Ainsi, il est important dans la conception d'optimiser la configuration du système, la taille des composants et les paramètres de contrôle. La conception par simulation permet d'étudier les différentes options, de prendre en compte divers paramètres d'influence et de répondre efficacement aux exigences du système et de l'utilisateur.

### III.2 Présentation du système de production d'hydrogène solaire basé sur la technologie alcaline

Le système de production d'hydrogène solaire sélectionné comprend les éléments énergétiques centraux suivants : un système photovoltaïque (PV), une batterie lithium-ion, une charge, un électrolyseur, ainsi qu'un réservoir de stockage pour l'hydrogène et l'oxygène. Des convertisseurs DC/DC servent d'interface entre les composants actifs du système.

La description du protocole de simulation est basée sur trois éléments clés :

- La simulation de l'énergie solaire consiste à simuler la génération d'énergie solaire par le système photovoltaïque.
- La simulation de la batterie permet de simuler la charge et la décharge de la batterie(grid), ainsi que son influence sur l'efficacité globale du système.
- La simulation de l'électrolyse consiste à reproduire le processus d'électrolyse, incluant la transformation de l'énergie présente en hydrogène et oxygène.

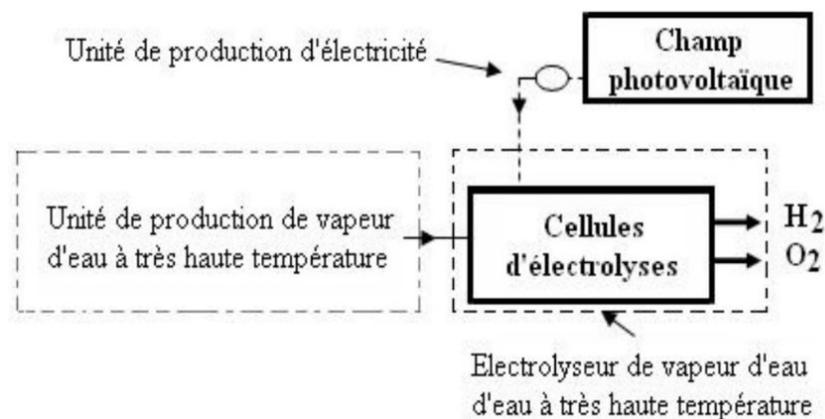


Figure III.1: Schéma de principe de l'installation de production d'hydrogène par voie solaire[2]

### III.3 Données d'entrée et de sortie du programme de simulation

Les informations disponibles sur le système à concevoir ou à analyser sont souvent limitées. La demande de charge de l'utilisateur peut ne pas être entièrement connue. De plus, les données sur les ressources peuvent ne pas être disponibles pour le site d'intérêt avec la résolution requise ou avec des statistiques fiables sur les moyennes climatologiques. Dans ce cas, il est nécessaire de générer des données à partir de valeurs moyennes quotidiennes ou mensuelles.

Deux types de données d'entrée sont nécessaires pour définir le modèle de simulation du système. La première catégorie comprend les caractéristiques techniques, qui sont spécifiées pour le modèle de simulation et ont été étudiées en détail dans le chapitre précédent. La seconde catégorie de données inclut les informations météorologiques et la demande de charge de l'utilisateur. Toutes ces données sont intégrées dans le programme de simulation.

#### III.3.1 Données météorologiques et demande de charge d'utilisateur

Pour obtenir des prévisions analytiques précises des performances à long terme des systèmes hybrides, il est essentiel de disposer de données fiables sur les sources renouvelables, telles que le rayonnement solaire. Il est nécessaire d'avoir suffisamment de mesures ou de méthodes d'estimation pour fournir au modèle de simulation les données météorologiques.

### Données météorologiques

Ce travail examine les données météorologiques essentielles pour le système . Le site Weatherspark a été utilisé, notamment pour les données du solstice, telles que le rayonnement solaire (exprimé en  $W/m^2$ ) et la température ambiante (exprimée en  $^{\circ}C$ ). Il est nécessaire de fournir ces informations au modèle de simulation sur une base horaire. Le calculateur du site CDER permet d'obtenir le rayonnement solaire et la température ambiante en utilisant des panneaux orientés et inclinés de manière arbitraire à n'importe quel endroit du globe.

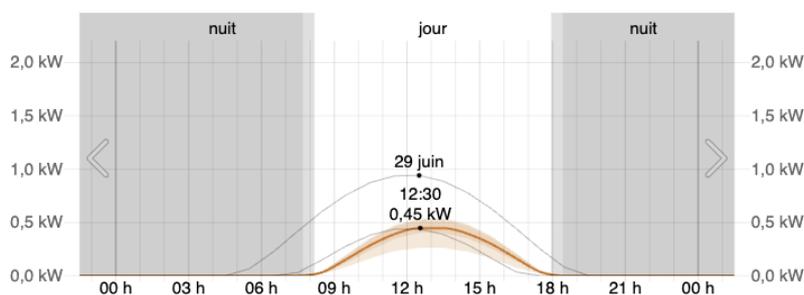


Figure III.2: Données météorologiques du solstice d'hiver.

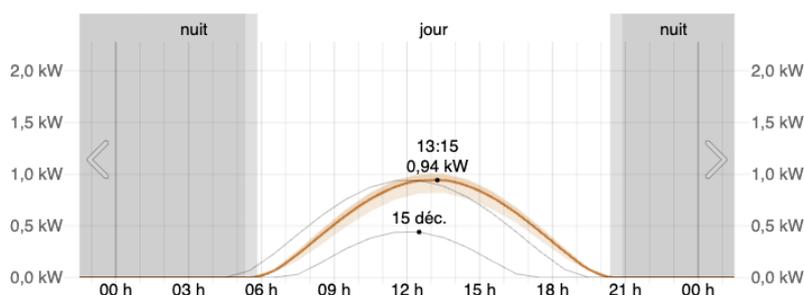


Figure III.3: Données météorologiques du solstice d'été.

### Données de demande de charge de l'utilisateur

Une étape cruciale dans la conception du système est l'estimation des besoins en puissance pour l'application. Certaines études de simulation utilisent des moyennes de charge annuelles ou saisonnières. Cependant, des études de simulation précises nécessitent des données de charge de l'utilisateur avec une résolution temporelle plus élevée, allant de quelques minutes à quelques heures. Ainsi, la courbe de charge de l'application envisagée sur la période d'étude doit être disponible sur une base horaire. La méthode de gestion

d'énergie décrite précédemment est appliquée à une étude de cas : le système doit alimenter une Station de charge des VPAC Es-senia D'Oran. Le dimensionnement est basé sur des données horaires d'irradiation solaire sur un plan incliné.

