

**Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf - Mila**  
**Institut des Sciences et de Technologie**  
**Département de Génie Mécanique et Electromécanique**



No Ref :.....

**Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du diplôme de**  
**MASTER**  
**Spécialité : Génie Mécanique**  
**Option : Energétique**  
**THEME**

**Etude de la production d'hydrogène par le procédé**  
**d'électrolyse de l'eau alcaline**

**Réalisé par :**

- Bougada Islam
- Letrache Salah Eddine
- Dib Yaaqoub
- Derradji Ali
- Bouffelgha Youssouf
- Bakiri Bilel

**Soutenu devant le jury :**

**M. O. Azizi**  
**A. Derdouri**  
**Dj. Debbah**  
**Drouna**

**MCA**  
**MCB**  
**MAA**  
**MCA**

**Président**  
**Examineur**  
**Rapporteur**  
**Incubateur**

**Année universitaire : 2023/2024**

# Remerciements

*À la fin de ce travail, nous avons l'honneur d'exprimer nos sincères remerciements pour grands et respectueux encadrant, Mr Debbah Djoubeir et Mr Hakim Talbi Pour leur soutien, leurs conseils et leur aide inestimables.*

*Les membres du jury qui ont accepté de lire et d'évaluer notre travail.*

*Nous tenons également à remercier tous les Enseignants du Département de génie mécanique du Centre universitaire Abdelhafid Boussouf-Mila, qui ont contribué à la réussite de cette formidable année universitaire.*

*Finalement, nous adressons nos sincères remerciements à toute notre famille et nos amis qui nous ont toujours soutenus et encouragés durant la réalisation de ce projet, aux personnes qui bien que leurs noms n'apparaissent pas dans ce document, ont toujours été prêtes à aider et à contribuer au bon déroulement de ces travaux.*

## *Dédicaces*

*Nous dédions cette modeste travail à :*

*À nos parents, que dieu leur procure bonne santé et longue vie*

*À nos frères et sœurs, à toute notre famille et nos amis, et à tous ceux  
qui ont contribué à rendre ce projet possible, nous disons merci.*

*Ali, Islam, Yaaqoub, Salah, Bilal, Youssouf*

## Sommaire

|                              |    |
|------------------------------|----|
| Liste des figures : .....    | v  |
| Liste des tableaux : .....   | ix |
| Nomenclature : .....         | x  |
| Résumé : .....               | xi |
| Abstract: .....              | xi |
| ملخص: .....                  | xi |
| Introduction général : ..... | 1  |

### Chapitre I : Etude bibliographique sur l'hydrogène

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| I.1. Introduction : .....                              | 3  |
| I.2. Recherche bibliographique sur l'Hydrogène : ..... | 3  |
| I.3. Conclusion : .....                                | 15 |

### Chapitre II : théorie sur les procédés de production d'hydrogène

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| II. 1 Introduction : .....                                               | 16 |
| II. 2 Caractéristique de l'hydrogène : .....                             | 17 |
| II. 2.1. Propriétés physiques : .....                                    | 17 |
| II. 2.2. Propriétés énergétiques : .....                                 | 18 |
| II.3. Production d'hydrogène : .....                                     | 19 |
| II.3.1. Production par les combustibles fossiles (hydrocarbures) : ..... | 19 |
| II.3.1.1. Le vapo-reformage de gaz naturel : .....                       | 19 |
| II. 3.1.2. Oxydation partielle : .....                                   | 20 |
| II.3.1.3. Reformage autotherme: .....                                    | 21 |
| II.3.1.4. Pyrolyse: .....                                                | 21 |
| II.3.2. Production à partir du charbon : .....                           | 22 |
| II.3.3. Production à partir du nucléaire : .....                         | 22 |
| II.3.4. Procédés biologiques : .....                                     | 22 |
| II.3.5. Production d'hydrogène par dissociation de l'eau : .....         | 23 |
| II.3.5.1. Décomposition thermochimique : .....                           | 23 |
| II.3.5.2. Procédés photo-électrochimiques : .....                        | 24 |
| II.3.5.3. Electrolyse de l'eau : .....                                   | 24 |
| II.3.5.4. Différents types d'électrolyseurs de l'eau : .....             | 26 |

|                                                     |           |
|-----------------------------------------------------|-----------|
| <b>II.4. Stockage de l'hydrogène :</b>              | <b>30</b> |
| <b>II.4.1. Stockage conventionnel</b>               | <b>31</b> |
| <b>II.4.2. stockage par adsorption :</b>            | <b>32</b> |
| <b>II.4.3. stockage par hydrure :</b>               | <b>32</b> |
| <b>II.5. Les applications d'hydrogène :</b>         | <b>33</b> |
| <b>II.5.1. Applications chimiques</b>               | <b>34</b> |
| <b>II.5.2. Utilisations énergétiques</b>            | <b>34</b> |
| <b>II.5.2.1. Piles à combustibles :</b>             | <b>34</b> |
| <b>II.5.2.2. Autres applications énergétiques :</b> | <b>35</b> |
| <b>II.6. Conclusion :</b>                           | <b>36</b> |

## **Chapitre III : Présentation du système panneau photovoltaïque**

|                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>III.1. Introduction :</b>                                    | <b>37</b> |
| <b>III.2. Modèle électriques d'une cellule photovoltaïque :</b> | <b>37</b> |
| <b>III.3. Le diode :</b>                                        | <b>39</b> |
| <b>III .3.1. Composition des diodes:</b>                        | <b>39</b> |
| <b>III .3.2. Symbole de diode:</b>                              | <b>39</b> |
| <b>III .3.3. Types de diodes dans le système solaire :</b>      | <b>40</b> |
| <b>III .3.3.1. Diodes de dérivation :</b>                       | <b>40</b> |
| <b>III .3.3.2. diodes de blocage :</b>                          | <b>40</b> |
| <b>III.4. Ensoleillement :</b>                                  | <b>42</b> |
| <b>III.4.1. L'ensoleillement de l'aube :</b>                    | <b>42</b> |
| <b>III.4.2. Insolation :</b>                                    | <b>43</b> |
| <b>III.4.3. L'insolation de la Terre :</b>                      | <b>43</b> |
| <b>III.5. Rayonnement solaire :</b>                             | <b>44</b> |
| <b>III.5.1. Caractéristiques du rayonnement solaire :</b>       | <b>44</b> |
| <b>III.5.1.1. Composition :</b>                                 | <b>44</b> |
| <b>III.5.1.2. Dualité de la lumière :</b>                       | <b>45</b> |
| <b>III.5.3. Types du rayonnement solaire :</b>                  | <b>46</b> |
| <b>III.6. Conversion photovoltaïque :</b>                       | <b>47</b> |
| <b>III.6.1. Semi-conducteur :</b>                               | <b>47</b> |
| <b>III.6.2. Le dopage de semi-conducteur :</b>                  | <b>47</b> |
| <b>a) Dopage de type N :</b>                                    | <b>48</b> |
| <b>b) Dopage de type P :</b>                                    | <b>48</b> |
| <b>III.6.3. La Jonction PN :</b>                                | <b>49</b> |
| <b>III.7. Cellule photovoltaïque :</b>                          | <b>49</b> |

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| III.7.1.Les types des cellules photovoltaïques : .....                                                                                            | 50 |
| a) Cellule en silicium monocristallin .....                                                                                                       | 50 |
| b) Cellule en poly-cristallin : .....                                                                                                             | 51 |
| c) Cellule amorphe : .....                                                                                                                        | 51 |
| III.8.Les différentes installations photovoltaïques : .....                                                                                       | 52 |
| III.8.1.Les installations sur site isolé: .....                                                                                                   | 52 |
| III.8.2.Les installations raccordée au réseau de distribution public : .....                                                                      | 53 |
| • Solution avec injection totale : .....                                                                                                          | 53 |
| • Solution avec injection de surplus : .....                                                                                                      | 54 |
| III.9.Bilan thermique du capteur solaire PV/ T : .....                                                                                            | 55 |
| III.9.1. Les coefficients de transfert de chaleur : .....                                                                                         | 57 |
| A. Calcul des coefficients de transfert de chaleur par conduction .....                                                                           | 57 |
| B. Calcul des coefficients de transfert de chaleur par convection .....                                                                           | 58 |
| C. Calcul des coefficients de transfert de chaleur par rayonnement .....                                                                          | 59 |
| D. Calcul des puissances absorbées par les matériaux .....                                                                                        | 59 |
| III.10.Conclusion : .....                                                                                                                         | 60 |
| <br><b>Chapitre IV : la simulation du système PV à l'aide du logiciel Fortran et du mouvement de la bulle d'hydrogène avec le logiciel COMSOL</b> |    |
| IV.1 Simulation du système PV : .....                                                                                                             | 61 |
| IV.2 Résolution numérique : .....                                                                                                                 | 61 |
| IV.3 Le programme : .....                                                                                                                         | 63 |
| IV.3.1 Les étapes du programme : .....                                                                                                            | 64 |
| IV.3.2 L'organigramme général pour le régime transitoire : .....                                                                                  | 65 |
| IV.4 Résultats : .....                                                                                                                            | 65 |
| IV.4.1 Variation temporelle des puissances solaires reçue et absorbées : .....                                                                    | 66 |
| IV.4.2 Variation temporelle des températures des différentes parties du capteur : .....                                                           | 67 |
| IV.4.3 Panneau photovoltaïque : .....                                                                                                             | 68 |
| IV.4.4 Effet de l'éclairement : .....                                                                                                             | 69 |
| IV.5 Simulation du mouvement de la bulle d'hydrogène avec le logiciel COMSOL : .....                                                              | 70 |
| IV.5.1 Introduction : .....                                                                                                                       | 70 |
| IV.5.2 Définition du cas : .....                                                                                                                  | 71 |
| IV.5.3 Conditions aux limites : .....                                                                                                             | 74 |
| IV.5.4.Géométrie et maillage : .....                                                                                                              | 74 |
| IV.6.Résultats : .....                                                                                                                            | 76 |

|                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| <b>Conclusion générale .....</b> | <b>78</b> |
| <b>Référence:.....</b>           | <b>79</b> |

## Liste des figures :

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure I.1:</b> caractéristiques de fonctionnement UI de la centrale solaire de 960(WP)[3].....                                                                                                                                                                                                                                                                            | 4  |
| <b>Figure I.2:</b> Caractéristiques de fonctionnement UI [3] .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 5  |
| <b>Figure I.3 :</b> Résultats expérimentaux du débit de H <sub>2</sub> avec la source de courant direct [4].....                                                                                                                                                                                                                                                              | 5  |
| <b>Figure I.4:</b> Efficacité Faradaic des deux matériaux d'électrode pendant sept jours [5].....                                                                                                                                                                                                                                                                             | 6  |
| <b>Figure I.5 :</b> Cellule d'électrolyse alcaline: a) 2 plaques en acrylique translucide, b) 4 plaques en néoprène joints, c) 2 feuilles d'acier inoxydable (anode et cathode) et d) membrane en fibre de polyester [7].....                                                                                                                                                 | 7  |
| <b>Figure I.6 :</b> distribution de la température pour la distance entre les électrodes de 3 mm : (a) anode et (b) cathode [7].....                                                                                                                                                                                                                                          | 8  |
| <b>Figure I.7 :</b> distribution de la température pour la distance entre les électrodes de 11 mm : (a) anode et (b) cathode [7] .....                                                                                                                                                                                                                                        | 8  |
| <b>Figure I.8 :</b> distribution de la température pour la distance entre les électrodes de 17 mm : (a) anode et (b) cathode [7] .....                                                                                                                                                                                                                                        | 9  |
| <b>Figure I.9:</b> Performance de la cellule d'électrolyse avant et après le test au brouillard salin (à 60°C et un débit de 1,4 L/min) : (a) courbe de polarisation ; (b) Efficacité Faraday [11]...                                                                                                                                                                         | 12 |
| <b>Figure I.10:</b> Résultats de l'expérience lors de l'essai de démonstration vent-hydrogène. (a) évolution du courant fourni à l'électrolyseur et température de fonctionnement et la pression. (b) évolution de la tension de cellule résultante et du HTO. Comparaison de tension de cellule enregistrée (symboles pleins) et calculée (symboles vides) et HTO [12] ..... | 13 |
| <b>Figure II.1 :</b> Pourcentage des sources d'énergie pour la production de l'hydrogène [19].....                                                                                                                                                                                                                                                                            | 17 |
| <b>Figure II.2 :</b> densité de masse d'énergie de quelques carburants. [20] .....                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 18 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure II.3:</b> Principe du vapo-reformage .....                                                                                                                                                                                                            | 20 |
| <b>Figure II.4 :</b> Schéma des différents systèmes électrochimiques pour la production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau [36].....                                                                                                                       | 27 |
| <b>Figure II.5 :</b> Schéma d'un électrolyseur alcalin: Compartiment anodique (1), compartiment cathodique (2), diaphragme (3), électrodes (4), cadre de la cellule (5), alimentation en courant continu (6), end-plates (7), séparateurs du gaz (8) [39] ..... | 28 |
| <b>Figure II.6 :</b> Schéma de principe de l'électrolyse PEM .....                                                                                                                                                                                              | 29 |
| <b>Figure II.7 :</b> Le principe d'électrolyse à haute température.....                                                                                                                                                                                         | 30 |
| <b>Figure III.1 :</b> Schéma équivalent électrique de la cellule PV à une diode .....                                                                                                                                                                           | 38 |
| <b>Figure III.2:</b> Les deux pôles de diode. [44] .....                                                                                                                                                                                                        | 39 |
| <b>Figure III.3 :</b> Symbole de diode. [45] .....                                                                                                                                                                                                              | 40 |
| <b>Figure III.4 :</b> Types de diodes dans le système solaire. [47] .....                                                                                                                                                                                       | 41 |
| <b>Figure III.5 :</b> L'ensoleillement de l'aube .....                                                                                                                                                                                                          | 42 |
| <b>Figure III.6 :</b> L'insolation de la Terre .....                                                                                                                                                                                                            | 43 |
| <b>Figure III.7 :</b> Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre .....                                                                                                                                                             | 45 |
| <b>Figure III.8 :</b> Différents composants du rayonnement .....                                                                                                                                                                                                | 47 |
| <b>Figure III.9 :</b> le semi-conducteur (silicium) .....                                                                                                                                                                                                       | 47 |
| <b>Figure III.10 :</b> dopage de semi-conducteur de type n. [51] .....                                                                                                                                                                                          | 49 |
| <b>Figure III.11 :</b> dopage de semi-conducteur de type p. [51] .....                                                                                                                                                                                          | 49 |
| <b>Figure III.12 :</b> La jonction p-n .....                                                                                                                                                                                                                    | 48 |
| <b>Figure III.13 :</b> cellules solaires .....                                                                                                                                                                                                                  | 48 |
| <b>Figure III.14 :</b> fabrication d'une cellule photovoltaïque .....                                                                                                                                                                                           | 50 |
| <b>Figure III.15 :</b> Cellule photovoltaïque monocristalline .....                                                                                                                                                                                             | 51 |
| <b>Figure III.16 :</b> Cellule photovoltaïque poly cristallin .....                                                                                                                                                                                             | 51 |

|                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure III.17 :</b> Cellule photovoltaïque amorphe .....                                                                                                                                | 52 |
| <b>Figure III.18:</b> Installation sur site isolé .....                                                                                                                                    | 52 |
| <b>Figure III.19:</b> Exemple des installations photovoltaïques .....                                                                                                                      | 53 |
| <b>Figure III.20:</b> l'injection d'énergie dans les réseaux .....                                                                                                                         | 54 |
| <b>Figure III.21:</b> Injection d'énergie .....                                                                                                                                            | 54 |
| <b>Figure III.22 :</b> Injection énergie supplément dans le réseau .....                                                                                                                   | 55 |
| <b>Figure III.23:</b> Position des nœuds dans le capteur solaire .....                                                                                                                     | 56 |
| <b>Figure IV.1:</b> Composants d'un capteur solaire .....                                                                                                                                  | 61 |
| <b>Figure IV.2 :</b> Variation temporelle de la température de panneaux photovoltaïque .....                                                                                               | 66 |
| <b>Figure IV.3 :</b> Variation temporelle des puissances solaires reçue et absorbées par la vitre et<br>l'absorbeur en cuivre .....                                                        | 67 |
| <b>Figure IV.4 :</b> Variation temporelle de la température des différentes parties du capteur solaire<br>.....                                                                            | 68 |
| <b>Figure IV.5 :</b> Module PV .....                                                                                                                                                       | 69 |
| <b>Figure IV.6 :</b> Caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire pour différents éclairements solaires<br>.....                                                                           | 70 |
| <b>Figure IV.7 :</b> Influence de l'éclairement sur la caractéristique P-V .....                                                                                                           | 70 |
| <b>Figure IV.8:</b> Vue schématique du cas simulé, montrant les caractéristiques et paramètres les<br>plus importants, les dimensions ne sont pas à l'échelle. ....                        | 72 |
| <b>Figure IV.9 :</b> Le diagramme de Grace offre différents régimes de forme de bulles ascendantes<br>en fonction des nombres de Reynolds, d'Eotvos et de Morton [Clift et al, 1978]. .... | 73 |
| <b>Figure IV.10 :</b> Aperçu des conditions aux limites utilisées et de leurs positions, les<br>dimensions ne sont pas à l'échelle .....                                                   | 74 |
| <b>Figure IV.11 :</b> La géométrie à étudier .....                                                                                                                                         | 75 |

|                                                                                      |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figure IV.12 : Maillage mobile .....</b>                                          | <b>75</b> |
| <b>Figure IV.13 : La progression de la bulle montante à différents moments .....</b> | <b>77</b> |

## Liste des tableaux :

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau II.1 :</b> propriété thermo physique de l'hydrogène. [20].....                                              | 17 |
| <b>Tableau II.2 :</b> polluants émis par les différents carburants. [20].....                                          | 19 |
| <b>Tableau II.1 :</b> Les avantages et les inconvénients des différentes technologies d'électrolyse de l'eau [37]..... | 27 |
| <b>Tableau II.3 :</b> les différents types de piles à combustibles. [41] .....                                         | 35 |
| <b>Tableau III.1:</b> Localisation des nœuds de température choisis pour la discrétisation du capteur solaire .....    | 56 |
| <b>Tableau IV.1 :</b> Dimensions de la maquette du capteur solaire PV/T hybride.....                                   | 64 |
| <b>Tableau IV.2 :</b> Caractéristiques techniques du module et de la cellule solaire fabriqués par Siemens SM55. ....  | 69 |

## Nomenclature

PIB: le produit intérieur brut  
PCFC ou SOFC: solid oxide fuel cell  
PEM: Proton exchange membrane  
SOE: Solid oxide electrolysis  
AEL: Alkaline electrolysis  
HTO: Hydrogen-to-oxygen  
PAC: pile à combustible  
SOEL: Solid oxide electrolysis  
AWE: Alkaline water electrolysis  
PEMEL: proton-exchange membrane electrolysis  
HTO: Hydrogen-to-oxygen  
OTH: Oxygen-to-hydrogen  
A: l'anode  
K: la cathode  
AC courant continu en alternatif  
DC: Direct current  
PV: photovoltaïque  
I-V: the current–voltage  
P-N: positive-negative  
BOP: the parasitic power  
Eg: l'énergie du gap

## Résumé :

L'étude vise à exploiter le gaz hydrogène résultant de l'électrolyse de l'eau en utilisant un courant électrique obtenu à partir de panneaux solaires et stocké dans une batterie, comme carburant pour faire fonctionner un moteur de pompe à eau à usage agricole. Nous avons étudié la théorie de l'électrolyse de l'eau et du système de production d'énergie électrique à l'aide de panneaux solaires. Les équations de production d'énergie électrique utilisant des panneaux solaires ont été programmées dans le logiciel Fortran, et nous avons simulé le mouvement de la bulle d'hydrogène à l'intérieur de l'eau à l'aide du logiciel COMSOL. Les résultats obtenus dans cette étude ont été analysés et discutés, démontrant l'importance de s'appuyer sur des sources d'énergie renouvelables et propres en raison de leur respect de l'environnement et de leur coût inférieur par rapport aux sources d'énergie traditionnelles. L'étude montre également que l'utilisation efficace de l'hydrogène en tant qu'indicateur de transition énergétique permettra de trouver des solutions alternatives, notamment avec la diminution des réserves d'énergie pétrolière, à condition de bien maîtriser les technologies de production.