La demande de charge de l'utilisateur a un impact sur la taille des composants du système, ainsi que sur les unités de stockage et de transformation d'énergie. Il peut être nécessaire de réaliser des simulations sur une ou plusieurs années afin de déterminer leurs dimensions optimales. Outre les charges nécessaires à l'usager, le système utilise également de l'énergie, connue sous le nom de charge parasite, qui peut être à la fois thermique et électrique. Il y a différentes charges parasites, telles que l'énergie requise pour faire fonctionner les contrôleurs, les ventilateurs, ainsi que la chaleur nécessaire à certains éléments du système.

### III.4 Paramètres des composants du système

Chaque modèle de composant requiert plusieurs paramètres afin de pouvoir exécuter le programme. On peut trouver les paramètres correspondants des différents éléments du système dans le chapitre précédent.

### III.5 Données du système de sortie

Le modèle de simulation créé offre des données adéquates concernant les performances de chaque élément et du système. Toutes les variables du système requises pour analyser les performances sont enregistrées dans un fichier de sortie de simulation lors de l'exécution du programme. Par exemple, l'électrolyseur produit l'hydrogène, la pile à combustible consomme de l'hydrogène et génère de l'énergie pour compenser le déficit d'énergie du générateur photovoltaïque pour répondre à la demande de charge de l'utilisateur, l'énergie photovoltaïque générée, etc. Il est possible d'analyser ces résultats de sortie afin de prendre en compte tous les aspects de performance du système global.

#### III.5.1 Hypothèses de simulation

- Certaines pertes d'hydrogène sont attendues, comme celles survenant dans l'électrolyseur ou la pile à combustible lors des phases de démarrage et d'arrêt, dans le réservoir de stockage de gaz, ainsi que pendant le fonctionnement de la pile à combustible.

Cependant, ces pertes ne seront pas incluses dans la simulation.

- De nombreuses charges parasites sont gérées par une alimentation auxiliaire, telle que la pompe nécessaire au refroidissement à l'eau de l'électrolyseur ou de la pile à combustible, le courant de protection pour l'électrolyseur pendant le fonctionnement de secours, le système de purification d'hydrogène, ainsi que le système d'acquisition de données et de contrôle. Ces puissances parasites sont omises de la simulation du système. L'inclusion de ces pertes conduirait bien sûr à des résultats différents, mais n'affectera pas les décisions nécessaires pour faire fonctionner le système de manière optimale

### III.5.2 Dimensionnement des composants du système

#### Modélisation de photovoltaïque

La littérature propose une variété de modèles avec des configurations variées en fonction des besoins d'utilisation. La caractéristique  $I(V)$  du générateur PV est basée sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par le circuit équivalent bien connu de Figure III.4. Ce circuit introduit une source de courant et une diode en parallèle, ainsi que des résistances séries  $R_S$  et parallèle (shunt)  $R_p$  pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule.

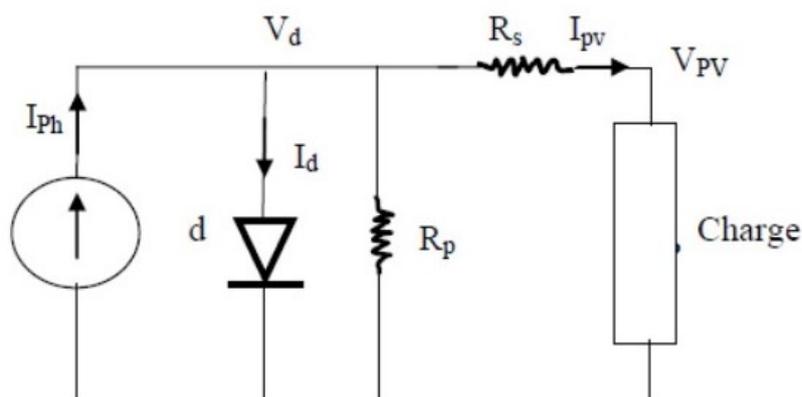


Figure III.4: Schéma équivalent électrique de la cellule PV[2]

Selon le schéma de la figure on peut écrire :

Kirchhoff :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (III.35)$$

où :

$I_{ph}$  : le courant de photocourant généré par l'irradiance solaire,

$I_D$  : le courant de diode,

$I_{sh}$  : le courant de shunt.

Dans notre étude nous avons utilisée des panneaux de 400 Wc ?

**Modélisation sous l'environnement Matlab/ Simulink** Le modèle permet de comprendre le fonctionnement du module photovoltaïque sous diverses valeurs d'irradiation  $G$ . La variation de la caractéristique  $I - V$  selon l'éclairement est illustrée dans la figure III.6 Un suiveur de point de puissance maximale (MPPT) est utilisé pour maximiser cette production en ajustant le courant et la tension du champ photovoltaïque pour maintenir le panneau solaire à son niveau optimal. Grâce à cette régulation, on peut atteindre un maximum de rendement énergétique.

- **Résultat de simulation avec température fixé T=25 °C et différents éclairagements**

Afin d'analyser les performances du module, nous avons modifié l'intensité de l'éclairage en utilisant une température fixe (T=25°C). Selon la figure III.5 On observe une variation proportionnelle du courant en fonction de l'éclairement, tout comme la tension, mais de manière moins sensible.

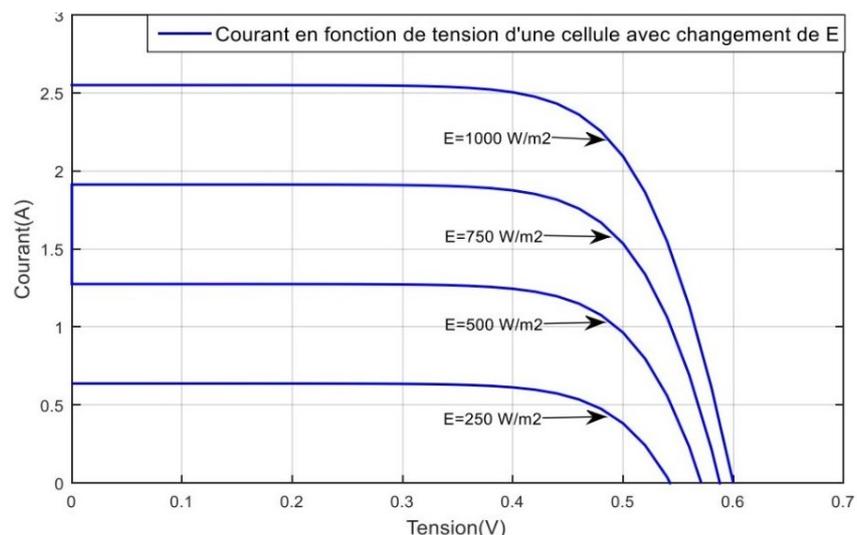


Figure III.5: Courbe I-V pour différentes de l'éclairement à température constante

- **Résultat de simulation avec un éclairement fixé  $E=1000 \text{ W/m}^2$  et différentes températures**

D'après les données de simulation, il a été constaté que la fluctuation de la température a un impact sur la tension et le courant. Par exemple, le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) augmente légèrement avec l'augmentation de la température, tandis que la tension du circuit ouvert ( $V_{co}$ ) diminue avec l'augmentation de la température, comme illustré dans la figure ci-dessous :

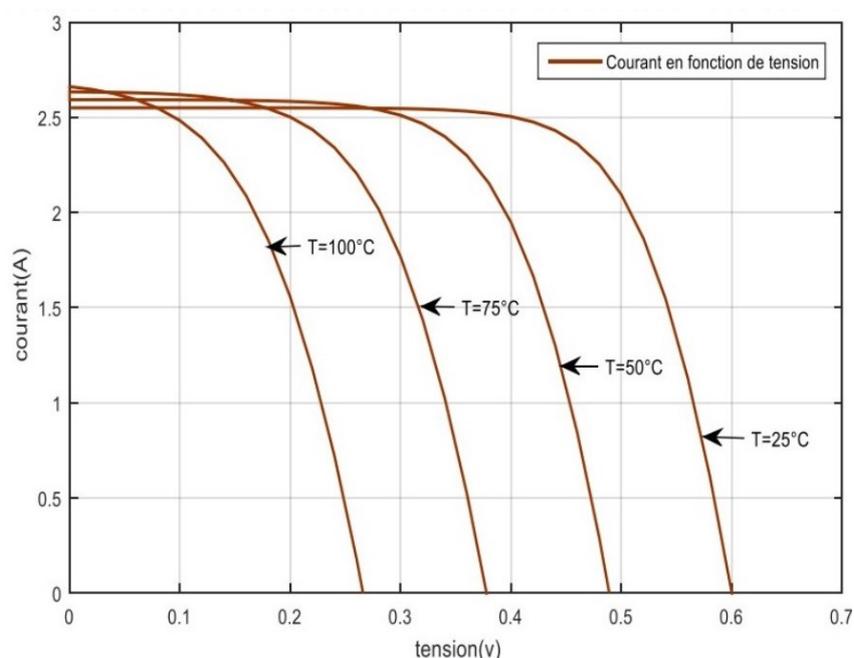


Figure III.6: Courbe I-V pour différentes températures, et  $E=1000 \text{ W/m}^2$

### Modélisation d'électrolyseur alcalin

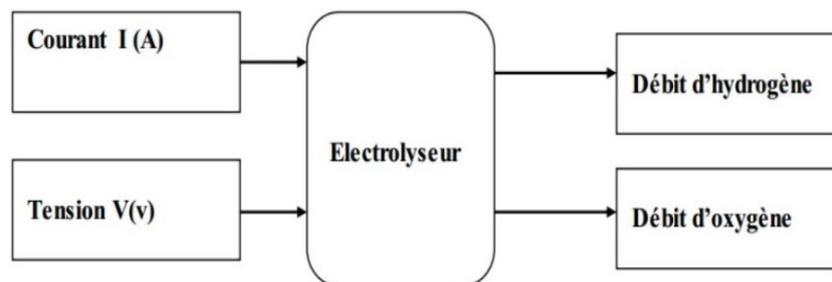


Figure III.7: Les entrées et sorties principales d'un électrolyseur

Les électrolyseurs commerciaux comportent plusieurs cellules alcalines. Ces cellules peuvent être placées de différentes manières (en série ou en parallèle) tant que la configuration interne (composants) [12], ne varie pas d'une cellule à l'autre. Les principales composantes sont :

- Les électrodes: l'anode est composée généralement de nickel (Ni), de cobalt (Co) et d'acier (Fe). La cathode est généralement composée de nickel (Ni) avec du charbon de platine activé comme catalyseur (C-Pt).
- L'électrolyte: une solution alcaline utilise normalement de l'hydroxyde de potassium (KOH) avec une concentration surpoids entre 25 et 35 w.
- La membrane: l'oxyde de nickel (NiO) et le Zirfon sont généralement utilisés comme membranes. Les premiers électrolyseurs alcalins qui ont été fabriqués utilisaient des tissus d'amiante comme séparateur

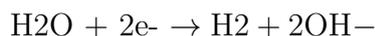
### Principes de Base

Un électrolyseur alcalin typique comporte deux électrodes immergées dans une solution d'électrolyte alcalin (KOH ou NaOH). Les réactions à l'anode et à la cathode sont les suivantes :

- Anode (oxydation)



- Cathode (réduction)



### Modèle Electrochimique

La cellule possède un potentiel théorique d'électrolyse de l'eau d'environ 1,23 V à une température de 25°C. Toutefois, en raison des tensions excessives (over potentials) et des résistances internes, le potentiel réel est plus important. Le réel potentiel  $V$  peut être représenté par :

$$V = E_{\text{rev}} + \eta_a + \eta_c + IR \quad (\text{III.36})$$

où :

$E_{\text{rev}}$  : est le potentiel réversible (1.23 V à 25°C),

$\eta_a$  : est la surtension anodique,

$\eta_c$  : est la surtension cathodique,

$I$  : est le courant de la cellule,

$R$  : est la résistance ohmique de la cellule.

### Résistance Ohmique

La résistance ohmique  $R$  comprend la résistance de l'électrolyte et les résistances de contact et peut être calculée comme :

$$R = R_{\text{electrolyte}} + R_{\text{contacts}} \quad (\text{III.37})$$

où  $t$  est le temps de fonctionnement.