**Mot clé :** Electrolyse alcaline, Hydrogène, Photovoltaïque.

## Abstract:

The study aims to utilize the hydrogen gas produced by electrolysis of water using electric current obtained from solar panels and stored in a battery as a fuel for operating a water pump engine for agricultural use. We have conducted a theoretical study on water electrolysis and the system of generating electrical energy using solar panels. The equations for electrical energy production using solar panels were programmed in the FORTRAN software, and we simulated the movement of the hydrogen bubble inside the water using the COMSOL software. The results obtained in this study were analyzed and discussed, demonstrating the importance of relying on renewable and clean energy sources for their environmental friendliness and lower cost compared to traditional energy sources. The study also indicated that the effective use of hydrogen as an energy transition indicator will provide alternative solutions, especially with the decreasing reserves of petroleum energy, provided that the production technologies are well controlled.

**Keywords:** Alkaline electrolysis, Hydrogen, Photovoltaic.

## ملخص:

تهدف الدراسة إلى استغلال غاز الهيدروجين الناتج عن التحليل الكهربائي للماء باستخدام تيار كهربائي متحصل عليه من الألواح الشمسية وتخزينه في بطارية، كوقود لتشغيل محرك مضخة المياه للاستخدام الزراعي. قمنا بدراسة نظرية حول التحليل الكهربائي للماء ونظام توليد الطاقة الكهربائية باستخدام الألواح الشمسية. تم برمجة معادلات إنتاج الطاقة الكهربائية باستخدام الألواح الشمسية في برنامج فورتران، وقمنا بمحاكاة حركة فقاعة الهيدروجين داخل الماء باستخدام برنامج كومسول. تم تحليل ومناقشة النتائج التي تم الحصول عليها في هذه الدراسة، والتي أظهرت أهمية الاعتماد على مصادر الطاقة المتجددة والنظيفة نظرًا لاحترامها للبيئة وتكلفتها المنخفضة بالمقارنة مع مصادر الطاقة التقليدية. كما أظهرت الدراسة أن الاستخدام الفعال للهيدروجين كمؤشر للانتقال الطاقوي سيوفر حلولاً بديلة، خاصةً مع انخفاض احتياطات الطاقة البترولية، شريطة التحكم الجيد في تكنولوجيات الإنتاج.

**كلمات مفتاحية:** التحليل القلوي، الهيدروجين، الخلايا الضوئية

## **Introduction général :**

L'énergie est un moteur essentiel du développement économique et social, jouant un rôle crucial dans de nombreux aspects du bien-être humain, tels que l'accès à l'eau, la productivité agricole, les soins de santé, l'éducation, la création d'emplois et la durabilité environnementale. Cependant, avec l'augmentation de la demande mondiale d'énergie due au développement et à l'augmentation de la population, plus de 80 (%) de l'énergie produite provient de sources non renouvelables telles que le pétrole, le charbon, le gaz naturel et l'énergie nucléaire. Ces sources d'énergie fossile présentent deux inconvénients majeurs : elles sont non renouvelables et contribuent à environ 28 (%) des émissions mondiales de gaz à effet de serre, ce qui entraîne des changements climatiques et une pollution radioactive nucléaire.

L'hydrogène a des applications industrielles depuis longtemps, avec la première voiture à hydrogène inventée en 1807 et la synthèse industrielle de ce gaz débutant en 1888. Cependant, ce n'est qu'à partir des années 1970 que les technologies de production d'hydrogène vert ont commencé à être développées, mettant en lumière l'hydrogène vert en tant que source d'énergie propre et sans émissions.

Cette tendance est stimulée par trois facteurs importants. Premièrement, la disponibilité d'une énergie électrique propre à bas prix sans émissions. Deuxièmement, la prise de conscience croissante du changement climatique en tant que question inévitable. Troisièmement, l'utilisation de l'hydrogène dans des secteurs industriels tels que la fabrication d'engrais, les produits chimiques et le raffinage du pétrole, où l'hydrogène agit comme un vecteur d'énergie. Les produits chimiques à base d'hydrogène stockent trois fois plus d'énergie par unité de masse que l'essence conventionnelle, et lorsqu'ils brûlent, ils se combinent avec l'oxygène pour former de l'eau.

On estime que l'hydrogène vert pourrait répondre à environ 25 (%) des besoins énergétiques mondiaux d'ici 2050, avec des ventes annuelles de 770 milliards de dollars. Le Conseil mondial de l'énergie prévoit également que d'ici 2025, les stratégies nationales de l'hydrogène pourraient couvrir des pays représentant plus de 80 (%) du PIB mondial [1].

Face à la demande croissante en capacités de production d'hydrogène, de nombreux pays ont lancé des stratégies d'investissement dans le domaine. L'Algérie occupe un rôle majeur dans la production d'hydrogène et a des plans pour transporter cet hydrogène vert par

différents moyens, notamment l'utilisation de l'ammoniac vert et de gazoducs reliant l'Algérie à l'Italie. L'Algérie dispose d'un potentiel énergétique solaire considérable, avec une moyenne de 2000 kilowatts par mètre carré, qui représente une ressource importante à exploiter.

Le terme "hydrogène vert" est de plus en plus utilisé dans les discussions gouvernementales, surtout dans un contexte de fluctuations importantes sur le marché mondial de l'énergie, en particulier en raison de la guerre russo-ukrainienne. Les pays intensifient leurs efforts pour accéder au carburant du futur, ce qui soulève des questions sur la nature du carburant vert, les raisons de son adoption en tant qu'alternative aux combustibles fossiles et les domaines d'utilisation potentiels.

Dans cette étude qui s'inscrit dans le cadre des nouvelles idées pour les projets de fin d'études ainsi que pour la création d'une entreprise émergente (Start –up) et sa concrétisation sur le terrain, nos efforts se sont concentrés sur l'application de l'hydrogène vert, produit par l'électrolyse de l'eau alcaline grâce à un courant fourni par un panneau photovoltaïque, en tant que gaz combustible dans un moteur de pompe agricole présente plusieurs avantages. Tout d'abord, l'hydrogène vert est une source d'énergie propre, car sa combustion ne produit que de l'eau, évitant ainsi les émissions nocives de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques. En utilisant l'hydrogène comme carburant, le moteur de la pompe agricole peut fonctionner de manière plus écologique et durable, réduisant ainsi l'impact sur l'environnement. De plus, l'hydrogène offre une densité énergétique élevée, ce qui permet une utilisation efficace et une autonomie accrue pour les opérations agricoles. En utilisant cette application, les agriculteurs peuvent bénéficier d'une solution énergétique propre et renouvelable, contribuant ainsi à une agriculture plus durable et respectueuse de l'environnement.

Notre travail se répartit en quatre chapitres principaux :

Dans le premier chapitre nous faisons une étude bibliographique sur l'hydrogène. Dans le deuxième chapitre nous exposons une étude théorique sur les procédés de production d'hydrogène. Le troisième chapitre est consacré à la présentation du système panneau photovoltaïque. Le chapitre quatre se portera sur la simulation du système PV-Hydrogène à l'aide du logiciel fortran et l'interprétation des résultats obtenus. Enfin, nous clôturons notre travail par une conclusion générale.

# Chapitre I : Etude bibliographique sur l'hydrogène.

## I.1. Introduction :

L'hydrogène, l'élément chimique le plus simple, est composé d'un proton unique dans son noyau et d'un seul électron. La molécule de dihydrogène ( $H_2$ ) est formée de deux atomes d'hydrogène, et c'est cette forme couramment appelée "hydrogène". Bien que l'hydrogène soit abondant à la surface de la Terre, il n'existe pas à l'état pur, mais est toujours lié à d'autres éléments chimiques dans des molécules telles que l'eau et les hydrocarbures. Les organismes vivants, qu'ils soient animaux ou végétaux, sont également composés d'hydrogène, ce qui fait de la biomasse une autre source potentielle d'hydrogène.

L'extraction de l'hydrogène à partir de ces sources primaires telles que les hydrocarbures, la biomasse ou l'eau nécessite un apport d'énergie. Tout comme l'électricité, l'hydrogène est considéré comme un vecteur énergétique. L'hydrogène pourrait être pratiquement inépuisable, à condition de pouvoir le produire en quantité suffisante, à un coût compétitif et idéalement à partir d'énergies nucléaires et renouvelables.

L'ensemble des technologies étudiées pour produire, stocker et convertir l'hydrogène à des fins énergétiques est appelé technologie de l'hydrogène.

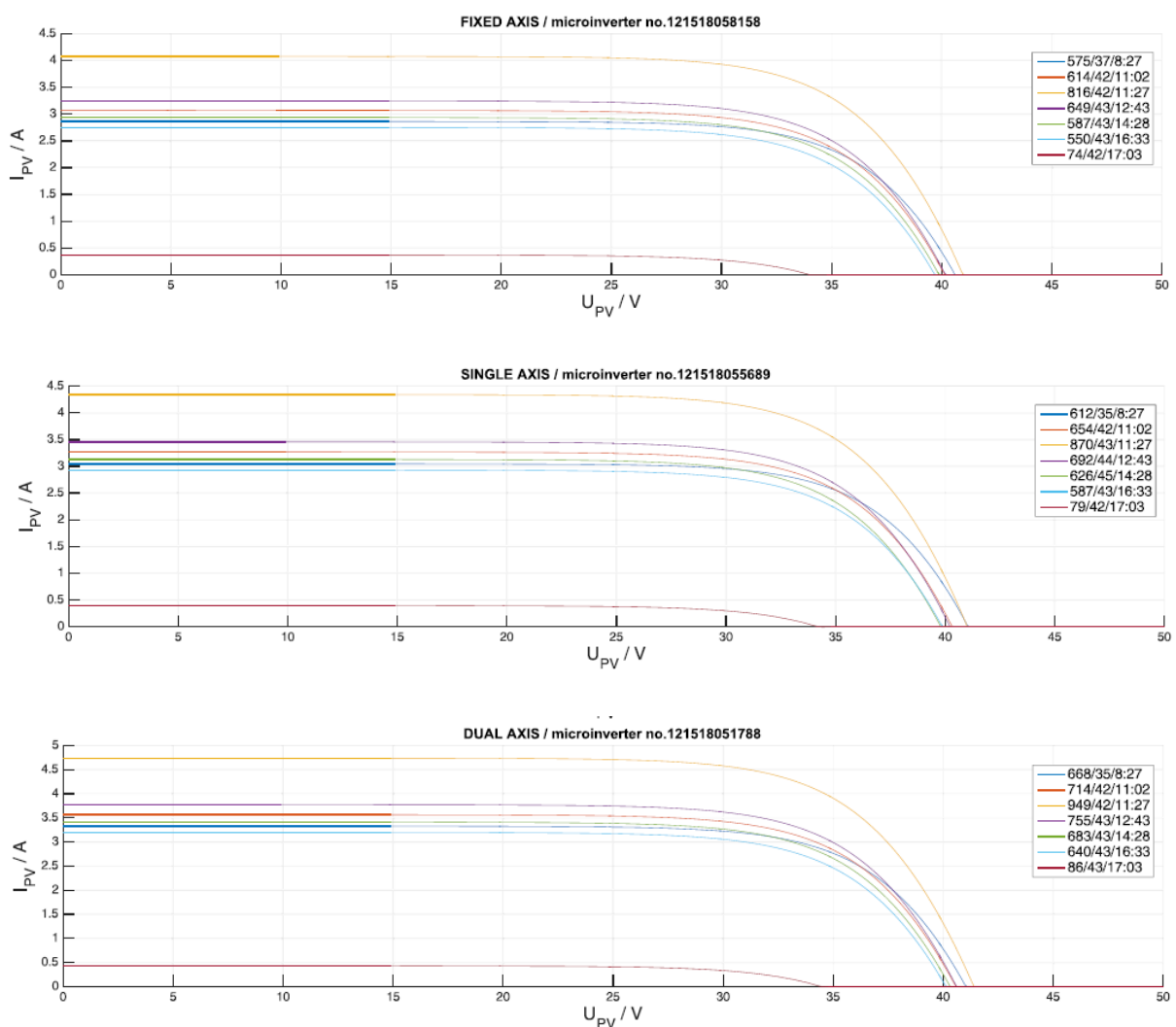
## I.2. Recherche bibliographique sur l'Hydrogène :

La demande d'énergie augmente en raison du développement mondial et de l'augmentation de la population. Environ 80 (%) de la demande énergétique provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon) [2] qui produisent des gaz à effet de serre, tels que le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) et le méthane ( $CH_4$ ), qui sont directement liés aux effets du réchauffement climatique. De plus, la pollution par les combustibles fossiles nuit à la santé humaine et aux diverses formes de vie existant dans l'environnement. Les réserves naturelles de cette ressource sont limitées. À cet égard, le besoin de sources d'énergie renouvelables est croissant.

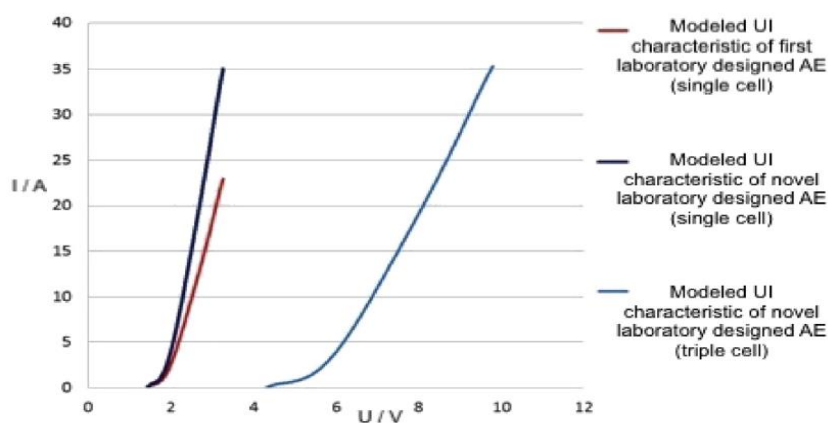
En 2018, **A. Kovac et al.** [3] ont mené une étude expérimentale sur un système de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, utilisant une centrale solaire d'une puissance de 960 (WP). L'objectif de leur étude était d'évaluer et d'analyser les performances des modules photovoltaïques montés en paires sur un dispositif de suivi solaire fixe, à un axe et à

deux axes. Ils ont utilisé un service en ligne avec stockage de données permanentes pour collecter et enregistrer les résultats obtenus lors des expériences.

Les résultats obtenus indiquent que la production totale d'énergie était de 1,234 (MWh). Les gains du système photovoltaïque variaient en fonction de la configuration utilisée : 376,83 (kWh) pour le tracker fixe, 398,21 (kWh) pour le tracker à un axe et 459,29 (kWh) pour le tracker à deux axes. En moyenne, le système a généré 102,861 (kWh) d'énergie par mois tout au long de l'année. De plus, le système est doté d'une interface utilisateur qui peut être ajustée pour maximiser la sortie du point de puissance de l'onduleur solaire, garantissant ainsi une production d'hydrogène efficace.



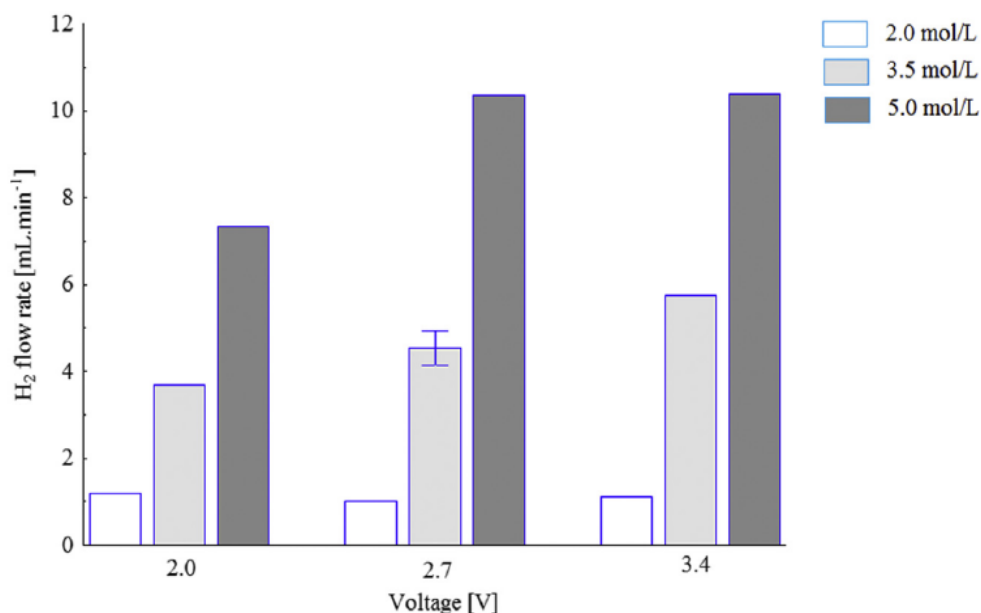
**Figure I.1:** Caractéristiques de fonctionnement UI de la centrale solaire de 960 (WP) [3].



**Figure I.2:** Caractéristiques de fonctionnement UI [3].

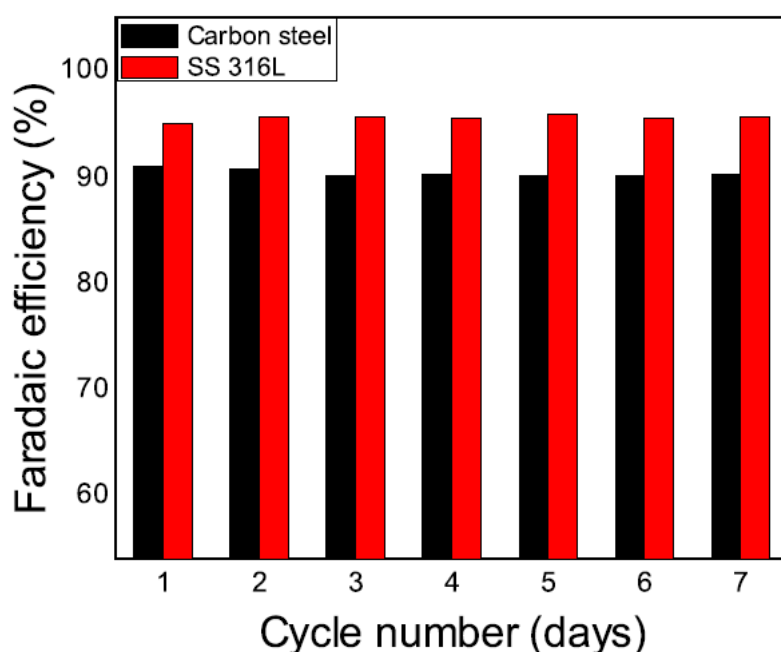
**Dayana D'Arc de Fatima P. et al. [4]** ont réalisé une cellule électrolytique cylindrique pour la production d'hydrogène, composée d'électrodes en acrylique et en acier inoxydable 304 [4]. L'électrolyte utilisé était de l'hydroxyde de sodium (NaOH) avec une concentration de 2 à 5 (mol/L), et des tensions de courant continu de 2.0, 2.7 et 3,4 (V) ont été appliquées.

Les résultats ont démontré que la production maximale d'hydrogène a été obtenue avec une concentration de 5,0 (mol/L) de NaOH et une tension électrique de 3,4 (V). Le système était connecté à un panneau photovoltaïque d'une puissance de 20 (W) et exposé à un rayonnement solaire de 10 (h) à 14 (h). Pendant cette période, environ 2 (L) d'hydrogène ont été produits, avec une irradiance moyenne de  $800 \text{ (W/m}^2) \pm 60 \text{ (W/m}^2)$ .



**Figure I.3:** Résultats expérimentaux du débit de H2 avec la source de courant direct [4].

**Paul C. Okonkwo et al. [5]** ont réalisé une étude expérimentale sur l'électrolyse de l'eau alcaline en utilisant un électrolyseur alcalin fait maison à faible coût pour produire de l'hydrogène. L'effet du matériau de l'électrode sur la production et l'efficacité de l'hydrogène a été étudié. Les résultats ont montré que, bien que l'augmentation de la température augmente la tension et le courant, le matériau de l'électrode a un effet significatif sur la production d'hydrogène. L'étude a révélé que l'utilisation d'une électrode plus petite en acier inoxydable 316 (L) est un meilleur choix pour la production d'hydrogène par rapport à une électrode en acier au carbone.



**Figure I.4:** Efficacité Faradaic des deux matériaux d'électrode pendant sept jours [5].

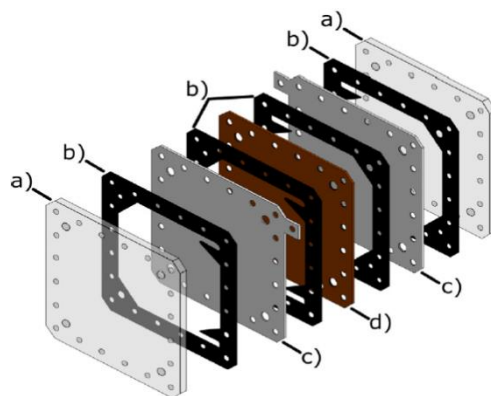
**Bharati Panigrahy et al. [6]** ont mené une discussion sur les avantages, les inconvénients, les éléments de coût et l'efficacité des technologies d'électrolyse de l'eau pertinentes. Leur objectif était de discuter de trois catégories principales de technologies d'électrolyse de l'eau (alcaline, membrane échangeuse de protons (PEM) et électrolyse solide des oxydes (SOE) de manière concise. Ils ont également abordé les défis, les perspectives et les tendances mondiales de la technologie d'électrolyse de l'eau, et ont fait des propositions critiques quant à leur mise en œuvre.

Les résultats montrent que, dans l'ensemble, les pays ont des perspectives d'avenir sur le besoin d'hydrogène vert. Les entreprises multinationales qui investissent dans l'utilisation de l'énergie propre devraient avoir des objectifs à long terme clairement diffusés. L'utilisation maximale de l'hydrogène se trouve principalement dans les industries du raffinage, de la

chimie et de la sidérurgie, et toutes ces industries peuvent utiliser de l'hydrogène vert, quel que soit le paramètre de fonctionnement des électrolyseurs. Cependant, le coût de la technologie de production d'énergie propre à l'hydrogène reste le principal défi.

Ce problème peut être résolu dans une certaine mesure en mettant en œuvre des usines d'électrolyseurs à plus grande échelle, et ultérieurement, lorsque l'utilisation d'hydrogène vert devient obligatoire. Des politiques sont nécessaires pour créer des marchés pour l'énergie verte durable de l'hydrogène, en particulier pour réduire les émissions de gaz à effet de serre issues des technologies conventionnelles de production d'hydrogène. Il existe une forte possibilité d'investissements provenant de divers secteurs de l'énergie si les politiques sont favorables.

**J. Barco-Burgosa et al. [7]** ont réalisé une étude expérimentale sur les performances d'une cellule d'électrolyse alcaline pour l'application de l'hydrogène à distance à l'aide de panneaux photovoltaïques. La cellule électrolytique a été fabriquée en acrylique, en utilisant des électrodes en acier inoxydable 316 (L), et en considérant une séparation par membrane pour les gaz. L'effet des conditions de courant et de la distance entre les électrodes sur l'efficacité de production d'hydrogène, ainsi que la distribution et la variation de la température à la surface des électrodes en fonctionnement, ont été évalués. Les résultats montrent que la génération maximale d'hydrogène a été obtenue avec une séparation de 3 (mm) entre les électrodes (anode et cathode) et un courant de 30 (A) à 12 (V).



**Figure I.5 :** Cellule d'électrolyse alcaline: a) 2 plaques en acrylique translucide, b) 4 plaques en néoprène joints, c) 2 feuilles d'acier inoxydable (anode et cathode) et d) membrane en fibre de polyester [7].

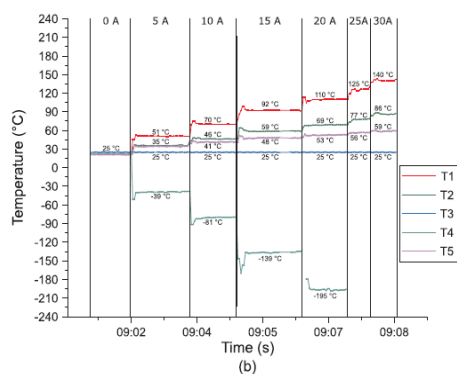
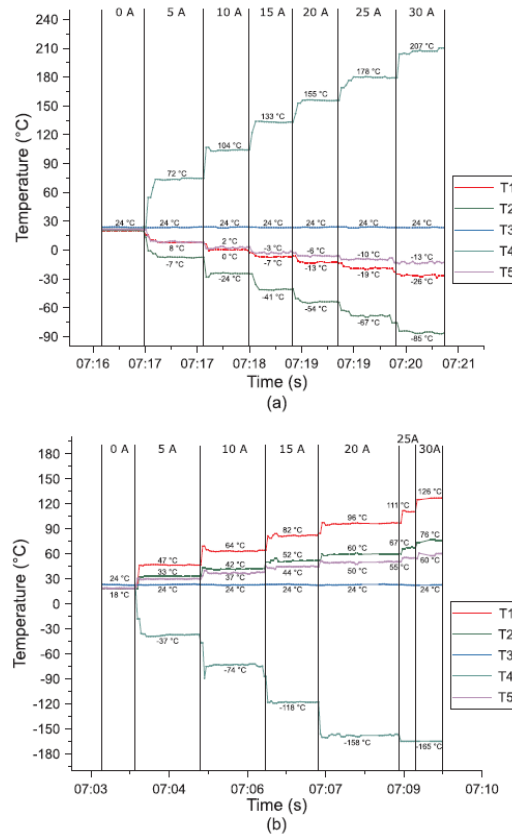


Figure 10 is a line graph showing the temperature of five thermocouples (T1, T2, T3, T4, T5) as a function of time during the heating of the sample. The y-axis represents Temperature in degrees Celsius (°C), ranging from -210 to 180. The x-axis represents Time in seconds (s), ranging from 12:15 to 12:24. The graph shows five curves: T1 (red), T2 (green), T3 (blue), T4 (purple), and T5 (pink). T1 and T2 show a sharp increase in temperature starting around 12:17.5s, reaching a plateau around 12:21s. T3, T4, and T5 show a sharp decrease in temperature starting around 12:17.5s, reaching a plateau around 12:21s. The legend indicates: T1 (red), T2 (green), T3 (blue), T4 (purple), T5 (pink).

| Time (s) | T1 (°C) | T2 (°C) | T3 (°C) | T4 (°C) | T5 (°C) |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 12:15:00 | 29      | 29      | 29      | 29      | 29      |
| 12:16:00 | 29      | 29      | 29      | 29      | 29      |
| 12:17:00 | 62      | 62      | -64     | 29      | 29      |
| 12:18:00 | 87      | 62      | -90     | 29      | 29      |
| 12:19:00 | 165     | 72      | -132    | 29      | 29      |
| 12:20:00 | 132     | 80      | -185    | 29      | 29      |
| 12:21:00 | 138     | 80      | -185    | 29      | 29      |
| 12:22:00 | 154     | 88      | -185    | 29      | 29      |
| 12:23:00 | 154     | 88      | -185    | 29      | 29      |
| 12:24:00 | 154     | 88      | -185    | 29      | 29      |

**Figure I.7 :** Distribution de la température pour la distance entre les électrodes de 11 (mm) : (a) anode et (b) cathode [7].



**Figure 1.8 :** Distribution de la température pour la distance entre les électrodes de 17 (mm) : (a) anode et (b) cathode [7].

**Emin Açikkalp et al. [8]** ont réalisé une étude expérimentale sur l'effet du champ magnétique sur la production d'hydrogène. Leur objectif était d'appliquer une approche basée sur l'énergie et l'exergie, ainsi que des analyses de durabilité soutenue, à l'électrolyse photovoltaïque (PV) et au moteur thermique magnétique, un nouveau système couplé utilisé pour la production d'hydrogène et la production d'électricité. Les principales conclusions de cette étude peuvent se résumer comme suit :

- Le champ magnétique améliore non seulement la production d'hydrogène, mais la chaleur à basse température peut également être récupérée par un moteur thermique magnétique, et une électricité relativement plus efficace peut être générée par rapport à d'autres dispositifs de récupération.
- Le moteur thermique magnétique atteint sa puissance maximale à 7,6 (T), atteignant 5,53 (W) à ce stade.
- Le nouveau système considéré présente des rendements énergétiques et exergétiques supérieurs, se situant autour de 8 (%) à 7,6 (T), et est supposé durable à cette valeur.

La plupart du temps, le système considéré n'est pas durable, car l'énergie solaire est la principale source d'énergie et, en raison de sa nature non consommable, la perte de puissance peut être facilement compensée. De plus, l'étude montre que la plupart des apports énergétiques ne peuvent pas être convertis en électricité en raison de leur inefficacité.

**Danji H. et al. [9]** ont réalisé une étude expérimentale pour établir un modèle numérique tridimensionnel afin de prendre en compte les relations entre le processus électrochimique et le processus fluide à l'intérieur de la cellule d'AWE industrielle, dans le but de concevoir une cellule plus efficace. La courbe caractéristique I-V reflète deux caractéristiques importantes de l'électrolyseur : l'efficacité et le taux de production de gaz. Les résultats ont montré que :

- Un modèle multiphysique qui prend en compte l'influence bidirectionnelle du processus d'écoulement à deux phases et du processus électrochimique prédit la courbe caractéristique I-V des cellules AWE de manière plus précise que les modèles traditionnels, en particulier à des densités de courant élevées (densités de courant supérieures à 2500 (A/m<sup>2</sup>)). L'erreur relative entre le modèle calculé et le résultat expérimental est inférieure à 5 (%).
- Les bulles recouvrant la surface du catalyseur réduisent la vitesse de réaction électrochimique et entraînent une répartition inégale de la densité de courant dans l'appareil. La conception structurelle de la plaque bipolaire doit être améliorée afin d'assurer une distribution uniforme du débit d'électrolyte. Ainsi, une distribution plus uniforme du gaz peut être obtenue pour réduire l'effet des bulles, ce qui permet d'atteindre une distribution plus homogène de la densité de courant afin d'atténuer la dégradation du catalyseur.
- Les modèles physiques doivent prendre en compte la conception structurelle de la cellule AWE industrielle. Le courant de shunt introduit par la canalisation d'entrée d'électrolyte commune a un effet significatif sur l'efficacité de Faraday, en particulier à basse tension.
- La prise en compte de l'interaction entre les processus multiphysiques accroît la non-linéarité de l'équation et affecte la convergence du modèle. Il convient d'examiner attentivement la poursuite de la simplification du modèle physique dans les travaux

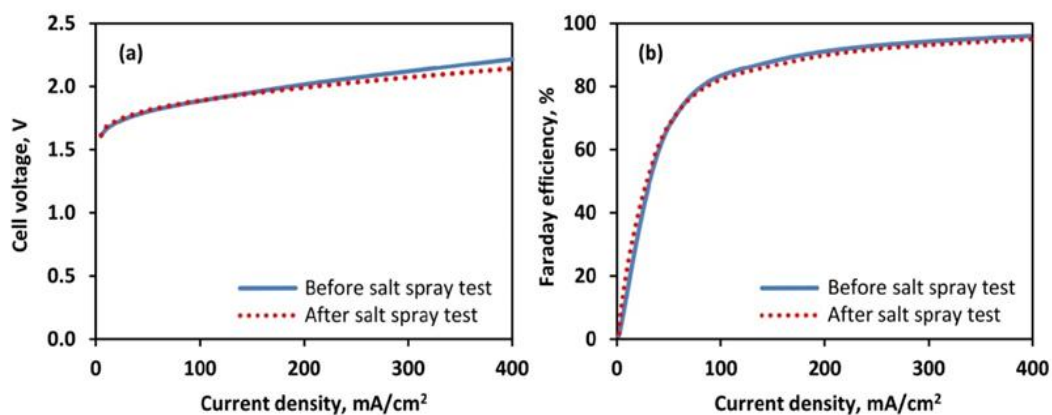
futurs afin d'améliorer la convergence et d'élargir le champ d'application du modèle multiphysique. Grâce à ce modèle avancé, il est possible d'optimiser quantitativement la conception structurelle au niveau de la pile, voire à une échelle plus importante, comblant ainsi le fossé entre la recherche fondamentale et la fabrication industrielle d'AWE.

**Dohyung J. et al. [10]** ont réalisé une étude sur l'effet de la température sur les performances de l'électrolyse de l'eau alcaline (AWE). Dans le but de réduire le coût opérationnel de la production d'hydrogène par AWE, le modèle du système AWE a été simulé en comparant la puissance parasite BOP, la différence de température de la pile entre l'entrée et la sortie, ainsi que la polarisation courant-tension dans diverses conditions de température (40, 50, 60, 70 et 80 (°C)). Les résultats montrent que :

1. En tenant compte de l'effet de bulle, la surtension d'activation d'anode, la surtension de cathode, la surtension ohmique et la tension de cellule fournie sont plus élevées que celles sans tenir compte de l'effet de bulle.
2. Parce que le nombre de bulles est proportionnel à la variation de densité de courant, la différence de surtension ohmique avec et sans la prise en compte de l'effet de bulle augmente linéairement de 0,001 (V) à 0,069 (V) lorsque la densité de courant passe de 0,05 (A/cm<sup>2</sup>) à 1 (A/cm<sup>2</sup>). L'effet de bulle dû à l'augmentation de la température sur les performances de la pile AWE n'est pas supérieur à celui dû à l'augmentation de la densité de courant.
3. A 80 (°C), la génération de chaleur par la surtension est inférieure à la chaleur nécessaire pour maintenir la température de la cheminée jusqu'à la densité de courant atteint 0,63 (A/cm<sup>2</sup>). La quantité d'énergie consommée par le radiateur est augmentée de façon exponentielle à faible densité de courant et augmente progressivement à mesure que la densité de courant augmente. Au fur et à mesure que la température de fonctionnement diminuait, la consommation d'énergie du réchauffeur diminuait.
4. À la densité de courant de référence de 0,6 (A/m<sup>2</sup>), l'efficacité de la pile et l'efficacité du système à 80(°C) est la plus élevée à 81,81 (%) et 78,56 (%) respectivement.
5. Lorsque la différence de température entre l'entrée et la sortie de la pile AWE est diminuée de 10 (°C) à 1 (°C), le débit d'électrolyte est augmenté de 4882,04 (kg/h) à

92195,60 (kg/h), et l'efficacité du système passe de 75,86 (%) à 77,01 (%), car la puissance parasite BOP est passée de 39,98 (KW) à 26,01 (KW).

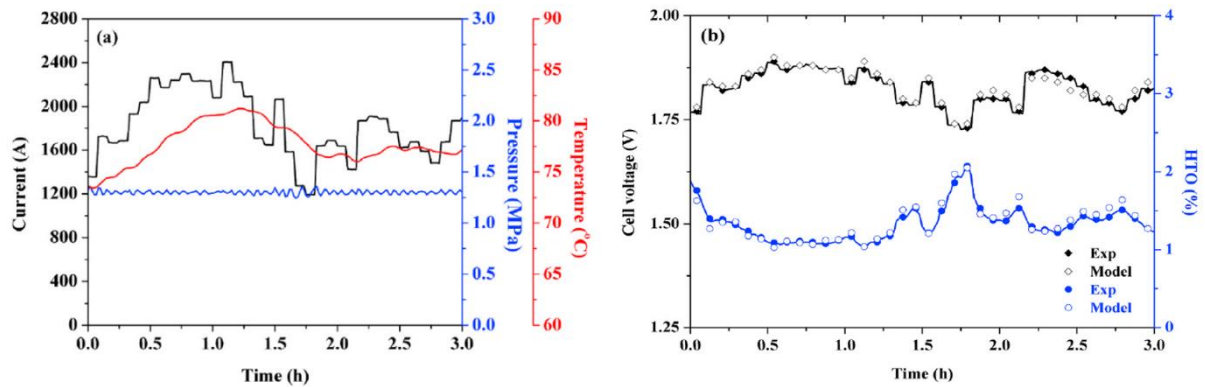
L'étude menée par **Amores E. et al. [11]** examine les effets de l'atmosphère marine sur les composants d'une cellule d'électrolyse de l'eau alcaline pour la production d'hydrogène. Les auteurs ont effectué des tests sur des cellules d'électrolyse en utilisant des électrodes en nickel et en acier inoxydable, exposées à des environnements marins simulés pendant 1000 (heures). Les résultats ont montré que les électrodes en nickel ont subi une corrosion plus importante que celles en acier inoxydable, mais que les deux types d'électrodes ont montré une dégradation significative de leurs performances électrochimiques après exposition à l'atmosphère marine. Les auteurs concluent que des mesures de protection sont nécessaires pour prolonger la durée de vie des cellules d'électrolyse dans des environnements marins. L'étude fournit des informations importantes pour le développement de technologies de production d'hydrogène à partir de l'électrolyse de l'eau alcaline dans des environnements marins.



**Figure I.9:** Performance de la cellule d'électrolyse avant et après le test au brouillard salin (à 60 (°C) et un débit de 1,4 (L/min)) : (a) courbe de polarisation ; (b) Efficacité Faraday [11].

L'article de **Zhibo Ren et al. [12]** présente une étude expérimentale et de modélisation d'un électrolyseur à eau alcaline de 250 (kW) pour la production d'hydrogène. Les auteurs ont conçu et fabriqué un prototype d'électrolyseur à haute efficacité, capable de fonctionner en continu à des températures et des pressions élevées. Ils ont réalisé des tests de performance pour mesurer les paramètres clés tels que la tension, le courant, la puissance et la production d'hydrogène. Les résultats ont montré que l'électrolyseur avait une efficacité élevée et une stabilité de fonctionnement satisfaisante. En outre, les auteurs ont développé un modèle de simulation numérique pour prédire les performances de l'électrolyseur, et ont validé le modèle en le comparant aux données expérimentales. Le modèle a permis d'optimiser les conditions

de fonctionnement pour maximiser la production d'hydrogène tout en minimisant la consommation d'énergie. Les résultats ont montré que la simulation numérique peut être un outil précieux pour améliorer la conception et l'efficacité des électrolyseurs à grande échelle.



**Figure I.10:** Résultats de l'expérience lors de l'essai de démonstration vent-hydrogène. (a) évolution du courant fourni à l'électrolyseur et température de fonctionnement et la pression. (b) évolution de la tension de cellule résultante et du HTO. Comparaison de tension de cellule enregistrée (symboles pleins) et calculée (symboles vides) et HTO [12].

S. Anwar et al. [13], présente une synthèse de l'état de l'art des catalyseurs électrochimiques utilisés pour la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. Les auteurs examinent les progrès récents dans la conception et la fabrication de catalyseurs pour améliorer l'efficacité et la durabilité du processus d'électrolyse. Ils abordent également les principaux défis à relever dans le développement de catalyseurs efficaces pour l'électrolyse de l'eau. Les auteurs se concentrent sur les catalyseurs à base de métaux nobles, tels que le platine, le palladium et l'iridium, ainsi que sur les catalyseurs non-nobles, tels que les métaux de transition, les métaux alcalins et les alliages. Ils discutent également des tendances récentes dans la recherche de nouveaux matériaux pour la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, tels que les nanomatériaux, les matériaux composites et les catalyseurs bifonctionnels. Enfin, les auteurs discutent des perspectives futures pour la recherche de catalyseurs électrochimiques efficaces pour la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau.

Le travail de K. Torii, et al, [14]., décrit une étude sur la modélisation numérique de la dynamique de la bulle de gaz d'hydrogène dans un processus d'électrolyse de l'eau alcaline. Les auteurs ont utilisé une méthode de simulation numérique de couplage tridimensionnel pour modéliser les phénomènes d'écoulement biphasique et électrochimique dans l'électrolyse de l'eau alcaline.

Les résultats ont montré que la dynamique de la bulle de gaz d'hydrogène est influencée par des paramètres tels que le taux de production d'hydrogène, la densité de courant électrique et la concentration d'ions  $\text{OH}^-$ . Les auteurs ont également observé que le comportement de la bulle de gaz d'hydrogène peut changer en fonction des conditions de fonctionnement de l'électrolyseur.