### Efficacité Faradique

L'efficacité faradique  $\eta_F$  est un facteur qui tient compte des pertes de courant par réactions secondaires :

$$\eta_F = \frac{\text{Quantité d'hydrogène produite théorique}}{\text{Quantité d'hydrogène produite réelle}} \quad (\text{III.38})$$

### Implémentation dans Matlab/Simulink

### Modélisation des batteries

Un bloc de fonction générique est utilisé pour représenter la batterie dans Simulink, à partir de la boîte à outils SimPowerSystems. Les paramètres liés au type de batterie sont utilisés pour modéliser les caractéristiques de charge-décharge.

Dans ce modèle, on considère que le bloc fonctionnel de la batterie est en parfait état de fonctionnement et, par conséquent, on suppose que les pertes liées à la température ambiante et à la résistance interne sont minimales.

### Modélisation de la charge et la décharge de la batterie

Lorsque la production d'énergie totale en une heure ( $t$ ) dépasse la demande, la batterie est en charge. On peut voir l'état de charge de la batterie à travers [19]

$$SOC_B(t) = SOC_B(t_1)(\cdot\sigma) - (P_{conv}(t) - P_{pv}(t) \cdot \eta_{BD}) \quad (III.39)$$

$\eta_{BD}$  correspond au rendement de décharge de la batterie.

En outre, les horaires de charge et de décharge de la batterie restent toujours entre les limites maximale et minimale de la batterie [19].

$$SOC_{Bmin}(t) \leq SOC_B(t) \leq SOC_{Bmax}(t) \quad (III.40)$$

où :  $SOC_{Bmin}$  est l'état de charge minimal autorisé de la batterie, donné en fonction de la capacité nominale de la batterie  $SOC_{Bnominal}$ .

$$SOC_{Bmin} = DOD \times SOC_{Bnominal} \quad (III.41)$$

### Modélisation de pile à combustible

Plusieurs éléments d'un système PAC peuvent avoir une influence considérable sur ses performances et son efficacité. Dans cette perspective, il a été décidé de prendre en compte le fonctionnement et les performances des principaux acteurs du système. On examinera donc la pompe de recirculation d'hydrogène, le compresseur d'air, l'humidificateur et le convertisseur DC/DC.

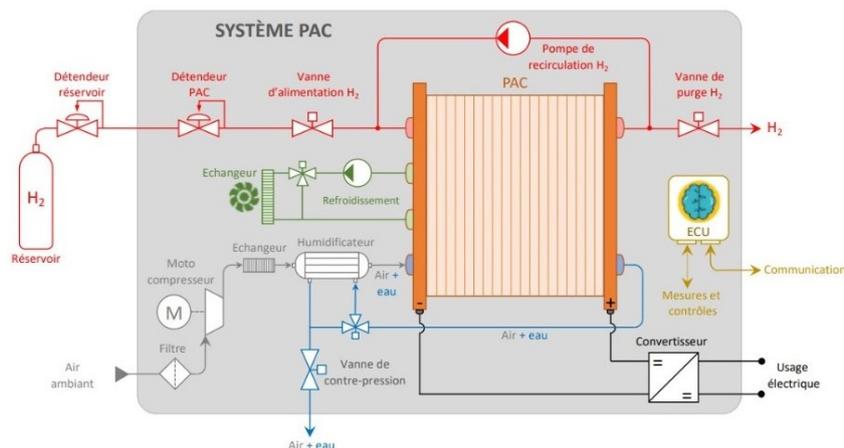


Figure III.8: Schématisation d'un système PAC.

On peut distinguer plusieurs domaines du comportement physique du PAC. On peut définir cette modélisation comme une multiphysique qui reflète la combinaison des phénomènes électrochimique, fluide et électrique. Le phénomène d'oxydoréduction du PAC est modélisé par la partie électrochimique, tandis que la partie fluide concerne la prise en compte de l'alimentation en gaz et de la production d'eau. Enfin, la partie électrique concerne le comportement du PAC en tant que source de tension et d'impédance.

### Partie électrochimique

Le calcul d'un potentiel thermodynamique  $E_0$  est central dans la partie électrochimique, qui est approximative par une fonction empirique de la température.

$$E_0 = \alpha + \beta \cdot T_{pac} + \gamma \cdot T_{pac}^2 + \sigma \cdot T_{pac}^3 + v \cdot T_{pac} \cdot \ln T_{pac} \quad (III.42)$$

Par la suite, une variation de potentiel  $\Delta E$  modifie le potentiel initial, ce qui entraîne le potentiel de Nernst  $E_0$ .

$$E_n = E_0 + \Delta E \quad (III.43)$$

La chute de tension  $\Delta V$  (pertes d'activation, de concentration et pertes ohmiques) est calculée, tout comme pour le potentiel de Nernst.

### Partie fluide

Le circuit de gaz entre le réservoir d'hydrogène, la source d'air et les sites de réaction est connu sous le nom de partie fluide. On utilise cette section du modèle afin de déterminer la pression, utilisée en partie dans la section électrochimique. Deux circuits fluidiques sont disponibles : un pour l'hydrogène et un pour l'oxygène. En ce qui concerne

le circuit d'air qui fournit de l'oxygène à la PAC, on utilise un compresseur d'air. Le compresseur d'air sera ajusté en fonction des exigences. Pour le modéliser, il est tout d'abord essentiel de déterminer le débit massique d'air (7) requis pour assurer le bon fonctionnement d'une PAC.

### Partie électrique

Le phénomène de répartition des charges sur les électrodes en double couche est modélisé par la partie électrique. En prenant en considération ce phénomène, les potentiels électriques de la PAC sont fixés. Un circuit  $R_t C_{dl}$  du premier ordre est utilisé pour représenter cet effet de double couche, avec  $R_t$  représentant la résistance de transfert de charge et  $C_{dl}$  représentant la capacité de double couche équivalente. On obtient la tension totale de la PAC en fonction du nombre de cellules  $N$ . On effectue ces opérations dans un couplage monophysique.

### Volume du réservoir de stockage

Le réservoir utilisé dans l'étude est un réservoir de  $10 \text{ m}^3$ , il peut stocker environ  $50 \text{ kg}$  d'hydrogène à  $700 \text{ bars}$ . Couplé à un électrolyseur, l'hydrogène généré peut être directement stocké sans compression.