En conclusion, cet article fournit des informations précieuses sur la dynamique de la bulle de gaz d'hydrogène dans l'électrolyse de l'eau alcaline et montre l'importance de prendre en compte les interactions entre l'écoulement biphasique et les phénomènes électrochimiques pour une meilleure compréhension de ce processus. Les résultats pourraient également être utilisés pour optimiser la conception de l'électrolyseur et améliorer son efficacité énergétique.

L'article de **Matheus T. de Groot et al. [15]**, a pour objectif de déterminer les paramètres de fonctionnement optimaux pour l'électrolyse de l'eau alcaline avancée. Les auteurs ont mené une analyse expérimentale pour évaluer l'effet de divers paramètres sur la production d'hydrogène, tels que la concentration de l'électrolyte, la température et le taux de circulation de l'électrolyte. Ils ont également effectué des simulations numériques pour optimiser les performances de l'électrolyseur en utilisant différentes configurations de cellules électrolytiques.

Les résultats ont montré que l'utilisation d'une concentration d'électrolyte plus élevée et d'une température plus élevée a entraîné une augmentation de la production d'hydrogène, tandis qu'une augmentation du taux de circulation de l'électrolyte a conduit à une diminution de la production d'hydrogène. Les simulations numériques ont également confirmé ces résultats et ont permis d'identifier les configurations de cellules électrolytiques optimales pour maximiser la production d'hydrogène.

Une modélisation physique de l'électrolyse alcaline est déterminée et les études sur le modèle d'écoulement diphasique sont réalisées pour ce modèle par **[16]**, les forces internes et externes agissant sur les bulles résultantes sont également déterminées. Les auteurs ont utilisé des relations empiriques pour analyser les effets de différents facteurs tels que le taux de montée des bulles, le flux de masse, la qualité, la vitesse des fluides et l'angle de mouillage.

Il est montré que la vitesse de montée dépend du taux de vide de l'hydrogène et de l'électrolyte et de la densité de l'hydrogène. La séparation de l'hydrogène gazeux de l'électrode, la vitesse de la bulle d'hydrogène gazeux sous l'influence des forces de traînée et

de flottabilité est également calculée en fonction du coefficient de dérive dans cette modélisation. Les résultats peuvent aider à comprendre le mécanisme d'évolution des bulles d'hydrogène de l'électrolyse de l'eau alcaline. Et montre qu'il n'était pas possible d'observer le régime d'écoulement annulaire car il n'y aurait pas une longueur de cuve d'électrolyse suffisante et une vitesse de fluide suffisante dans la recherche.

### **I.3. Conclusion :**

En conclusion de notre recherche bibliographique sur l'hydrogène, nous constatons que cette source d'énergie présente un potentiel prometteur dans divers domaines. Les études consultées soulignent les avantages majeurs de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique, notamment sa polyvalence d'utilisation dans les transports, les applications stationnaires et portables. De plus, l'hydrogène offre un rendement énergétique élevé et constitue une option intéressante pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, à condition d'utiliser des méthodes de production durables. Cependant, des défis subsistent, tels que le stockage, la distribution et la sécurité liés à l'hydrogène. Néanmoins, les recherches actuelles et les avancées technologiques dans ce domaine laissent entrevoir un avenir où l'hydrogène pourrait jouer un rôle essentiel dans la transition énergétique mondiale vers des sources plus propres et durables.

## Chapitre II : théorie sur les procédés de production d'hydrogène

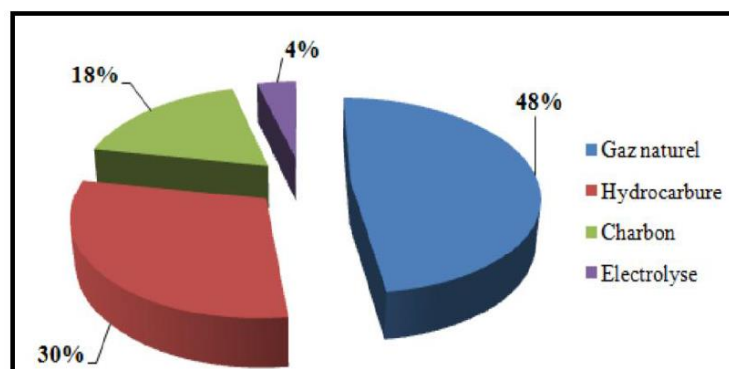
### II. 1 Introduction :

L'hydrogène, élément chimique le plus simple, est constitué d'un unique proton et d'un électron. Le dihydrogène ( $H_2$ ), composé de deux atomes d'hydrogène, est communément appelé hydrogène. Bien qu'il soit présent en abondance à la surface de la Terre, il se trouve généralement lié à d'autres éléments chimiques dans des molécules telles que l'eau et les hydrocarbures.

Les organismes vivants contiennent également de l'hydrogène, ce qui en fait une source potentielle de cette ressource. Cependant, extraire l'hydrogène de ces sources primaires nécessite une dépense d'énergie, ce qui en fait un vecteur énergétique. Si l'hydrogène est produit en quantité suffisante et à un coût compétitif, il pourrait représenter une source d'énergie pratiquement inépuisable, idéalement produite à partir de sources d'énergie renouvelables ou nucléaires. La technologie de l'hydrogène englobe l'ensemble des technologies étudiées pour produire, stocker et convertir l'hydrogène dans le but d'en faire usage sur le plan énergétique.

Actuellement, la demande en hydrogène s'élève à 57 millions de tonnes par ans et augmente régulièrement à un rythme de 5 à 10 (%) par ans, en raison de la croissance des pays industrialisés. La consommation d'hydrogène est principalement concentrée dans les secteurs de l'industrie de l'ammoniac et du pétrole. Pour répondre à 20 (%) des besoins énergétiques, la production d'hydrogène devra être multipliée par 20 d'ici 2050.

Parmi les procédés les plus prometteurs à moyen terme, on trouve l'électrolyse de l'eau et les cycles thermochimiques [17]. Actuellement, la plupart des techniques de production d'hydrogène reposent à environ 50 (%) sur le gaz naturel et à 30 (%) sur les hydrocarbures, en raison de leur disponibilité et principalement de leur coût abordable [18, 19]. Cependant, le procédé d'électrolyse n'est pas encore compétitif, principalement en raison du coût élevé de l'électricité, qui limite son aspect économique.



**Figure.II.1:** Pourcentage des sources d'énergie pour la production de l'hydrogène [19].

## II. 2 Caractéristique de l'hydrogène :

### II. 2.1. Propriétés physiques :

L'hydrogène est un gaz incolore et inodore. C'est l'élément le plus léger. Il représente 75 (%) de la masse de l'univers. Cependant, il se trouve pratiquement en combinaison avec d'autres éléments tels que l'oxygène, le carbone et l'azote. Sur terre, on le trouve principalement dans l'eau et les hydrocarbures. Le tableau II.1, rapporte ses propriétés physiques [20].

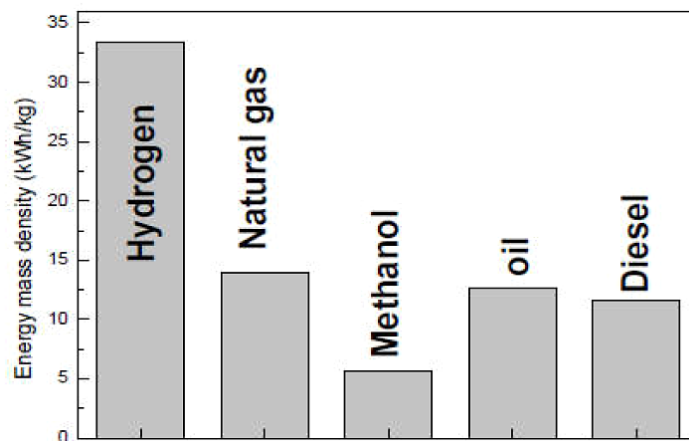
|                                      |                             |
|--------------------------------------|-----------------------------|
| Masse moléculaire                    | 2.016                       |
| Electronégativité                    | 2.1                         |
| Densité de masse (phase gazeuse)     | 0.0838 (kg/m <sup>3</sup> ) |
| Masse volumique (phase liquide)      | 70.8 (kg/m <sup>3</sup> )   |
| Température d'ébullition             | 20 (k)                      |
| Température de fusion                | 13.8 (K)                    |
| Chaleur latente de fusion            | 58.23 (KJ/kg)               |
| Chaleur latente de vaporisation      | 449.59 (KJ/kg)              |
| Chaleur latente de sublimation       | 507.39 (KJ/kg)              |
| Capacité calorifique (phase gazeuse) | 14.9 (KJ/kg K)              |
| Capacité calorifique (phase liquide) | 9.69 (KJ/kg K)              |
| Valeur de chauffage supérieur        | 140 (MJ/kg)                 |
| Valeur de chauffage inférieur        | 120 (MJ/kg)                 |

**Tableau II.1 :** propriété thermo physique de l'hydrogène [20].

## II. 2.2. Propriétés énergétiques :

D'un point de vue énergétique, l'hydrogène présente plusieurs avantages [20]:

- ✓ Il a une très grande densité de masse d'énergie. Comme on peut le voir dans la figure II.2, l'énergie fournie par unité de masse d'hydrogène est deux fois plus celle fournie par l'énergie conventionnelle, elle est presque trois fois celle de l'essence et près de six fois celle du méthanol.



**Figure II.2 :** densité de masse d'énergie de quelques carburants [20].

- ✓ L'hydrogène est le vecteur d'énergie le plus polyvalent. En effet, les sources d'énergies conventionnelles ne peuvent pas être converties sous forme d'énergies utiles (mécanique, thermique ou électrique) suivant seulement un seul processus : la combustion. Par contre, l'hydrogène peut être converti en énergie utile selon cinq processus différents. En plus de la combustion, l'hydrogène peut :
  - Etre directement transformé en vapeur.
  - Etre converti directement en chaleur par combustion catalytique.
  - Etre converti directement en électricité par des procédés électrochimiques.
  - Agir comme une source de chaleur et /ou dissipateur de chaleur par réaction chimique.
- ✓ En tenant compte des impacts environnementaux, l'hydrogène solaire est un carburant propre comparé aux divers combustibles, comme le montre le **tableau II.2**. La seule particule émise est le  $\text{NO}_x$  et cela lors de la combustion de l'hydrogène. Toute autre forme d'utilisation d'hydrogène (hydruration, génération de vapeur,

combustion catalytique, etc.) ne produit ou produit très peu d'éléments nocifs pour l'environnement.

| Polluant        | Hydrocarbure | Charbon | Hydrogène |
|-----------------|--------------|---------|-----------|
| CO <sub>2</sub> | 72.40        | 100.00  | 0.0       |
| CO              | 0.80         | 0.65    | 0.0       |
| SO <sub>2</sub> | 0.38         | 0.50    | 0.0       |
| NO <sub>x</sub> | 0.34         | 0.32    | 0.10      |

**Tableau II.2:** Polluants émis par les différents carburants. [20]

- ✓ Comme pour tout carburant, des précautions de sécurité élémentaires doivent être respectées pendant l'utilisation de l'hydrogène. Cependant, en comparaison avec les dangers liés à l'utilisation d'autres combustibles, en particulier la toxicité et les risques d'incendie, l'hydrogène est le carburant qui représente le moins de risque.

### II.3. Production d'hydrogène :

La production d'hydrogène consiste à extraire et isoler la molécule d'hydrogène à partir de matières premières telles que l'eau, la biomasse ou les hydrocarbures (pétrole, gaz naturel ou charbon) [20]. Différentes techniques de production sont utilisées, certaines étant déjà à un stade de production commerciale, tandis que d'autres sont encore à l'échelle expérimentale.

Parmi les procédés de production d'hydrogène qui sont industrialisés ou en phase d'industrialisation, on trouve la décomposition catalytique du gaz naturel, l'oxydation partielle des huiles lourdes, la gazéification du charbon et l'électrolyse de l'eau. Ces techniques permettent d'obtenir de l'hydrogène à grande échelle et sont utilisées dans divers secteurs industriels.

#### II.3.1. Production par les combustibles fossiles (hydrocarbures) :

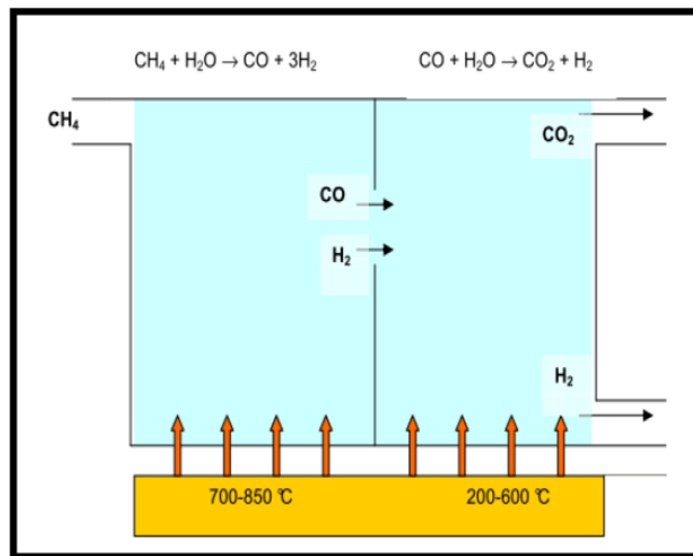
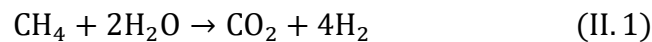
L'hydrogène peut être produit à partir de la plupart des combustibles fossiles. La complexité des processus se présente dans l'apparition de CO<sub>2</sub> comme sous-produit ce qui peut présenter des avantages économiques mais pas très écologiques.

##### II.3.1.1. Le vapo-reformage de gaz naturel :

Le reformage à la vapeur, également connu sous le nom de reformage avec vapeur, est une méthode largement utilisée pour la production d'hydrogène. Cette technique repose sur la réaction du méthane pur avec de la vapeur d'eau dans un réacteur catalytique, généralement

composé de nickel ou d'alliages de nickel-fer. Le processus se déroule à des températures (700-850 (°C)) et des pressions (15-30 (atm)) spécifiques.

Lors de cette réaction, un mélange d'hydrogène et de monoxyde de carbone est formé. Par la suite, après refroidissement, une autre réaction se produit, au cours de laquelle le monoxyde de carbone précédemment formé réagit avec la vapeur d'eau pour produire de l'hydrogène et du dioxyde de carbone.



**Figure. II.3 :** Principe du vapo-reformage.

Effectivement, malgré le processus de reformage à la vapeur, une certaine quantité de monoxyde de carbone (CO) peut subsister à la sortie du réacteur. Pour éliminer ce CO résiduel, un réacteur d'oxydation préférentielle est utilisé. Ce réacteur permet d'oxyder sélectivement le CO restant en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>).

Après passage par le réacteur d'oxydation préférentielle, les gaz à la sortie peuvent être composés principalement d'hydrogène (H<sub>2</sub>) à hauteur d'environ 70 (%), de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) représentant environ 28 (%), ainsi que de traces d'azote (N<sub>2</sub>), de méthane (CH<sub>4</sub>) et de CO. Ces différents composants gazeux peuvent ensuite être séparés pour obtenir une source d'hydrogène pur [18].

### II. 3.1.2. Oxydation partielle :

En effet, le procédé de vapo-reformage est plus simple que le reformage à la vapeur. Il consiste à oxyder les hydrocarbures en présence d'oxygène pur à des températures élevées

(1200 à 1500 (°C)) et à une pression élevée (20 à 90 (bars)). Contrairement au reformage à la vapeur, ce procédé n'a pas besoin d'un catalyseur pour fonctionner.

Le vapo-reformage présente l'avantage d'être exothermique, ce qui signifie qu'il génère de la chaleur. Cette chaleur peut être récupérée pour une utilisation ultérieure. Après la réaction d'oxydation, une réaction de shift peut être effectuée pour ajuster le rapport entre le monoxyde de carbone (CO) et le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), suivie d'une séparation gazeuse pour obtenir de l'hydrogène pur.

Cependant, le principal inconvénient de ce procédé est la nécessité d'utiliser de l'oxygène pur, ce qui peut être coûteux et pose des défis en termes de sécurité et de gestion des stocks d'oxygène [21].

#### **II.3.1.3. Reformage autotherme:**

Effectivement, le vapo-reformage est un processus qui combine deux réactions principales. La première est la réaction présentée par l'équation (II.1), qui est la réaction d'oxydation partielle des hydrocarbures. La seconde réaction est la combustion du méthane, qui est également exothermique.

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de récupérer l'énergie générée par les réactions exothermiques de l'oxydation partielle. Dans ce procédé, le gaz naturel et l'oxygène sont mélangés avec de la vapeur d'eau. Ensuite, le mélange est préchauffé avant d'être introduit dans le réacteur pour la production de gaz de synthèse, qui est principalement composé de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène (H<sub>2</sub>).

Les conditions opératoires typiques pour le vapo-reformage sont une température comprise entre 900 et 1100 (°C) et une pression entre 20 et 60 (bars). Ces conditions favorisent la réaction et permettent d'obtenir un gaz de synthèse riche en hydrogène, qui peut ensuite être utilisé dans diverses applications industrielles.

#### **II.3.1.4. Pyrolyse:**

Ce procédé est basé sur la déshydrogénation des hydrocarbures ou les déchets domestiques organiques en donnant de l'hydrogène et du charbon à des températures très élevées. La pyrolyse, appelée carbonisation, consiste en un craquage thermique réalisé en l'absence de produits oxydants. Cette réaction endothermique conduit à une décomposition du solide en trois fractions :

- Une fraction gazeuse non condensable (CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O),
- Une fraction gazeuse condensable (huile aromatique, goudrons, H<sub>2</sub>O),
- Un résidu solide : le char, composé majoritairement de carbone (matières minérales).

La pyrolyse est généralement réalisée pour des températures d'environ 500 (°C). Elle peut être suivie d'une réaction de gazéification: la production de gaz de synthèse est réalisée par reformage des fractions gazeuses et gazéification du résidu carboné [22].

### **II.3.2.Production à partir du charbon :**

La réaction pour ce procédé est donnée comme suite:



L'inconvénient primordial de ces procédés préalablement cités est l'émission du gaz carbonique dans l'atmosphère (environ 7 tonnes de CO<sub>2</sub> par tonne de H<sub>2</sub> produit), ce qui nécessite un traitement spécifique [23].

### **II.3.3.Production à partir du nucléaire :**

Des réacteurs dits de 4ème génération sont développés dans ces dernières années pour être plus sûrs que les réacteurs classiques, qui servent à la production de l'électricité et de l'hydrogène gazeux. Les rendements devraient être de l'ordre de 50 (%). Une partie de la chaleur dégagée dans des nouveaux réacteurs nucléaires destinés à produire de l'électricité est récupérée pour être réutilisée dans la production de l'hydrogène via la décomposition thermochimique de l'eau [24].

### **II.3.4.Procédés biologiques :**

Le phénomène de production d'hydrogène a été découvert en 1940 par Gaffron. Il n'a été observé que certains organismes photosynthétiques, tels que certaines algues vertes ou cyanobactéries, sont capables de produire de l'hydrogène lors de la photosynthèse dans des conditions anaérobiques, c'est-à-dire en l'absence d'oxygène [25].

La production d'hydrogène peut être réalisée soit en utilisant des organismes vivants tels que des algues ou des bactéries, soit par des procédés biochimiques impliquant des levures ou des enzymes. Grâce aux avancées technologiques, il est désormais possible de développer des

souches d'algues commercialement viables, ce qui ouvre la voie à une production industrielle d'hydrogène à partir de ces organismes [26].

Ces techniques offrent des perspectives prometteuses pour la production d'hydrogène, en exploitant les capacités naturelles des organismes photosynthétiques. Cela pourrait contribuer à développer des méthodes de production d'hydrogène plus durables et respectueuses de l'environnement.

Aujourd'hui des recherches sont menées afin d'étudier les phénomènes métaboliques pour trouver les conditions appropriées et par suite avoir une conception correcte d'un réacteur de bio-hydrogène. On peut distinguer les procédés biologiques comme suit:

- ✓ La bio-photolyse de l'eau par des algues ou par des cyanobactéries.
- ✓ La fermentation par la dégradation des substances organiques en présence de bactéries et en absence d'oxygène.
- ✓ La décomposition des composés organiques par des bactéries photosynthétiques [27].

### **II.3.5. Production d'hydrogène par dissociation de l'eau :**

#### **II.3.5.1. Décomposition thermochimique :**

À des températures élevées (1500 (°C)) et selon la pression utilisée, l'eau peut se décomposer en hydrogène et en oxygène gazeux. Cependant, ce procédé présente l'inconvénient d'un risque d'explosion en raison des conditions extrêmes requises.

Un scientifique japonais nommé Nakamura [28] a réalisé des expériences en utilisant une source solaire pour chauffer de la magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) dans un concentrateur solaire situé dans une région très ensoleillée. La magnétite se transforme en oxyde ferreux ( $\text{FeO}$ ) appelé la wustite. Ensuite, Nakamura a fait réagir la wustite avec de l'eau, ce qui produit de l'hydrogène et régénère la magnétite. Cependant, il convient de noter que ces procédés peuvent également générer des déchets polluants qui nécessitent des traitements appropriés pour préserver l'environnement.

Il est important de développer des méthodes de production d'hydrogène qui soient à la fois efficaces et respectueuses de l'environnement. La gestion adéquate des déchets générés par ces procédés est un aspect essentiel à considérer pour minimiser leur impact écologique.

### II.3.5.2.Procédés photo-électrochimiques :

Des recherches récentes se concentrent sur la production d'hydrogène en utilisant la décomposition de l'eau sous l'effet de l'énergie solaire, sans nécessiter d'apport d'énergie externe. Cette approche utilise des photo-catalyseurs tels que le dioxyde de titane (TiO<sub>2</sub>) [29]. Cependant, le rendement de ce procédé est actuellement faible et coûteux par rapport au reformage catalytique du gaz naturel à la vapeur d'eau.

Des efforts de recherche sont en cours pour développer de nouveaux semi-conducteurs plus rentables [30]. L'objectif est d'améliorer l'efficacité et la rentabilité de la production d'hydrogène par photo-catalyse, afin de rendre cette méthode plus compétitive par rapport aux procédés traditionnels. Ces avancées technologiques pourraient permettre d'exploiter de manière plus efficace l'énergie solaire pour produire de l'hydrogène, contribuant ainsi à des solutions énergétiques plus durables et respectueuses de l'environnement.

### II.3.5.3.Electrolyse de l'eau :

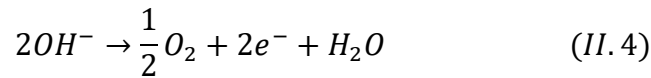
L'électrolyse de l'eau est un processus électrochimique dans lequel un courant électrique continu est appliqué à travers un électrolyte liquide ou solide, en utilisant deux électrodes séparées par une membrane. Ce processus conduit à la décomposition de l'eau en hydrogène et en oxygène [31].

Lorsque le courant électrique passe à travers l'électrolyte, une réaction chimique se produit à chaque électrode. À l'électrode positive, appelée l'anode, l'oxygène est produit par oxydation de l'eau. À l'électrode négative, appelée la cathode, l'hydrogène est produit par réduction de l'eau. La membrane séparant les deux électrodes permet le passage des ions nécessaires pour la réaction, tout en empêchant le mélange des gaz produits.

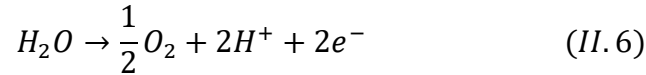
L'électrolyse de l'eau est une méthode couramment utilisée pour produire de l'hydrogène à partir d'une source d'électricité. Elle offre la possibilité de produire de l'hydrogène de manière propre et durable, en utilisant de l'eau comme matière première et en évitant les émissions de gaz à effet de serre. Cependant, l'efficacité et le coût de ce processus sont des aspects importants qui nécessitent encore des améliorations pour rendre l'électrolyse de l'eau plus compétitive à grande échelle.

✓ Dans une solution alcaline, les réactions suivantes s'effectuent:





✓ Dans une solution acide :



La tension de dissociation de l'eau s'exprime par la formule selon Nernst:

$$E_{rev} = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{a_{H_2O}} \quad (II.7)$$

Où: R constante molaire des gaz (8,314 (J. mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)).

T(K) température thermodynamique.

F constante de Faraday (96487 (C· mol<sup>-1</sup>)).

E<sub>0</sub> (V) tension de décomposition réversible dans les conditions normales.

P<sub>H2</sub> = P<sub>O2</sub> = P (Pa) pression de service de l'électrolyseur.

a<sub>H2O</sub> représente l'activité de l'eau. Par conséquent, la tension de décomposition réversible dans les conditions normales est égale à 1.229 (V) [32].

La tension pratique d'électrolyse est supérieure à la tension réversible à cause de l'ensemble des irréversibilités présentes dans l'électrolyse [33]:

$$U = E_{rev} + \eta_a + \eta_c + R_0 I \quad (II.8)$$

E<sub>rev</sub> : Tension réversible (V), η<sub>c</sub>: Surtension cathodique (V), η<sub>a</sub>: Surtension anodique (V),

I: Intensité de cellules (A). R<sub>0</sub> : Résistance électronique et ionique de l'ensemble électrodes membranes électrolyte (Ω).

On peut distinguer l'ensemble des résistances dans la cellule d'électrolyse en:

- Résistances des réactions électrochimiques: dues à surtensions nécessaires pour satisfaire les énergies d'activation à produire l'hydrogène sur la cathode et l'oxygène sur la surface de l'anode
- Transport- résistances relatives : incluant des résistances de transport ionique, résistances physiques dans le procès d'électrolyse tels que les bulles des gaz d'O<sub>2</sub> et

$H_2$  sur les surfaces d'électrode, résistances de la membrane et les résistances électriques du bain.

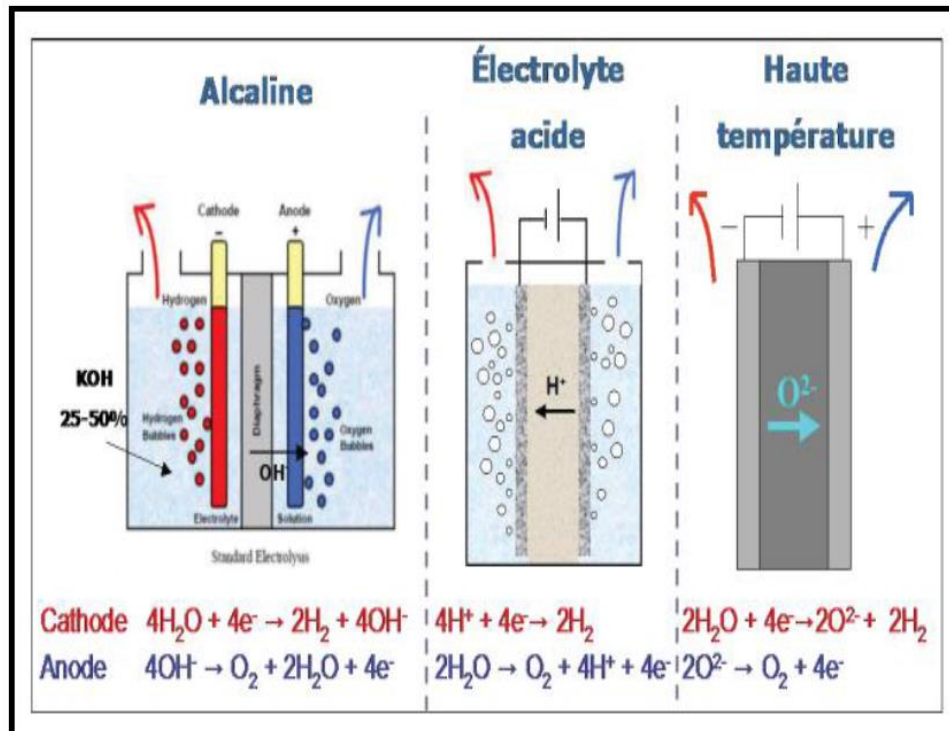
- Résistance électrique: La résistance des conducteurs donnée par loi d'Ohm  $R = L/K.S$  où  $L$ ,  $K$  et  $S$  sont la longueur, la conductivité spécifique et la section de conducteur respectivement [34].

Actuellement l'électrolyse représente seulement 4 (%) de la capacité totale de la production d'hydrogène [35]. Pour produire de l'hydrogène très pur, l'électrolyse de l'eau est un procédé de choix. L'inconvénient majeur de son utilisation à cette fin réside dans le prix de revient dû à la consommation d'énergie relativement élevé. Des recherches intensives ayant pour le but à développer de nouveau procédé plus économique.

#### II.3.5.4. Différents types d'électrolyseurs de l'eau :

Les technologies d'électrolyseurs de l'eau modernes en voie de développement se distinguent, d'une coté par le type de structure (mono-polaire ou bi-polaire) et d'autre coté par le type d'électrolyte (alcalin, PEM et PCFC ou SOFC). L'électrolyse s'effectue dans un système électrochimique appelé cellule d'électrolyse, constituée de deux électrodes, une anode et une cathode, placées de part et d'autre d'un conducteur ionique (électrolyte). Les deux électrodes sont connectées à un générateur de courant, comme montrée dans **figure II.4**, la réaction globale d'électrolyse de l'eau peut avoir lieu dans différents systèmes. Le milieu électrolytique peut être acide ou alcalin et la réaction peut également avoir lieu à haute température. En fonction des conditions opératoires, les réactions d'oxydation et de réduction ayant lieu aux électrodes se distinguent, mais elles mènent aux mêmes produits. Toutefois, pour que ces réactions aient lieu, les matériaux composant ces systèmes électrochimiques doivent être adéquats.

Ces trois types de technologie d'électrolyse ont chacun ses privilèges et ses inconvénients (**Tableau II. 1**). Les travaux de la présente thèse sont focalisés sur l'électrolyse de l'eau en milieu alcalin concentré.



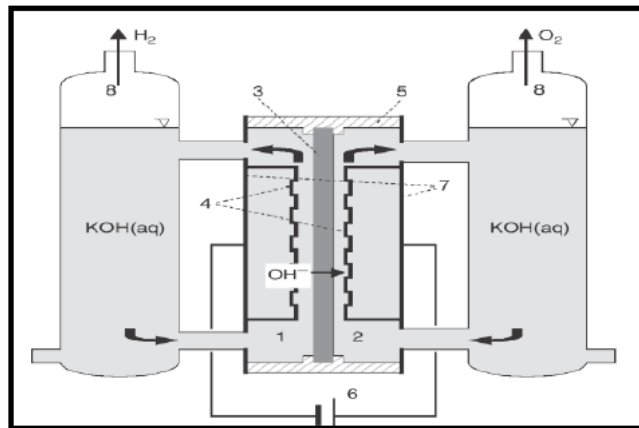
**Figure II.4:** Schéma des différents systèmes électrochimiques pour la production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau [36].

| Électrolyse en milieu basique.                                                                                                                                                                           | Électrolyse à haute température.                                                                                                                                                     | Électrolyse en milieu acide PEM.                                                                                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Avantages</b>                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                       |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Catalyseurs non nobles.</li> <li>- Technique opérationnelle aisée.</li> <li>- Stabilité à long terme.</li> <li>- Procédé relativement moins coûteux.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût d'énergie bas.</li> <li>- Catalyseurs moins chers.</li> <li>- Mise en marche à haute pression.</li> <li>- Grande efficacité</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Densité de courant élevée.</li> <li>- Grande efficacité</li> <li>- Des gaz très purs.</li> <li>- Système compact.</li> </ul> |
| <b>Inconvénients</b>                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                       |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Des densités de courant faibles.</li> <li>- Utilisation d'un diaphragme.</li> <li>- Liquide d'électrolyse corrosif.</li> </ul>                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Moins durable.</li> <li>- Ses matériaux sont fragiles.</li> <li>- Source de chaleur.</li> <li>- Phase d'essai.</li> </ul>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Des catalyseurs nobles.</li> <li>- Coût élevé de l'électrolyse solide.</li> <li>- Milieu corrosif.</li> </ul>                |

**Tableau II.1 :** Les avantages et les inconvénients des différentes technologies d'électrolyse de l'eau [37].

#### II.3.5.4.1. Electrolyseurs alcalins :

Les bains d'électrolyse alcaline de l'eau sont préférés aux bains acides en raison des problèmes de corrosion. Les électrodes en nickel présentent une bonne stabilité dans les bains alcalins, ce qui fait de l'électrolyse alcaline la technologie la plus répandue dans l'industrie. Les systèmes d'électrolyse alcaline se présentent sous forme de modules de petite à moyenne capacité (0,5-800 (Nm<sup>3</sup>/h) d'hydrogène). Ces modules comprennent des cellules d'électrolyse, une unité de traitement de l'eau, une unité de séchage, une unité de purification de l'hydrogène et un compresseur [32].



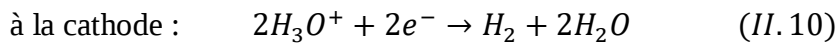
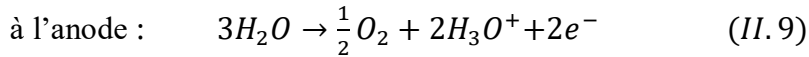
**Figure II.5.** Schéma d'un électrolyseur alcalin: Compartiment anodique (1), compartiment cathodique (2), diaphragme (3), électrodes (4), cadre de la cellule (5), alimentation en courant continu (6), end-plates (7), séparateurs du gaz (8) [39].

La solution de KOH est choisie comme électrolyte en raison de sa bonne conductivité, et la densité de courant typique est généralement située entre 100 et 300 (mA/cm<sup>2</sup>). Cependant, la production d'eau reste coûteuse en raison de sa consommation énergétique élevée, qui se situe entre 4,5 et 5 (kWh) par (m<sup>3</sup>) d'hydrogène [38].

Ces coûts énergétiques élevés sont un défi majeur pour l'électrolyse alcaline, et des efforts sont déployés pour développer des technologies et des procédés plus efficaces qui permettraient de réduire la consommation d'énergie lors de la production d'hydrogène par électrolyse. L'amélioration de l'efficacité énergétique de l'électrolyse alcaline est essentielle pour rendre cette méthode plus compétitive et économiquement viable à grande échelle.

#### II.3.5.4.2. Electrolyse acide PEM (Proton Exchange Membrane) :

La propriété principale de l'électrolyseur PEM est son électrolyte solide (membrane polymère) qui assure ainsi la conduction des ions hydronium ( $H_3O^+$ ) produits à l'anode et permet la séparation des gaz produits ( $H_2$  et  $O_2$ ), selon les réactions ci-dessous :



Cette membrane est constituée de fluoro-polymère solide comprenant des groupements acides sulfoniques ( $HSO_3$ ) qui se transforment aisément en leur base (en ions  $SO_3^-$ ) [27].

Les privilèges de cette méthode sont une mise en marche simple, des problèmes de corrosion limités, des performances notables, en plus elle est adaptable pour les sources d'énergie renouvelables. Néanmoins le coût élevé des catalyseurs à base de métaux nobles et les membranes mènent à des électrolyseurs PEM plus chers que les électrolyseurs alcalins [40].

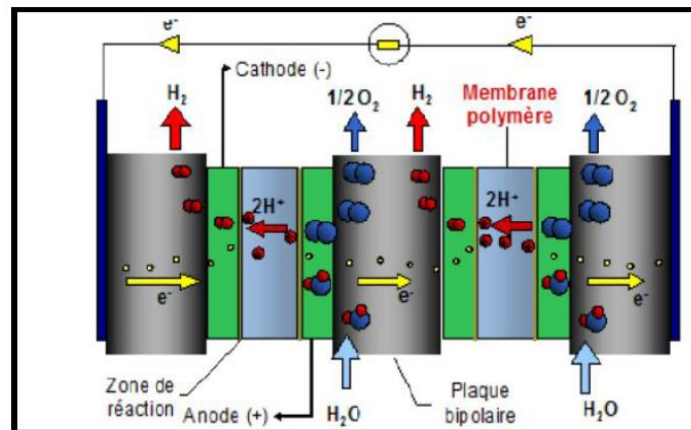
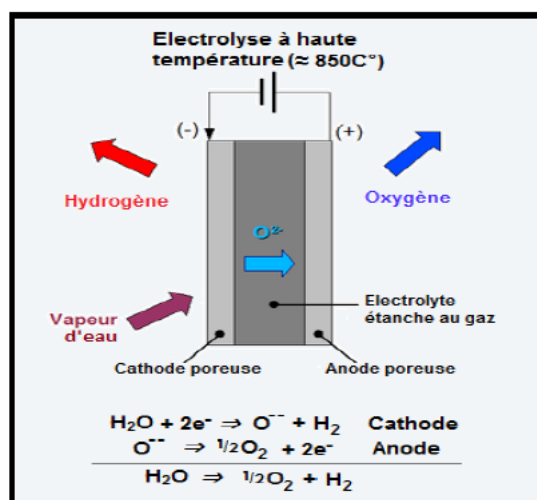


Figure II.6 : Schéma de principe de l'électrolyse PEM.

#### II.3.5.4.3. Electrolyse à haute température (PCFC ou SOFC) :

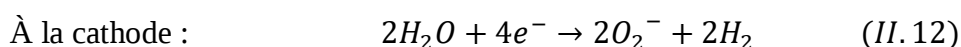
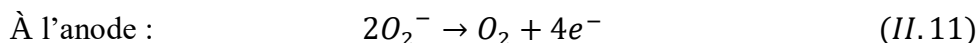
L'électrolyse à haute température est plus efficace que le procédé à température ambiante puisqu'une partie de l'énergie nécessaire à la réaction est apportée via la chaleur, moins chère. Ce type de technologie est la pile à combustible de type PCFC ou SOFC (solid oxide fuel cell) (Figure II.7), qui fonctionne dans deux gammes de température 400–600 (°C) et 650–1000 (°C) respectivement avec un rendement qui peut atteindre plus que 80 (%). Il peut être alimenté par l'électricité et par la chaleur en même temps, ce qui le place comme centre d'intérêt important dans des plusieurs groupes de recherche.



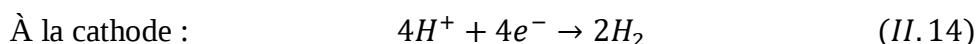
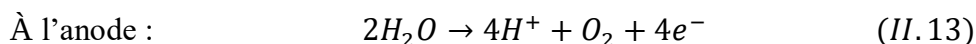
**Figure. II.7 :** Le principe d'électrolyse à haute température

L'électrolyse à haute température est basée sur la décomposition des molécules d'eau sous forme vapeur à la cathode selon la nature de l'électrolyte. Les réactions au niveau des électrodes sont en fonction du type d'électrolyte:

Electrolyte à conduction d'ions super-oxydes :



Electrolyte à conduction protonique :



L'élévation de la température minimise l'ensemble des surtensions d'électrodes. La grande partie de l'énergie d'électrolyse est apportée par la chaleur qui est moins chère que l'électricité. La nature des cathodes sont à base de billes de nickel ou de cobalt, d'oxyde de cérium, alors que les anodes sont à base de chromite de lanthane, soit de manganites, ou bien des matériaux céramiques qui annulent le problème de corrosion sauf que la fragilité de ces matériaux limite la taille des cellules concevables [27].