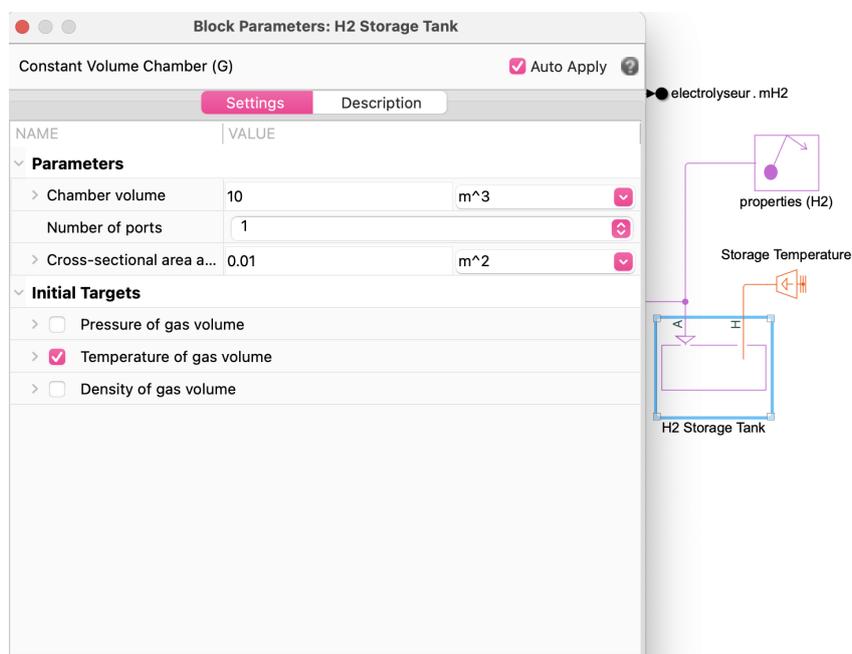


Figure III.9: Capacité de stockage du réservoir

### III.6 Résultats de simulation

Le système étudié est composé de 24 panneaux photovoltaïque de 400 Wc, d'un électrolyseur de puissance supérieure à 3,54 kw. un réservoir de stockage d'hydrogène de 10 m<sup>3</sup>

Deux différents scénarios de simulation sont effectués afin d'évaluer le comportement du système (production et stockage d'hydrogène) durant une journée type ; le 15 décembre et le 29 juin qui représentent respectivement le solstice d'hiver, et le solstice d'été. Les différentes parties du système (panneau photovoltaïque, électrolyseur) sont modélisées par des blocs séparés puis reliés entre eux d'une manière cohérente.

#### 1 er scénario (solstice d'hiver)

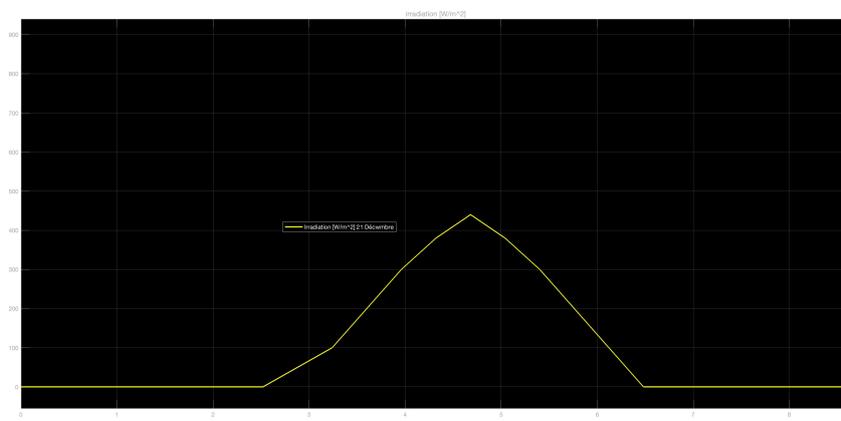


Figure III.10: les irradiations du solstice d'hiver.

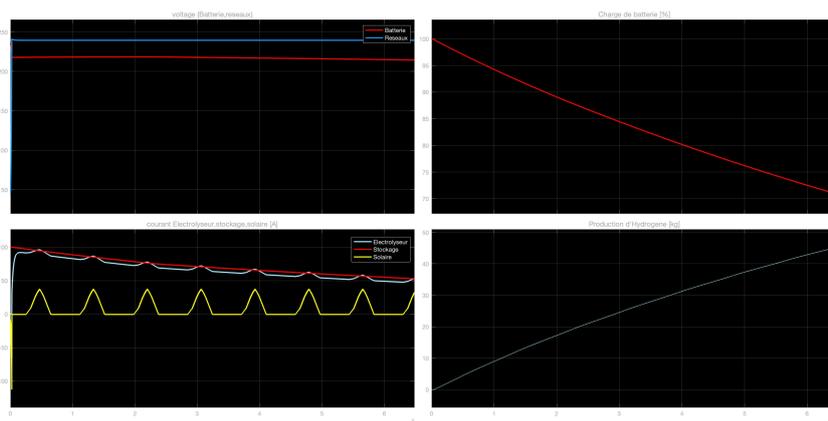


Figure III.11: Voltage (Batterie,Réseau) Charge Batterie (Courant [electrolyseur,Stockage , Solaire ](A) Production d'hydrogène(kg)

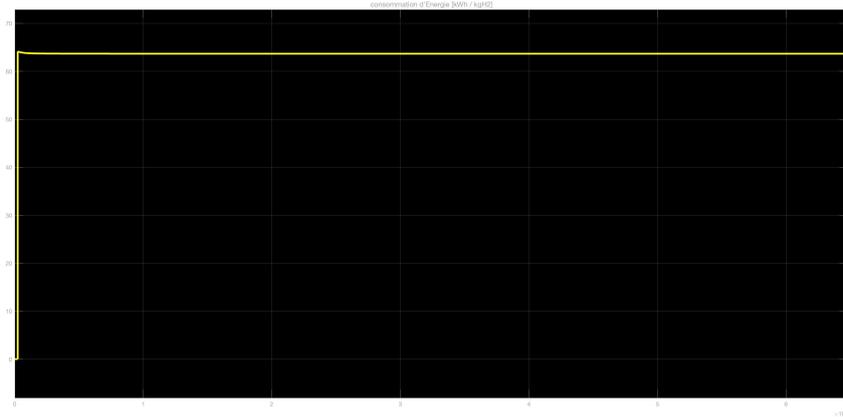


Figure III.12: La consommation électrique du système (production et stockage d'hydrogène) .