#### II.4. Stockage de l'hydrogène :

Le stockage de l'hydrogène en particulier dans le cadre des applications mobiles, est l'un des principaux défis scientifique et technologiques à relever. Son importance découle de la recherche, notamment pour le secteur du transport comme pour un réservoir compact, léger, économiquement accessible et répondant aux exigences de sécurité. Les techniques de

stockages conventionnelles ne permettent pas d'atteindre cet objectif. La recherche de nouvelles techniques de stockages sont en cours. Les critères de sélection sont sur le niveau des densités volumiques et gravimétriques de l'hydrogène, le dispositif de stockage, l'efficacité et la vitesse de chargement et déchargement. Différents modes de stockages d'hydrogène existent, parmi ces modes on a : [20]

#### II.4.1. Stockage conventionnel

C'est le mode le plus utilisé. Il est surtout approprié pour de grandes quantités. Il Y'a deux méthodes différentes :

- **Stockage sous compression :** dans ce cas, l'hydrogène est encore sous forme gazeuse. Il est comprimé à une pression variante entre 200 (bars) et 350 (bars). A cette pression, la densité d'hydrogène dépasse 11 ( $\text{Kg/m}^3$ ), ce qui représente une augmentation de la densité d'un facteur 130 fois plus élevé que la densité à une pression normale. La densité volumique reste ni au moins faible pour les applications de transport. Cependant, les réservoirs capables de supporter les pressions supérieures à 450 (bars) sont en cours de développement. De plus, à fin de réduire (alléger) plus le poids du système de stockage, les développements sont en cours pour l'introduction de polymères et des fibres de carbone dans la structure des réservoirs qui sont actuellement en métal alliage.
- **Stockage sous forme liquide :** l'hydrogène est liquéfié à 20 (K) avant son stockage dans un réservoir d'acier à double paroi. L'espace entre les murs est rempli de matériaux isolants, d'azote liquide ou conservé sous vide. Les matériaux composites sont sous développements pour fabriquer des réservoirs plus légers sous forme liquide. La densité de l'hydrogène s'élève à environ 71 ( $\text{Kg/m}^3$ ), ce qui rend possible d'avoir des citernes répondant aux exigences du secteur de transport une fois le problème de pertes résolu. Cependant, la nécessité de maintenir la température basse et limité les pertes de vaporisation d'une part, et réduire le cout énergétique exorbitant de la liquéfaction d'autre part, fait que ce mode de stockage se conforme de manière optimale aux critères de stockage pour une consommation d'énergie d'hydrogène à grande d'échelle.

#### II.4.2. stockage par adsorption :

Il s'effectue par la concentration d'hydrogène par absorption à la surface d'un adsorbant approprié. Si l'adsorption de l'hydrogène par une grande variété de matériaux est en théorie possible, seule l'adsorption par le carbone est significative et peut alors être considérée pour les applications technologiques.

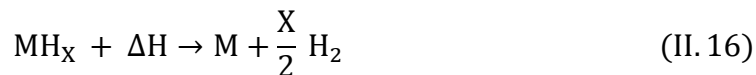
Dans les conditions normales, des densités d'environ 0.5 (%) en poids ont été obtenues. Mais à très basse température et haute pression, la densité augmente jusqu'à 8 (%). Donc, pour que ce mode de stockage soit efficace, il est important de développer des adsorbants avec de grandes zones spécifiques. Dans ce sens, les nanotubes et les nano fibres sont sous considération pour le stockage de l'hydrogène. Ces matériaux, bien que prometteurs, sont toujours à l'état de recherche et développement.

#### II.4.3. stockage par hydrure :

C'est le stockage sous forme atomique de l'hydrogène dans des composés connus sous le nom d'hydrure. Pendant le processus de formation de ce dernier, la réaction suivante a lieu:



Le processus de décharge d'hydrogène peut être représenté par la réaction suivante :



Lors des processus de chargement et déchargement, la pression P est liée à la température T par l'équation de Van't Hoff :

$$\ln P = \frac{\Delta H}{RT} - \frac{\Delta S}{R} \quad (II. 17)$$

Où:  $\Delta H$  et  $\Delta S$  sont respectivement l'enthalpie et l'entropie du processus d'hydruration.

R est la constante du gaz.

Il y'a deux classe d'hydrure. Il y'a les hydrures métalliques et les hydrures complexes :

- Hydrures métalliques: ce sont des hydrures à liaisons métalliques. Ces hydrures, agissant comme une éponge, sont capables d'absorber les atomes d'hydrogène dans les défauts du réseau. L'absorption d'hydrogène, connue aussi comme l'hydruration, a lieu à des températures et pressions caractéristiques. Plusieurs familles d'hydrures de métal existent ou sont en cours de développement. Si la capacité de stockage des

hydrures métalliques est très satisfaisante, leur densité volumique et leur capacité de désorption sont loin de cela.

- Hydrures complexes : ils sont des structures avec des métaux alcalins (généralement lithium et sodium). L'hydrogène est un élément du groupe 13 (généralement le bore et l'aluminium). Son stockage dans les hydrures complexes est effectué par des réactions chimiques et l'occupation du site sans treillis comme le cas dans les hydrures métalliques. Dans ce cas, le processus est également limité par les faibles densités d'énergie, la lenteur cinétique de remplissage et le coût élevé des hydrures.
- Autres procédés de stockage : Autres types d'hydrures tels que la famille des aminoboranes ( $\text{NH}_3\text{BH}_3$ ) sont en cours de développement. Ils constituent un moyen très prometteur de stockage de l'hydrogène en particulier pour les applications. En effet, certains de ces hydrures, tels que le composé  $\text{NH}_3\text{BH}_3$  peuvent absorber au moins 20 (%) en poids, sont stables dans des conditions normales et peuvent désorber à des températures modérées.

L'hydrogène est utilisable soit directement dans des moteurs à combustion interne soit comme combustible dans une pile à combustible (PAC). Une PAC est un générateur électrochimique d'énergie permettant de transformer directement l'énergie chimique d'un combustible (hydrogène, hydrocarbures, alcools,...) en énergie électrique et thermique sans apport d'énergie extérieure.

## **II.5. Les applications d'hydrogène :**

L'hydrogène peut être converti en électricité, en chaleur ou en force motrice selon l'usage final. Comme il peut être aussi utilisé de deux différentes manières : [20]

- Comme produit chimique dans l'industrie : là il entre en tant que réactif dans les procédés chimiques tels que le raffinage du pétrole ou la production d'ammoniac.
- Comme vecteur d'énergie : dans ce cas, l'hydrogène est un carburant ou une source d'énergie.

Actuellement, l'hydrogène est presque entièrement utilisé pour des fins industrielles. L'application majeure de l'énergie est limitée au secteur spatial, cependant, l'hydrogène va jouer un rôle central, il est placé pour devenir un vecteur énergétique universel.

### II.5.1.Applications chimiques

L'hydrogène peut réagir avec de nombreux éléments non métalliques. Il forme de l'ammoniac en se combinant avec l'azote en présence d'un catalyseur, du sulfure d'hydrogène en se combinant avec le soufre, du chlorure d'hydrogène en se combinant avec le chlore, et de l'eau en se combinant avec l'oxygène. La réaction entre l'hydrogène et l'oxygène se produit à température ambiante en présence d'un catalyseur tel que le platine finement divisé. Lorsqu'un mélange d'hydrogène et d'air ou d'oxygène est enflammé, une explosion se produit. L'hydrogène peut également se combiner avec certains métaux tels que le sodium et le lithium pour former des hydrures. Il agit comme un agent réducteur sur les oxydes métalliques, tels que l'oxyde de cuivre, en entraînant l'oxygène et en laissant le métal sous forme libre. L'hydrogène réagit également avec des composés organiques insaturés pour former les composés saturés correspondants.

Dans de nombreuses réactions d'électrolyse, l'hydrogène est un sous-produit important. Des quantités considérables d'hydrogène sont utilisées dans la synthèse de l'ammoniac et du méthanol. L'hydrogénation des huiles pour la production de graisses comestibles, la transformation du charbon en pétrole de synthèse et l'enrichissement de la fraction d'essence des huiles de pétrole sont des procédés qui nécessitent de grandes quantités d'hydrogène.

### II.5.2.Utilisations énergétiques

#### II.5.2.1. Piles à combustibles :

Il s'agit d'une combustion électrochimique contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec une production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur selon une réaction chimique universellement connue :



Cette réaction s'opère au sein d'une structure essentiellement composée de deux électrodes (l'anode et la cathode) séparées par un électrolyte. C'est la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau.

Cette réaction électrochimique peut intervenir dans une large gamme de températures, de 70 (°C) à 1000 (°C). Selon le niveau de température retenu, la nature de l'électrolyte et des électrodes, les réactions chimiques intermédiaires mises en jeu varient mais le principe reste inchangé.

Le Tableau II.3 ci-après détaille les divers types de piles couramment développées. Toutes ces piles fonctionnent généralement autour d'un même point qui correspond à un rendement brut de l'ordre de 50 (%) [20].

| Type de pile                         | Electrolyte                        | T (°C)     | Domaine d'utilisation                                           |
|--------------------------------------|------------------------------------|------------|-----------------------------------------------------------------|
| Alcaline (AFC)                       | Potasse<br>(liquide)               | 80         | Espace, transport.<br>Gamme : 1-100 (KW)                        |
| Acide polymère<br>(PEMFC et<br>DMFC) | Polymère<br>(solide)               | 80         | Portable, transport,<br>stationnaire<br>Gamme : 10 (MW)-100(KW) |
| Acide<br>phosphorique<br>(PAFC)      | Acide<br>phosphorique<br>(liquide) | 200        | Stationnaire, transport<br>Gamme : 200 (KW) –10<br>(MW)         |
| Carbonate<br>fondu (MCFC)            | Sels fondus<br>(liquide)           | 650        | Stationnaire<br>Gamme : 500 (KW)-10<br>(MW)                     |
| Oxyde<br>solide(PCFC)                | Céramique<br>(solide)              | 400 à 600  | Stationnaire, transport.<br>Gamme : 1 (KW) -10(MW)              |
| Oxyde<br>solide(SOFC)                | Céramique<br>(solide)              | 600 à 1000 | Stationnaire, transports.<br>Gamme : 1(KW)-10(MW)               |

**Tableau II.3 : les différents types de piles à combustibles [41].**

#### **II.5.2.2. Autres applications énergétiques :**

Les domaines potentiels d'application de l'hydrogène comme énergie sont extrêmement nombreux et variés, à commencer par tous ceux qui sont déjà couverts par le pétrole (et ses dérivés) et le gaz : [20]

- Le transport, avec des moteurs thermiques alimentés directement en hydrogène, comme le démontre le constructeur BMW depuis des années, ou avec des piles à combustibles couplées ou non à des batteries dans des montages hybrides, comme l'ont démontré une quinzaine de constructeurs automobiles dans le monde.
- L'industrie, qui consomme aujourd'hui la quasi-totalité de l'hydrogène produit dans le monde et qui pourrait reconverter sans grande difficultés ses systèmes actuellement alimentés en fuel ou gaz naturel.

- L'agriculture, qui, à travers des engrais, utilise déjà des sous-produits de l'hydrogène, comme des dérivés de l'ammoniac.

## **II.6.Conclusion :**

Il existe plusieurs procédés de production d'hydrogène, chacun avec ses avantages et ses limites. Parmi les procédés industriels largement utilisés, on trouve le reformage à la vapeur du gaz naturel, l'électrolyse de l'eau et la gazéification du charbon. Chacun de ces procédés a ses propres caractéristiques et conditions opératoires spécifiques.

Le reformage à la vapeur est couramment utilisé en raison de la disponibilité et du faible coût du gaz naturel. Cependant, il génère également du monoxyde de carbone, nécessitant une étape supplémentaire pour convertir ce dernier en dioxyde de carbone afin de produire de l'hydrogène pur.

L'électrolyse de l'eau est un procédé électrochimique qui utilise un courant électrique pour décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène. Il offre une voie de production d'hydrogène respectueuse de l'environnement, en particulier lorsqu'il est alimenté par des sources d'énergie renouvelables. Cependant, il nécessite encore des améliorations pour réduire les coûts et augmenter l'efficacité.

La gazéification du charbon est une méthode qui permet de produire de l'hydrogène à partir du charbon, mais elle est souvent associée à des émissions de dioxyde de carbone et d'autres polluants. Des technologies de capture et de stockage du carbone sont nécessaires pour atténuer l'impact environnemental de ce procédé.

De plus, des recherches sont en cours pour explorer de nouvelles voies de production d'hydrogène, telles que la photo-catalyse et les technologies basées sur des organismes vivants. Ces approches offrent des perspectives intéressantes, mais nécessitent encore des développements supplémentaires pour devenir des solutions commerciales viables.

## Chapitre III : Présentation du système panneau photovoltaïque

### III.1.Introduction :

En 1839, le physicien français A. Becquerel fit la découverte de l'effet photovoltaïque, qui fut à l'origine des cellules solaires. Le terme "photovoltaïque" est dérivé de "photo" (du grec "phos" signifiant "lumière") et de "Volt" (en honneur du physicien Alessandro Volta, ayant joué un rôle important dans les recherches sur l'électricité).

À leurs débuts, les cellules solaires furent conçues pour alimenter en électricité les satellites pendant plusieurs années, et leur développement suivit les progrès de l'industrie des semi-conducteurs, en particulier celle du silicium. Les grandes entreprises électroniques manifestèrent d'abord un intérêt pour cette technologie afin de fournir de l'énergie à des sites isolés (mesures, télécommunications, balises, etc.), mais leur intérêt fut ravivé dans les années 1970 à la suite des chocs pétroliers.

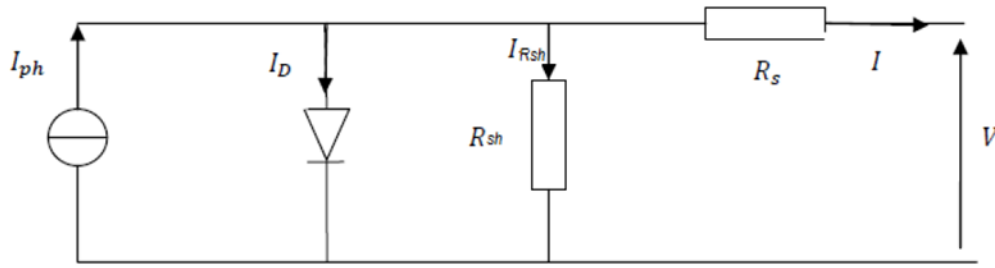
Depuis lors, des sociétés spécialisées dans les cellules solaires ont émergé aux États-Unis, au Japon et en Europe. Alors que la technologie des cellules solaires en silicium est maintenant bien maîtrisée, les développements futurs visent à améliorer leur efficacité et à réduire les coûts de fabrication. Parallèlement, de nouvelles cellules solaires utilisant des phénomènes similaires à la photosynthèse pourraient faire leur apparition sur le marché au cours de la prochaine décennie, si les avancées prometteuses en laboratoire se concrétisent en produits industriels.

### III.2.Modèle électriques d'une cellule photovoltaïque :

La figure III.1 présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. Il correspond à un générateur de courant  $I_{ph}$  monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma.

Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique  $I = f(V)$  de la cellule [42] :

- La résistance montée en série ( $R_s$ ) représente la résistance de contact et de connexion.
- La résistance shunt ( $R_{sh}$ ) montée en parallèle représente le courant de fuite.
- Une diode en parallèle qui modélise la jonction PN



**Figure III.1 :** Schéma équivalent électrique de la cellule PV à une diode.

La loi de Krichhoff nous permet d'écriture la relation suivante :

$$I_{ph} = I_D + I_{Rsh} + I \quad \text{Donc} \quad I = I_{ph} - I_D - I_{Rsh} \quad (\text{III. 1})$$

L'expression résultante a une caractéristique courant-tension (I-V) après tout calcul est :

$$I = I_{sat} \left[ \exp \left( \frac{V + (I * R_s)}{nV_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + (I * R_s)}{R_{sh}} \quad (\text{III. 2})$$

Les expressions de ( $I_{ph}$ ) et de ( $I_{sat}$ ) le courant de saturation de la diode sont donnés par :

$$I_{ph} = [I_{sc} + (K_i * (T - 298))] * \frac{G}{1000} \quad (\text{III. 3})$$

$$I_{sat} = \left( I_{sat} * \exp \left[ \left( \frac{V_{co}}{nV_t} \right) \right] - 1 \right) * \left( \frac{T}{298} \right)^3 * \exp \left[ \frac{q * E_g * \left( \frac{1}{298} - \frac{1}{T} \right)}{n * K} \right] \quad (\text{III. 4})$$

Dou :

$I_{ph}$ : photo courant produit.

$I_{sat}$  : courant de saturation de la diode.

$R_s, R_{sh}$  : La résistance série et la résistance parallèle, respectivement.

$V_t = KT/q$  tension thermique a la température T.

q : Charge de l'électron ( $1.602 * 10^{-19}$  (C))

K : Constante de Boltzmann ( $1.381 * 10^{-23}$  (J/k))

$K_i$  : Constante ( $1.2$  (A/cm<sup>2</sup>K<sup>3</sup>))

n : facteur de non idéalité de la jonction

T : Température effective de la cellule en degré Kelvin

$E_g$  : énergie de gap (pour le silicium cristallin est égale à 1.12 (eV))

$G$  : l'ensoleillement en ( $W/m^2$ )

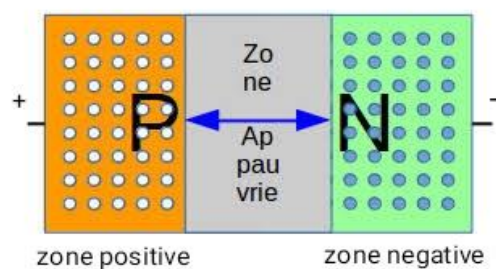
### III.3.Le diode :

Une diode est un composant électronique agissant comme une valve unidirectionnelle, présentant une résistance élevée d'un côté et une résistance faible de l'autre, permettant ainsi le passage du courant dans un seul sens. Les diodes sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs tels que le germanium, le silicium et le sélénium [43].

La diode est l'un des éléments électroniques les plus largement utilisés dans le domaine de l'électronique de puissance. Elle est couramment utilisée dans les circuits redresseurs pour convertir le courant alternatif en courant continu. Elle est également utilisée comme un interrupteur électronique ou pour protéger d'autres composants contre les surtensions et les courants transitoires.

#### III .3.1.Composition des diodes:

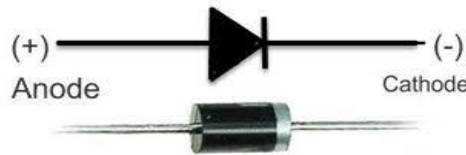
La diode est constituée de deux couches P-N de semi-conducteurs tels que le silicium ou le germanium, dont l'une est de type positif et l'autre de type négatif, formant ce qu'on appelle une jonction P-N positive-négative, L'extrémité de jonction positive de la diode s'appelle l'anode (A) tandis que l'extrémité de jonction négative s'appelle la cathode (K) et entre elle se trouve une région tampon appelée région d'appauvrissement.



**Figure III.2 : Les deux pôles de diode. [44]**

#### III .3.2.Symbole de diode:

La pointe de flèche désigne l'électrode positive, également appelée anode, qui indique la direction du courant dans l'état de polarisation directe. L'autre extrémité correspond au pôle négatif ou à la cathode, comme illustré dans l'image.



*Figure III.3 : Symbole de diode [45].*

### **III .3.3.Types de diodes dans le système solaire :**

#### **III .3.3.1. Diodes de dérivation :**

Elles sont placées à l'intérieur d'une boîte noire à l'arrière du panneau solaire. Ces diodes sont utilisées pour connecter les groupes de cellules solaires entre eux, de sorte que chaque groupe de 14 à 20 cellules solaires soit relié à une seule diode en dérivation latérale [46].

Le rôle de ces diodes est de contourner les cellules solaires qui sont ombragées. Lorsqu'une ou plusieurs cellules solaires sont exposées à l'ombre, la diode correspondante va contourner ce groupe de cellules ou cette rangée exposée à l'ombre. Ainsi, la production d'énergie n'est pas entièrement perdue, mais seulement celle du groupe ombragé. Les autres rangées ou groupes de cellules continuent de générer du courant, qui peut circuler à travers le système de diodes sans être affecté par les cellules ombragées.

Cette configuration réduit les pertes d'énergie et limite la génération de chaleur dans les cellules et les rangées ombragées. Cependant, l'utilisation de diodes dans les panneaux solaires peut entraîner une légère diminution de la tension totale. De plus, il n'est pas pratique de connecter chaque cellule à une diode individuelle en raison du coût élevé associé à cette méthode.

Malgré ces considérations, l'utilisation de diodes dans les panneaux solaires présente des avantages significatifs en termes d'optimisation de la production d'énergie et de prévention des pertes causées par l'ombrage partiel des cellules solaires.