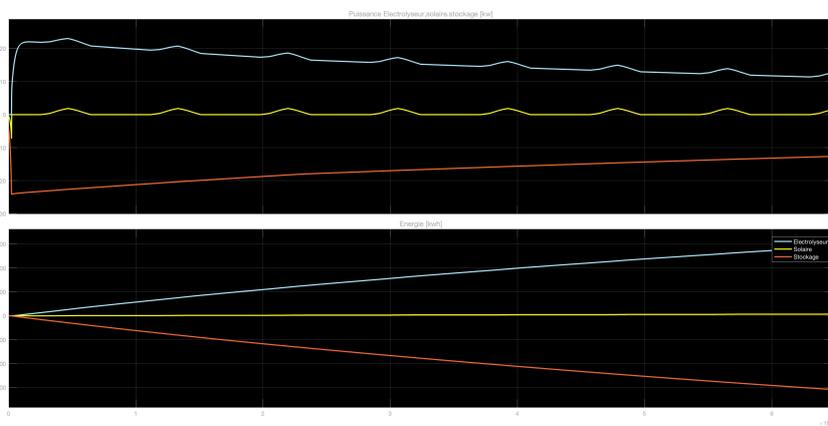


Figure III.13: Puissance électrolyseur,solaire,stockage(kw)..

### 2ème scénario (solstice d'été)



Figure III.14: Les irradiances du solstice d'été

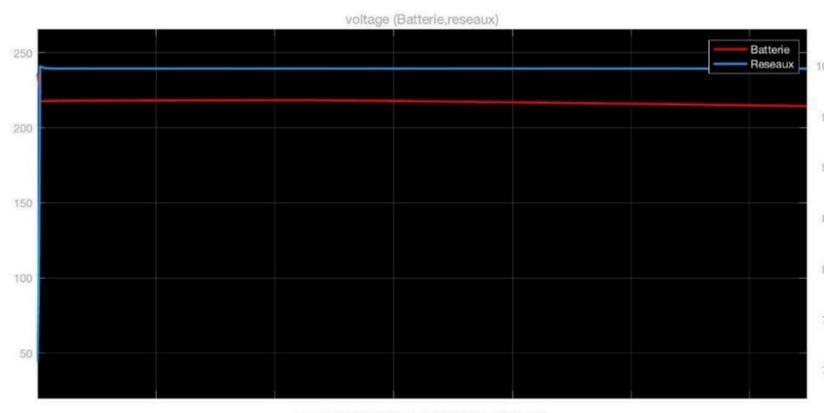


Figure III.15: La tension de batterie

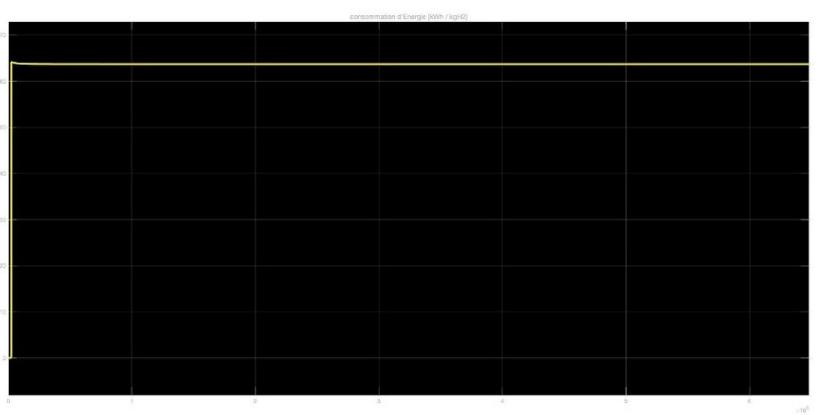


Figure III.16: consommation électrique du système (production et stockage d'hydrogène)

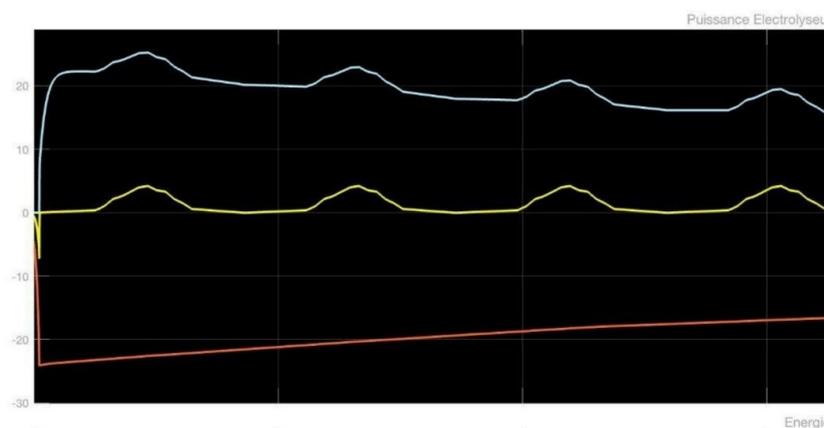


Figure III.17: Puissance de( l'électrolyseur, PV, batterie)

### III.7 Analyse des résultats

Afin de suivre la réponse des différents composants constituant le système, nous diviseront l'analyse en trois périodes de temps selon le scénario étudié.

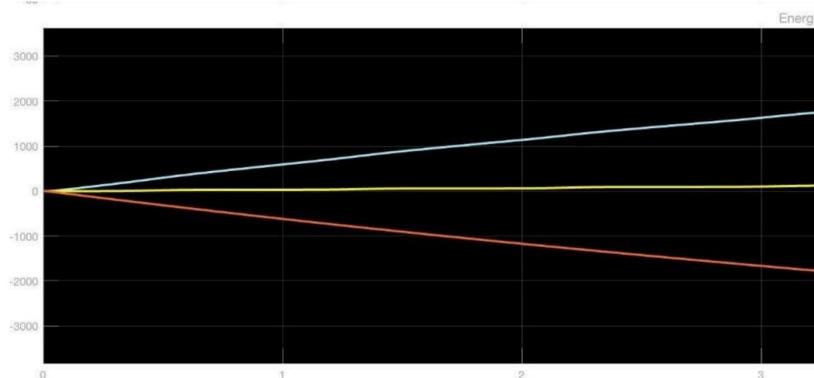


Figure III.18: Puissance de( l'électrolyseur, PV, batterie)