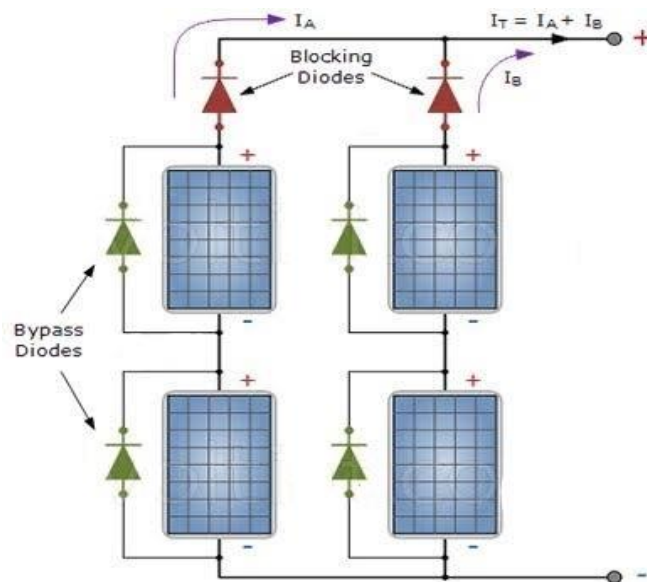
#### **III .3.3.2.diodes de blocage :**

Contrairement aux diodes de dérivation dont nous avons parlé précédemment, les diodes de blocage sont installées à l'extérieur des panneaux solaires plutôt que dans la boîte de jonction.

Les panneaux solaires sont généralement connectés en série pour augmenter la tension globale. Lorsque plusieurs panneaux sont connectés en parallèle ou en dérivation et qu'une partie de ces panneaux est exposée à l'ombre, le courant généré par les panneaux non ombragés peut inverser le flux vers les panneaux ombragés. Cela entraîne une augmentation de la température dans la zone ombragée, pouvant endommager les panneaux.

Les diodes de blocage sont utilisées pour empêcher ce courant de passer vers les panneaux solaires ombragés. Elles agissent comme une barrière unidirectionnelle, permettant au courant de circuler dans une seule direction, empêchant ainsi le courant des panneaux non ombragés de s'écouler vers les panneaux ombragés. Cela protège la section ombragée de la matrice solaire contre les élévations de température dommageables. De plus, les diodes de blocage sont également utilisées pour éviter que le courant des batteries ne retourne aux panneaux solaires la nuit. Si le courant des batteries était autorisé à revenir vers les panneaux solaires, cela pourrait provoquer une augmentation de la température des panneaux et potentiellement les endommager.

Ainsi, les diodes de blocage jouent un rôle crucial dans la protection des panneaux solaires contre les surtensions, les pertes de puissance et les dommages potentiels causés par l'ombrage ou le courant inverse provenant des batteries.



**Figure III.4 :** Types de diodes dans le système solaire. [47]

### **III.4.Ensoleillement :**

L'ensoleillement (irradiance solaire) est la durée de la lumière du soleil dans une journée. Cette insolation implique la lumière directe du soleil non interrompue par les nuages, en particulier sur une zone relativement grande. En plus de la lumière, il implique les rayons directs et la chaleur donnés par les rayons du soleil [48].

#### **III.4.1.L'ensoleillement de l'aube :**

En effet, l'ensoleillement commence au lever du jour, au moment où le soleil commence à se lever à l'horizon. Cela se produit lorsque la Terre tourne sur son axe et que la région où vous vous trouvez est exposée à la lumière solaire directe. L'intensité de l'ensoleillement dépend de divers facteurs, notamment la position de la Terre par rapport au Soleil, l'angle d'incidence des rayons solaires et les conditions atmosphériques.

Lorsque le ciel est dégagé et sans nuages, la lumière solaire peut atteindre la surface de la Terre sans entraves majeures, ce qui crée une intensité d'ensoleillement plus élevée. Cependant, la présence de nuages peut créer une ombre partielle ou totale, ce qui réduit l'intensité de l'ensoleillement en raison de la diffusion et de la réflexion des rayons solaires.

L'ensoleillement atteint son maximum autour du midi solaire, lorsque le Soleil est à son point le plus élevé dans le ciel. Par la suite, il diminue progressivement jusqu'au crépuscule, lorsque le Soleil se couche à l'horizon. La durée et l'intensité de l'ensoleillement peuvent varier en fonction de la saison, de la latitude et des conditions météorologiques locales.

Il est important de noter que la quantité d'énergie solaire reçue dépend également de la durée de la journée, car pendant la nuit, lorsque la région est dans l'obscurité, il n'y a pas d'ensoleillement direct.



**Figure III.5 : L'ensoleillement de l'aube**

### III.4.2.Insolation :

Effectivement, une insolation est une mesure physique qui représente la quantité de rayonnement solaire direct reçue par unité de surface horizontale. Elle est généralement exprimée en kilowattheures par mètre carré (kWh/m<sup>2</sup>) ou en mégajoules par mètre carré (MJ/m<sup>2</sup>).

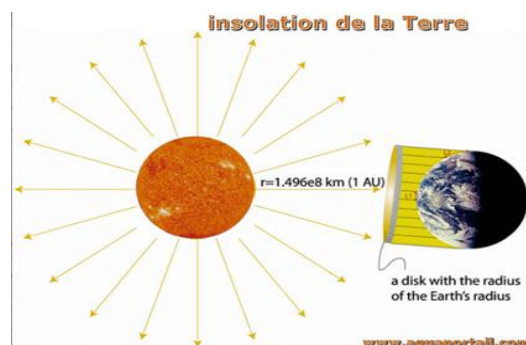
L'insolation est une mesure relative qui indique la proportion de l'irradiation solaire directe maximale qui atteint une position spécifique sur la Terre. Cette valeur dépend de la position du soleil dans le ciel, qui est déterminée par l'azimut (direction horizontale) et l'élévation solaire (angle vertical par rapport à l'horizon).

L'irradiation solaire directe maximale correspond à la quantité maximale de rayonnement solaire direct qui peut être reçue au niveau de la surface terrestre en l'absence d'obstacles tels que les nuages, les bâtiments ou les arbres. L'insolation est donc une mesure de la quantité réelle de rayonnement solaire direct qui parvient à une certaine position, en tenant compte des facteurs d'obstruction potentiels.

L'insolation est utilisée pour évaluer le potentiel d'utilisation de l'énergie solaire dans une région donnée, que ce soit pour la production d'électricité solaire, le chauffage solaire ou d'autres applications solaires. Elle est également utilisée dans la conception de systèmes solaires et dans l'évaluation de l'efficacité des installations solaires existantes.

### III.4.3.L'insolation de la Terre :

Puisque la Terre tourne, l'insolation est répartie sur une surface 4 fois plus grande que le disque (représenté dans le schéma ci-dessus), donc la constante solaire se traduit par une valeur de 343 (W/m<sup>2</sup>) [48].



**Figure III.6 :** L'insolation de la Terre

### III.5.Rayonnement solaire :

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1 391 000 (km) (100 fois celui de la Terre), sa masse est de l'ordre de  $2.10^{27}$  tonnes. Toute l'énergie du Soleil provient de réactions thermonucléaires qui s'y Produisent.

Elles transforment à chaque seconde  $564.10^6$  tonnes d'hydrogène en  $560.10^6$  tonnes d'Hélium, la différence de 4 millions de tonnes est dissipée sous forme d'énergie ( $E = mc^2$ ), ce qui représente une énergie totale de  $36.10^{22}$  (KW).

La Terre étant à une distance de  $150 .10^6$  (km) du Soleil, elle reçoit une énergie de  $1,8.10^{17}$  (Watt). La valeur du flux de rayonnement solaire  $E$  reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 (km) d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne  $E_0$  est appelée la constante solaire, elle vaut  $E_0 = 1353$  ( $W.m^{-2}$ ). En première approximation, on peut calculer la valeur de  $E$  en fonction du numéro du jour de l'année par :  
[49]

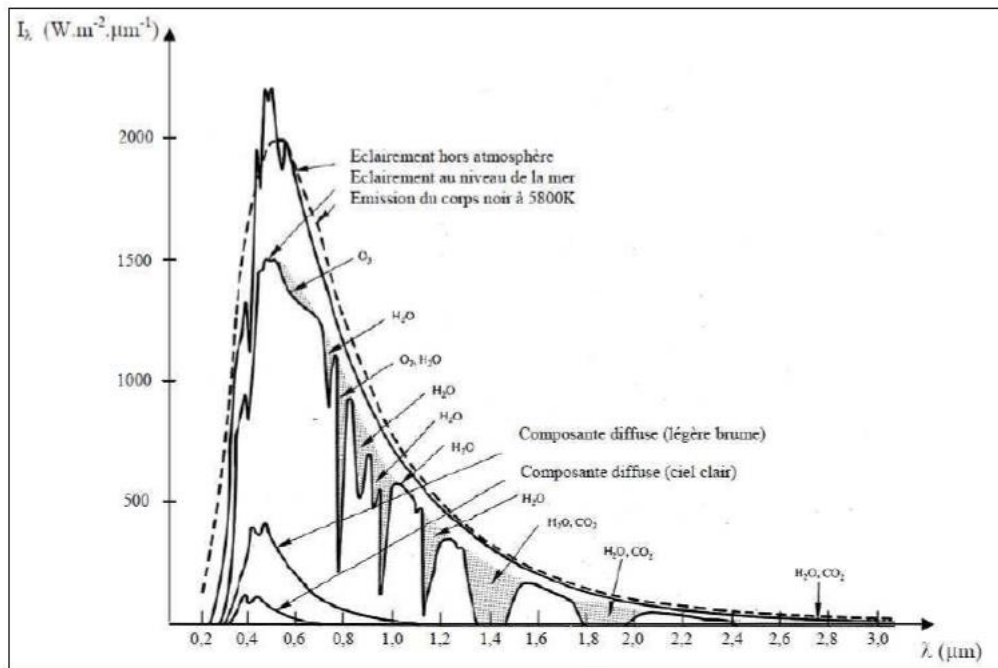
$$E = E_0[1 + 0,033 \cos (0,984j)] \quad (III.5)$$

$j$  : jour de l'année

#### III.5.1.Caractéristiques du rayonnement solaire :

##### III.5.1.1.Composition :

Le rayonnement solaire se compose de radiations électromagnétiques émises par le soleil, dont le spectre s'étend des plus petites longueurs d'ondes (rayons gamma) vers les grandes ondes radioélectriques. Les parties de ce spectre qui jouent un rôle dans l'interaction du rayonnement solaire avec l'environnement terrestre sont essentiellement les bandes infrarouges, visibles et ultraviolettes, ainsi que la gamme radioélectrique et celles des microondes lorsque ce rayonnement traverse l'atmosphère pour atteindre la surface terrestre, il est fortement atténué en raison des phénomènes d'absorption et de diffusion par les différents constituants de celle-ci. On trouvera sur la figure (III.7) la répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre avec indication des gaz partiellement opaques qui filtrent ce rayonnement selon la longueur d'onde [50].



**Figure III.7 :** Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre

### III.5.1.2. Dualité de la lumière :

La lumière peut être considérée sous forme d'ondes électromagnétiques de longueur d'onde  $\lambda$  ou sous forme de photons, corpuscules possédant une énergie  $E$  liée à  $\lambda$  par la relation suivante :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{III. 6})$$

Avec :

$h$  : Constante de Planck [J.s].  $h = 6,62607004 \times 10^{-34} \text{ (m}^2 \text{ kg / s)}$

$c$  : Vitesse de la lumière dans le vide ( $\text{m.s}^{-1}$ ).  $C=3.10^8 \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$

$\nu$  : fréquence ( $\text{s}^{-1}$ )

$\lambda$ : Longueur d'onde (m)

La notion de dualité onde/corpuscule est importante pour comprendre les phénomènes d'interaction entre un rayonnement et un matériau. Les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre 0,2 ( $\mu\text{m}$ ) (ultra-violet) et 4 ( $\mu\text{m}$ ) (infrarouge) avec un maximum d'énergie pour 0,5 ( $\mu\text{m}$ ). 97,5 (%) de l'énergie solaire est comprise entre 0,2 ( $\mu\text{m}$ ) et 2,5 ( $\mu\text{m}$ ). De 0,4 ( $\mu\text{m}$ ) à 0,78 ( $\mu\text{m}$ ), le spectre correspond au domaine du visible.

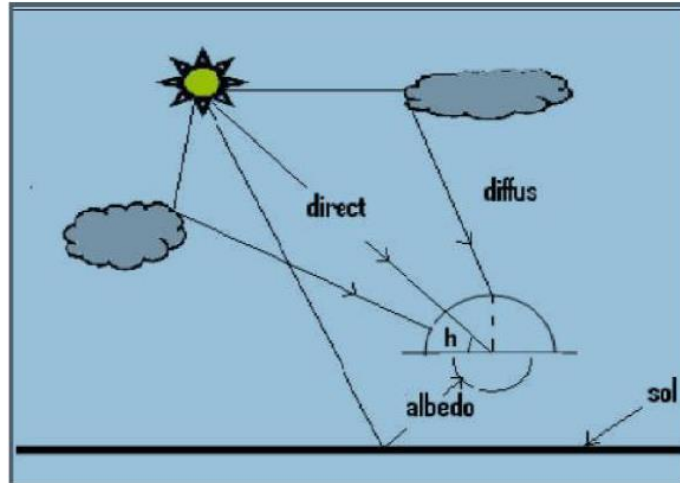
Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons.

Pour que le rayonnement solaire produit un courant électrique dans un matériau donné, il faut qu'un électron lié à son atome (bande de valence) soit arraché pour participer à la conduction du courant, donc il faut lui fournir une énergie minimale (seuil d'énergie) afin qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (la bande de conduction) : c'est l'énergie du gap optique ou largeur de bande interdite  $E_g$ , exprimée en eV. Cette valeur seuil est propre à chaque matériau en raison de la structure électronique différente de chaque type d'atomes. Elle est de 1,1 (eV) pour le silicium cristallin et de 1,7 (eV) pour le silicium amorphe. Dans le cas du silicium, l'énergie minimale nécessaire correspond à l'énergie des photons ayant une longueur d'onde inférieure à 1,1 ( $\mu\text{m}$ ).

### III.5.3. Types du rayonnement solaire :

Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'atmosphère ne transmet pas au sol la totalité du rayonnement solaire qu'elle reçoit. De ce fait le rayonnement solaire peut se décomposer en plusieurs catégories définies comme suites :

- **Le rayonnement direct** : est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.
- **Le rayonnement diffus** : est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules Solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.
- **Le rayonnement réfléchi** : C'est la fraction du rayonnement incident diffusée ou réfléchi par le sol et les nuages. Ce terme étant généralement réservé au sol, c'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possible. Par définition ; le corps noir possède un albédo nul.
- **Le rayonnement global** : est la somme du rayonnement direct, diffus et réfléchi. [49].

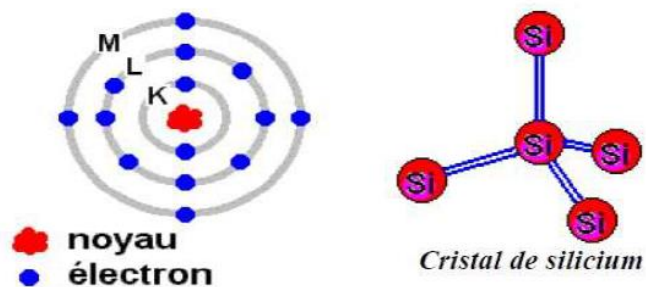


*Figure III.8 : Différents composants du rayonnement.*

### III.6. Conversion photovoltaïque :

#### III.6.1. Semi-conducteur :

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité électrique est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Les quatre électrons de valence du silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec un atome voisin. Dans ce cas, tous les électrons sont utilisés et aucun n'est disponible pour créer un courant électrique [51].



*Figure III.9 : le semi-conducteur (silicium).*

#### III.6.2. Le dopage de semi-conducteur :

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage.

### a) Dopage de type N :

On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent (phosphore p). Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième reste disponible, il sera excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique.

D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre. On obtient ainsi un cristal dopé N (négatif) [51].

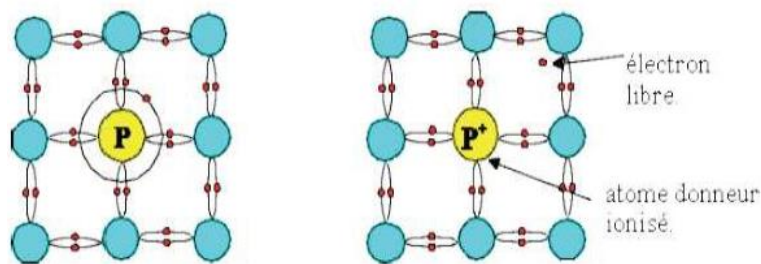


Figure III.10 : dopage de semi-conducteur de type n. [51]

### b) Dopage de type P :

De la même façon on introduit des atomes trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant.

Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore B [51].

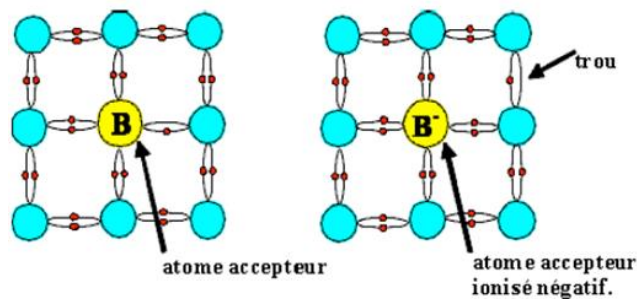
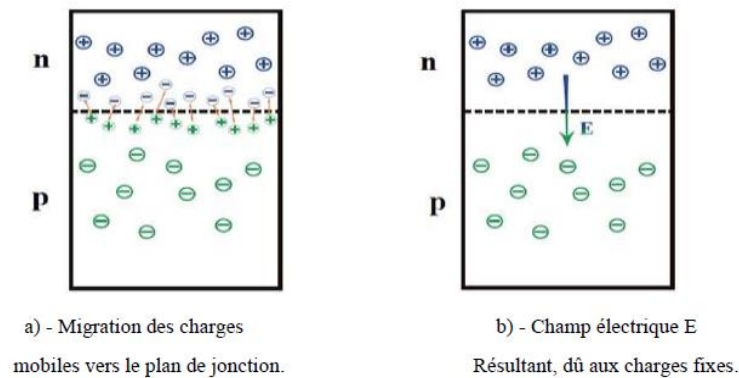


Figure III.11 : dopage de semi-conducteur de type p. [51]

### III.6.3. La Jonction PN :

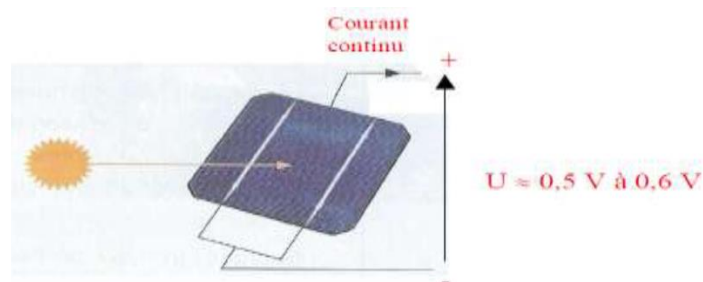
Une jonction PN est l'accolement d'une région dopée P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition. Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créer un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner [51].



*Figure III.12 : La jonction p-n.*

### III.7. Cellule photovoltaïque :

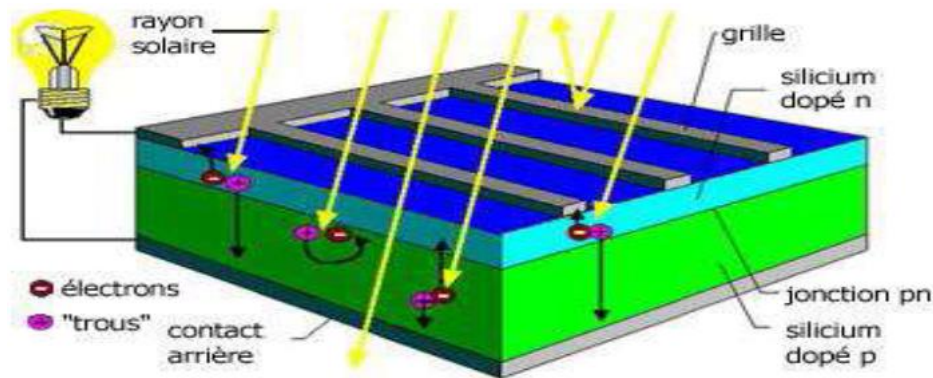
C'est le seul moyen connu actuellement pour convertir directement la lumière en électricité. La cellule photovoltaïque constitue l'élément de base des panneaux solaires photovoltaïques. Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur à base de silicium délivrant une tension de l'ordre de 0,5 à 0,6 (V) (voir figure III. 13) [52].