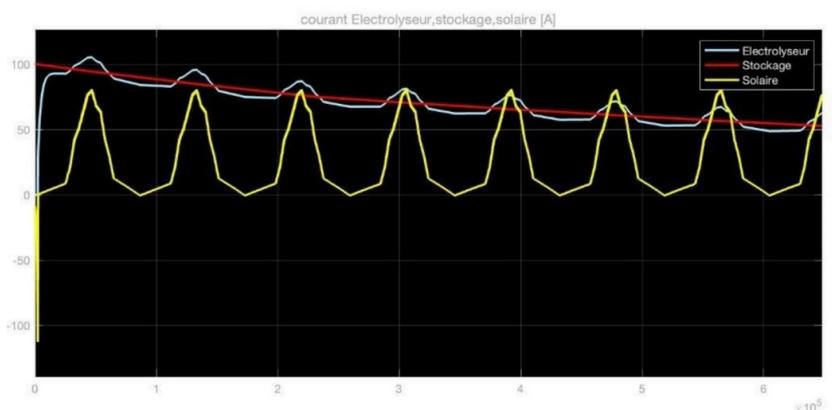


Figure III.19: le courant (d'électrolyseur, de batterie, de PV)

### III.7.1 1 er scénario (solstice d'hiver)

le 15 décembre représente le jour le moins éclairé , l'analyse se fera en commençant de 00h à 6h, après de 6 h à 13h15min, ensuite de 13h15min à 21h et enfin de 21h à minuit .

- **Le fonctionnement du système pendant l'intervalle [00h, 8h]**

Durant cette période, le générateur photovoltaïque (GPV) ne produit aucune puissance, comme le montre la figure III.3. L'absence de rayonnement solaire explique que le GPV ne peut pas satisfaire la demande de puissance de charge, qui s'élève à 3,54 kW. Il est nécessaire d'intervenir du réseau pour répondre aux besoins en énergie de l'utilisateur en raison de cette incapacité du GPV à répondre à la demande de puissance. Cependant, la présence de génération d'électricité implique que l'électrolyseur est en fonction, comme le montre la figure III.13. Cela signifie que de l'hydrogène est formé, comme illustré dans la figure III.11 . Cette production d'hydrogène est possible grâce à l'énergie électrique générée par le système, qui est utilisée pour séparer l'eau en hydrogène et oxygène.

- **Fonctionnement du système pendant l'intervalle [8h, 17h]**

À partir de 08h00, une augmentation du rayonnement solaire entraîne une augmentation de la puissance produite par le générateur photovoltaïque (GPV), qui atteint 3,5 kW. Cette puissance est suffisante pour satisfaire la demande de charge, comme le montre la figure III.3 . L'électrolyseur commence à fonctionner, et le réseau est mis en position d'arrêt. L'excès de puissance produite par le GPV est consommé par l'électrolyseur, et la stratégie de contrôle consiste à calculer le courant résultant de cet excès. La quantité d'hydrogène formée est proportionnellement au courant de l'électrolyseur, comme le montre la figure III.11.

La figure III.12 montre également que la pression du réservoir d'hydrogène augmente avec la quantité d'hydrogène produite à la fin de la première phase de fonctionnement du système. La puissance produite par le GPV atteint son maximum à 13h15min, lorsque le rayonnement solaire atteint son pic. Puis, elle commence à diminuer. Lorsque la puissance produite par le GPV est supérieure à la demande de charge, le système évolue dans le même sens (GPV-électrolyseur) jusqu'à ce que le GPV soit incapable de couvrir la demande de charge.

- **Le fonctionnement du système pendant l'intervalle [17h, 00h]**

À partir de 17 h 00, le GPV est incapable de répondre à la demande de la charge, alors il est nécessaire l'intervention de réseau pour fournir le manque de puissance. Le même fonctionnement décrit dans le premier intervalle est valable pendant cette période sauf qu'il y a une diminution de la puissance délivrée par le GPV en raison de la diminution du rayonnement solaire. Jusqu'à 19 h 00, le GPV alimente la charge avec une petite puissance inférieure à celle demandée. La figure III.12 montre que la pression du réservoir d'hydrogène diminue avec la quantité d'hydrogène consommée par la pile à combustible lors de la deuxième phase de fonctionnement du système. Lorsque la puissance produite par le générateur photovoltaïque (GPV) n'est plus suffisante pour satisfaire la demande de charge, la pile à combustible entre en fonction. Elle utilise l'hydrogène stocké dans le réservoir pour générer l'électricité nécessaire, ce qui se traduit par une baisse de la pression dans le réservoir. En fin de journée, lorsque le système cesse de fonctionner, la pression résiduelle dans le réservoir sera considérée comme la pression initiale de démarrage pour le lendemain. Cette pression servira de point de départ pour la prochaine phase de production et de stockage d'hydrogène.

### III.7.2 2 ème scénario (solstice d'été)

D'après le deuxième scénario, qui correspond au fonctionnement du système de production et de stockage d'hydrogène le 29 juin, qui est la journée la plus éclairée de l'année, l'analyse sera effectuée de 0h à 7h, puis de 7h à 18h et enfin de 18h à minuit.

- **Le fonctionnement du système pendant l'intervalle [00h, 7h]**

La puissance délivrée par le générateur photovoltaïque (GPV) est pratiquement nulle pendant cette période (figure III.2) car elle dépend du rayonnement solaire, qui est également nulle, comme le montre les figures III.17 et III.18. En conséquence, le GPV est incapable de répondre à la demande de puissance de charge. Il est nécessaire d'intervenir du réseau pour répondre aux besoins en énergie de l'utilisateur en raison de cette incapacité du GPV à répondre à la demande de puissance. A partir de 05h du matin, une faible luminosité commence à apparaître provoquant l'apparition d'un courant aux bornes du GPV impliquant une génération d'énergie. Tant que la puissance du GPV n'est pas encore suffisante pour répondre à la demande de charge.

- **Le fonctionnement du système pendant l'intervalle [07h, 18h]**

À partir de 07h00, le fonctionnement du système change de manière significative. La puissance fournie par le générateur photovoltaïque (GPV) commence à augmenter avec le lever du soleil. La figure III.16 montre que la pression du réservoir d'hydrogène augmente progressivement au fur et à mesure de la production d'hydrogène par l'électrolyseur.

- **Le fonctionnement du système pendant l'intervalle [18h, 00h]**

À partir de 18 h 00, le GPV ne peut pas répondre à la demande de la charge . Cette situation nécessite l'intervention du réseau pour fournir le manque de puissance. Le fonctionnement décrit pour le premier intervalle reste applicable pendant cette période, à la différence près qu'il y a une diminution de la puissance fournie par le GPV en raison de la baisse du rayonnement solaire. Jusqu'à 20 h 00, le GPV continue d'alimenter la charge avec une puissance inférieure à celle demandée, et le réseau continue son rôle complémentaire de GPV. A partir de 20h, ce dernier devient incapable de fonctionner en raison de la disparition du rayonnement solaire .

### III.8 Conclusion

La puissance disponible du générateur photovoltaïque (GPV) dépend fortement des conditions environnementales, telles que l'intensité du rayonnement solaire, la durée d'ensoleillement et les variations climatiques saisonnières. Pour pallier les insuffisances du système photovoltaïque lors des périodes de faible ensoleillement, le GPV a été intégré à un électrolyseur et à un système de stockage d'hydrogène, formant ainsi un système hybride capable de produire et de stocker de l'hydrogène. Dans ce chapitre, des études de simulation de ce système hybride ont été réalisées à l'aide de Matlab/Simulink pour évaluer ses performances dans divers scénarios en utilisant un profil de charge réaliste. Les simulations ont été conduites pour des journées typiques des saisons d'été et d'hiver afin de tester la robustesse du système sous différentes conditions environnementales.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

---

L'étude menée dans ce mémoire avait pour objectif principal de dimensionner un système de production d'hydrogène destiné à alimenter un véhicule électrique à pile à combustible. À travers les différentes phases de cette recherche, nous avons pu identifier les éléments clés nécessaires à la conception et à l'optimisation d'un tel système, en tenant compte des contraintes techniques, économiques et environnementales.

Nous avons tout d'abord étudié les véhicules à pile à combustible. Ensuite, nous avons procédé au dimensionnement de notre système. Enfin, nous avons simulé et discuté les résultats obtenus.

En conclusion, ce travail a mis en évidence le potentiel significatif des systèmes de production d'hydrogène pour alimenter des véhicules électriques à pile à combustible. La transition vers un transport propre et durable est à portée de main, à condition de continuer à investir dans la recherche et le développement, et de promouvoir des politiques favorables à l'innovation dans le secteur de l'hydrogène.

### Bibliographie

- [1] Plkr website. <http://www.plkr.org>. Accessed: 2024-06-12.
- [2] Schéma de principe de l'installation de production d'hydrogène par voie solaire. [https://www.researchgate.net/figure/Schema-de-principe-de-linstallation-de-production-dhydrogene-par-voie-solaire\\_fig7\\_235217575](https://www.researchgate.net/figure/Schema-de-principe-de-linstallation-de-production-dhydrogene-par-voie-solaire_fig7_235217575), 2024. Consulté le: 19 juin 2024.
- [3] Akram Alhussein. *Transport et stockage des dérivés pétroliers: problématique d'endommagement des pipes par érosion de sable et par hydrogène*. PhD thesis, Université Paul Verlaine-Metz, 2010.
- [4] Arlons Sciences. L'histoire et les utilisations de l'hydrogène, année.
- [5] Auteur(s). *Développement des véhicules électriques à pile à combustible (VEPC) et infrastructure d'hydrogène*. Organisation Internationale de l'Énergie, 2023.
- [6] Beev. *La voiture électrique pour les Nuls*. Publisher Name, 2020.
- [7] Salah Eddine Bouzerd. Technologie, développement socio-Économique et Énergies en algérie. PDF, année. Document PDF disponible sur demande.
- [8] Sébastien Chevalier. Chapitre ii une bouffée d'hydrogène? *Transition énergétique bas-carbone: Obstacles et enjeux*, page 29, 2022.
- [9] CultureSciences Physique. Culturesciences physique, année.
- [10] Khadidja DAHHANE, Zahia KHDIM, Hamza LAKSACI, et al. *Etude des propriétés photocatalytique d'un oxyde métallique. Application dans la production d'hydrogène*. PhD thesis, UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR, 2022.
- [11] Christophe Darras. *Modélisation de systèmes hybrides photovoltaïque/hydrogène: applications site isolé, micro-réseau et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE (ANR PAN-H)*. PhD thesis, Université Pascal Paoli, 2010.
- [12] S. Dutta. Technology assessment of advanced electrolytic hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 15(6):379–386, 1990.

- [13] Encyclopédie de l'Énergie. Encyclopédie de l'Énergie.
- [14] Enectiva. Comparaison de différents types d'électrolyseurs pour la production d'hydrogène. <https://www.enectiva.cz/fr/blog/2023/08/comparaison-de-diffrents-types-d%C3%A9lectrolyseurs-pour-la-production-dhydrog%C3%A8ne/>, août 2023. Consulté le 13 juin 2024.
- [15] C Lamy and J-M Léger. Les piles à combustible: application au véhicule électrique. *Le Journal de Physique IV*, 4(C1):C1–253, 1994.
- [16] Dany Lapostolle. Analyser les trajectoires territoriales de transition énergétique. les territoires hydrogène en france. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, (Hors-série 34), 2021.
- [17] Author's Name. Principe de fonctionnement d'une pile à combustible hydrogène-oxygène. ResearchGate, Year of Publication. Accessed: Date of Access.
- [18] Eugène Papirer, Jean-Baptiste Donnet, and Jean Heinkele. Mise en évidence de quatre types d'hydrogène réactif se trouvant a la périphérie des structures aromatiques polycondensées des noirs de carbone-relation entre la teneur en type le plus réactif et le pouvoir renforçant des noirs du caoutchouc styrène-butadiène. *Journal de Chimie Physique*, 68:581–587, 1971.
- [19] Samer Rabih. *Contribution à la modélisation de systèmes réversibles de types électrolyseur et pile à hydrogène en vue de leur couplage aux générateurs photovoltaïques*. PhD thesis, 2008.
- [20] SOUAL Sara, BRISSAUD-DELORD Florent, and GAULT Kévin. Étude de la fiabilité, de la durabilité et de la sécurité des électrolyseurs alcalins et à membrane échangeuse de protons. 2022.

## BIBLIOGRAPHIE

---

width=!,height=!,pages=-