*Figure III.13 : cellules solaires*

La cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de deux couches de silicium (matériau semi-conducteur):

- ✓ Une couche dopée avec du bore qui possède moins d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée positivement (zone P),
- ✓ Une couche dopée avec du phosphore qui possède plus d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée négativement (zone N). (Figure III-14)



**Figure III.14 :** fabrication d'une cellule photovoltaïque

Lorsqu'un photon de la lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. Les atomes, chargés positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargés négativement, dans la zone N. Une différence de potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique, est ainsi créée. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque. A la surface, le contact électrique (électrode négative) est établi par la grille afin de permettre à la lumière du soleil de passer à travers les contacts et de pénétrer dans le silicium.

Les cellules solaires sont recouvertes d'une couche antireflet qui protège la cellule et réduit les pertes par réflexion. C'est une couche qui donne aux cellules solaires leur aspect bleu foncé. [52]

### **III.7.1. Les types des cellules photovoltaïques :**

Les différentes techniques utilisées de nos jours, ont permis de mettre au point divers types de cellules au silicium : monocristallin, poly-cristallin, amorphe.

Il existe aussi d'autres types de cellules qui utilisent d'autres types de matériaux.

#### **a) Cellule en silicium monocristallin**

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grandes dimensions. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules.

Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme. Les cellules monocristallines sont les plus commercialisés offrant un bon rendement électrique compris entre 10 (%) et 17 (%), mais font appel à une méthode de production plus complexe et donc coûteuse.

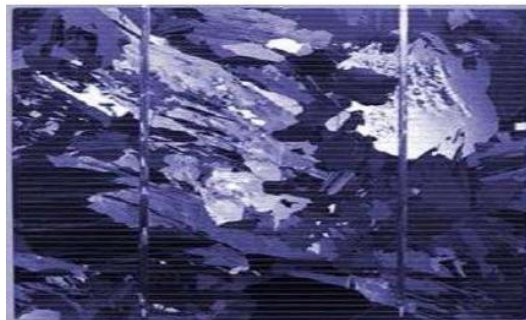
En effet, l'obtention d'un cristal pur nécessite une grande quantité d'énergie [53].



*Figure III.15 : Cellule photovoltaïque monocristalline.*

#### **b) Cellule en poly-cristallin :**

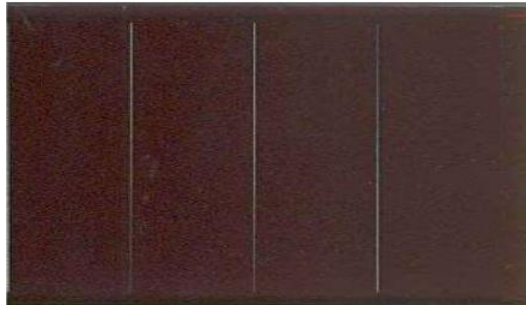
Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux. Les cellules poly-cristallines ont un rendement électrique compris entre 11 (%) et 15 (%). Leur procédé de fabrication consomme moins d'énergie. Elles ont ainsi un coût de production plus faible mais un rendement légèrement inférieur à celui des cellules monocristallines [53].



*Figure III.16 : Cellule photovoltaïque poly-cristallin.*

#### **c) Cellule amorphe :**

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est marronne. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites «solaires», leurs coûts de fabrication sont les plus intéressants, mais elles ont un rendement compris entre 5 et 7 (%) [53].



**Figure III.17 :** Cellule photovoltaïque amorphe.

### **III.8. Les différentes installations photovoltaïques :**

#### **III.8.1. Les installations sur site isolé:**

Ce type de montage est adapté aux installations ne pouvant être raccordées au réseau.

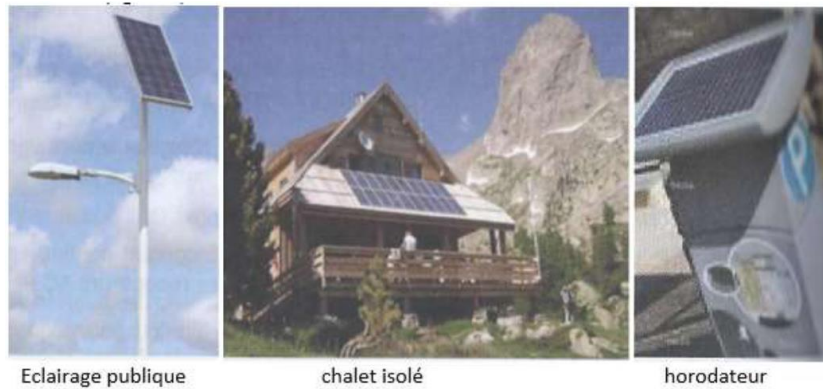
L'énergie produite doit être directement consommée et/ou stockée dans des accumulateurs pour permettre de répondre à la totalité des besoins. Les panneaux photovoltaïques produisent l'électricité en courant continu (voir figure III.18). [54]



**Figure III.18:** Installation sur site isolé

Le régulateur optimise la charge et la décharge de la batterie suivant sa capacité et assure sa protection. L'onduleur transforme le courant continu en alternatif pour alimenter les récepteur AC. Les batteries sont chargées le jour pour pouvoir alimenter la nuit ou les jours de mauvais temps.

Des récepteurs DC spécifiques sont utilisables. Ces appareils sont particulièrement économes (voir figure III.19). [54]



**Figure III.19:** Exemple des installations photovoltaïques

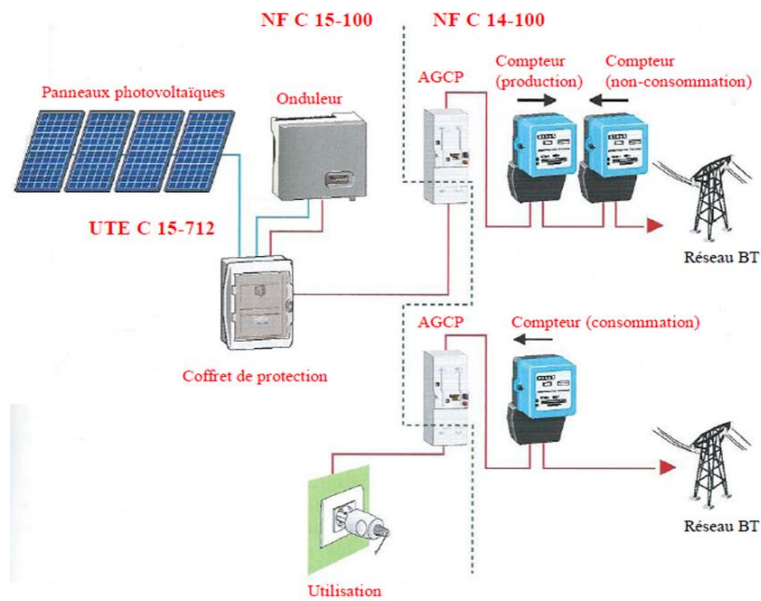
### **III.8.2. Les installations raccordées au réseau de distribution public :**

- **Solution avec injection totale :**

Toute l'énergie électrique produite par les capteurs photovoltaïques est envoyée pour être revendue sur le réseau de distribution.

Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en deux points :

- ✓ Le raccordement du consommateur qui reste identique avec son compteur de consommation (on ne peut pas utiliser sa propre production),
- ✓ Le nouveau branchement permettant d'injecter l'intégralité de la production dans le réseau, dispose de deux compteurs :
  - l'un pour la production,
  - l'autre pour la non-consommation (permet de vérifier qu'aucun soutirage frauduleux n'est réalisé). (Voir figure III.20). [55]



*Figure III.20: l'injection d'énergie dans les réseaux*

- **En bleu :** énergie électrique continue (DC).
- **En rouge :** énergie électrique alternative (AC).



*Figure III.21: Injection d'énergie*

- **Solution avec injection de surplus :**

Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en un point :

L'utilisateur consomme l'énergie qu'il produit avec le système solaire et l'excédent est injecté dans le réseau. Quand la production photovoltaïque est insuffisante, le réseau fournit l'énergie nécessaire. Un seul compteur supplémentaire est ajouté au compteur existant. (Voir figure III.22). [55].



**Figure III.22 :** Injection énergie supplément dans le réseau

### III.9. Bilan thermique du capteur solaire PV/ T :

Pour établir le bilan thermique du capteur solaire PV/T en régime dynamique nous avons adopté les hypothèses suivantes :

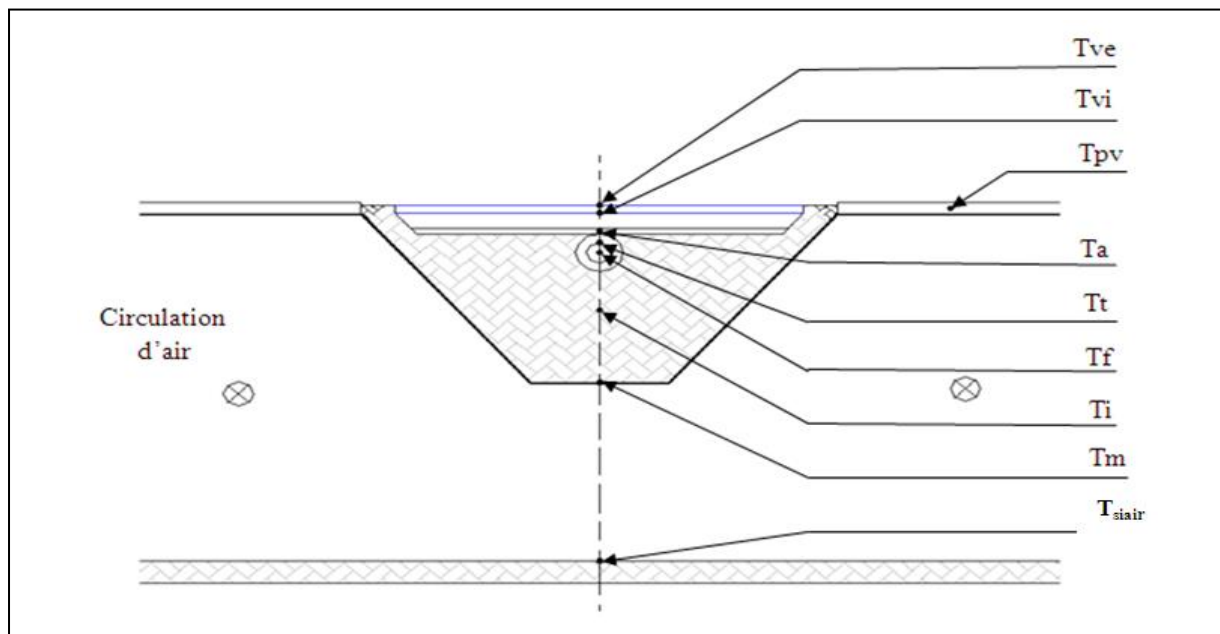
La modélisation est réalisée par analogie électrique en régime dynamique considérant en un certain nombre d'hypothèses :

- Dans le bilan thermique on suppose que la température des composants du capteur solaire PV/T est uniforme du fait que le gradient de la température est négligeable par rapport à l'espace.
- La lame d'air étant de très faible épaisseur, les transferts par conduction et par rayonnement sont prédominants par rapport à la convection. Les transferts thermiques par convection sont par conséquent négligés.
- Les ombres portées dues à la projection de la plaque plane sur l'absorbeur de cuivre dans la nervure sont négligées.
- L'angle d'inclinaison du capteur solaire est pris en compte dans le calcul du rayonnement direct.
- On pose un seul nœud pour le bilan thermique de la tôle métallique qui a une épaisseur très faible ce qui permet de négliger le gradient de température.
- Le maillage de tube est affiné afin d'identifier plus précisément le gradient thermique au niveau de l'absorbeur dans la direction (o, z).

Le tableau III.1 indique la localisation des différents nœuds de température choisis pour la discrétisation des équations établies.

| Nœuds de température | Localisation                                            |
|----------------------|---------------------------------------------------------|
| $T_{pv}$             | Les modules PV et l'absorbeur en acier                  |
| $T_{ve}$             | Le vitrage (face extérieure)                            |
| $T_{vi}$             | Le vitrage (face intérieure)                            |
| $T_a$                | L'absorbeur soudé au tube                               |
| $T_t$                | La paroi intérieure du tube                             |
| $T_f$                | L'eau en sortie du tube                                 |
| $T_i$                | L'isolant dans la nervure                               |
| $T_m$                | La paroi latérale et la moitié de la base de la nervure |
| $T_{sair}$           | La surface de l'isolant sous la lame d'air              |

**Tableau III.1:** Localisation des nœuds de température choisis pour la discrétisation du capteur solaire



**Figure III.23:** Position des nœuds dans le capteur solaire

➤ **Bilan thermique de la vitre (face extérieure)**

$$M_v C_{pv} \frac{dT_{ve}}{dt} = A_v [Ga_{ve} + h_{r,v-c}(T_c - T_{ve}) + h_{vent}(T_{am} - T_{ve}) + h_{d,v}(T_{vi} - T_{ve})] \quad (III. 7)$$

➤ **Bilan thermique de la vitre (face intérieure)**

$$M_v C_{pv} \frac{dT_{vi}}{dt} = A_v [Ga_{vi} + (h_{c,v-a} + h_{r,v-a})(T_a - T_{vi}) + h_{d,v}(T_{ve} - T_{vi})] \quad (III. 8)$$

➤ **Bilan thermique de l'absorbeur**

$$M_a C_{pa} \frac{dT_a}{dt} = (G_a A_a) - [A_a (h_{c,v-a} + h_{r,v-a})(T_a - T_{vi}) - h_{d,a-i}(T_a - T_i) - h_{d,a-t}(T_a - T_t)] \quad (\text{III. 9})$$

➤ **Bilan thermique du tube**

$$M_t C_{pt} \frac{dT_t}{dt} = h_{d,a-t}(T_a - T_t) + h_{c,f-t}(T_f - T_t) + h_{d,t-i}(T_i - T_t) \quad (\text{III. 10})$$

➤ **Bilan thermique du fluide caloporteur**

$$M_f C_{pf} \frac{dT_f}{dt} = h_{c,f-t}(T_t - T_f) - \dot{m} C_{pf}(T_f - T_{fe}) \quad (\text{III. 11})$$

➤ **Bilan thermique de l'isolant**

$$M_i C_{pi} \frac{dT_i}{dt} = h_{d,a-i}(T_a - T_i) + h_{d,t-i}(T_t - T_i) + h_{d,m-i}(T_m - T_i) \quad (\text{III. 12})$$

➤ **Bilan thermique de la tôle métallique**

$$M_m C_{pm} \frac{dT_m}{dt} = [h_{d,m-i}(T_i - T_m) + h_{d,pv-m}(T_{pv} - T_m) + (h_{r,m-siair} - h_{c,m-siair})(T_m - T_{siair})] \quad (\text{III. 13})$$

➤ **Bilan thermique de l'isolant sous la lame d'air**

$$M_{isl} C_{pisl} \frac{dT_{isiair}}{dt} = (h_{c,m-siair} - h_{r,m-isl})(T_m - T_{isl}) - h_{d,siair-sol}(T_{siair} - T_{sol}) \quad (\text{III. 14})$$

➤ **Bilan thermique du module PV**

$$M_{pv} C_{ppv} \frac{dT_{pv}}{dt} = A_{pv} [q_{pv} + h_{vent}(T_{am} - T_{pv}) + h_{r,pv-c}(T_c - T_{pv}) + h_{d,pv-m}(T_m - T_{pv})] \quad (\text{III. 15})$$

### III.9.1. Les coefficients de transfert de chaleur :

#### A. Calcul des coefficients de transfert de chaleur par conduction

➤ **Entre les faces intérieure et extérieure de la vitre**

$$h_{d,v} = \frac{\lambda_v}{\delta_v} \quad (\text{III. 16})$$

$\lambda_v$  et  $\delta_v$  respectivement le coefficient de conductivité thermique et l'épaisseur de la vitre.

➤ **Entre l'absorbeur et le tube**

$$h_{d,a-t} = \frac{2 \cdot \lambda_a}{x} A_{at} \quad (\text{III. 17})$$

Avec :  $x = (l_{arga} - d_e)/4$

$\lambda_a$  , le coefficient de conductivité thermique de l'absorbeur et  $A_{at}$  la surface entre l'absorbeur et le tube.

$l_{arga}$ , la largeur de l'absorbeur et  $d_e$  le diamètre extérieur du tube.

➤ **Entre l'absorbeur et l'isolant**

$$h_{d,a-is} = \frac{2 \cdot \lambda_{is}}{\delta_{is}} A_{ais} \quad (III. 18)$$

$\lambda_{is}$  et  $\delta_{is}$  respectivement le coefficient de conductivité thermique et l'épaisseur de l'isolant

$A_{ais}$ , la surface entre l'isolant et l'absorbeur.

➤ **Entre le tube et l'isolant**

$$h_{d,t-i} = \frac{2 \cdot \lambda_{is}}{\delta_{is}} A_{tis} \quad (III. 19)$$

$A_{tis}$ , la surface entre l'isolant et le tube.

➤ **Entre l'isolant et la tôle métallique**

$$h_{d,m-is} = \frac{(2 \cdot h_{vent} \cdot \lambda_{is})}{(\delta_{is} \cdot h_{vent}) + (2 \cdot \lambda_{is})} A_{mis} \quad (III. 20)$$

$A_{mis}$ , la surface entre l'isolant et la tôle métallique.

➤ **Entre le panneau photovoltaïque et la tôle métallique**

$$h_{d,pv-m} = \frac{\lambda_{pv}}{\delta_{pv}} A_{pv} \quad (III. 21)$$

$\lambda_{pv}$  et  $\delta_{pv}$  respectivement le coefficient de conductivité thermique et l'épaisseur du panneau photovoltaïque.

$A_{pv}$ , la surface du panneau photovoltaïque.

➤ **Entre la surface de l'isolant sous la lame d'air et le sol**

$$h_{d,isl-sol} = \frac{(2 \cdot h_{vent} \cdot \lambda_{is})}{(\delta_{isl} \cdot h_{vent}) + (2 \cdot \lambda_{is})} A_{isl} \quad (III. 22)$$

$\delta_{isl}$  et  $A_{isl}$  respectivement l'épaisseur et la surface de l'isolant sous la lame d'air.

**B. Calcul des coefficients de transfert de chaleur par convection**

➤ **Entre la vitre et l'absorbeur**

$$h_{c,v-a} = \frac{Nu_{air}\lambda_{air}}{b} \quad (III. 23)$$

$\lambda_{air}$  et  $Nu_{air}$  respectivement la conductivité thermique et le nombre de Nusselt de l'air.  
 $b$ , la distance entre l'absorbeur et la vitre.

➤ **Entre le tube et le fluide caloporteur**

$$h_{c,f-t} = \frac{Nu_f\lambda_f}{d_i} A_f \quad (III. 24)$$

$d_i$ , le diamètre intérieur du tube.

$\lambda_f$  et  $Nu_f$  respectivement la conductivité thermique et le nombre de Nusselt du fluide caloporteur.

$A_f$ , la surface du fluide caloporteur.

➤ **Entre la tôle métallique et l'isolant sous la lame d'air**

$$h_{c,m-isl} = \frac{Nu_{fi}\lambda_{fi}}{b_i} A_{isl} \quad (III. 25)$$

$\lambda_{fi}$  et  $Nu_{fi}$  respectivement la conductivité thermique et le nombre de Nusselt de la lame d'air.

$A_{isl}$ , la surface de l'isolant sous la lame d'air.

$b_i$ , la distance entre la tôle métallique et l'isolant sous la lame d'air.

**C. Calcul des coefficients de transfert de chaleur par rayonnement**

➤ **Entre la face extérieure de la vitre et le ciel**

$$h_{r,v-c} = \varepsilon_v \sigma (T_c^2 + T_{ve}^2) (T_c + T_{ve}) \quad (III.26)$$

➤ **Entre la face intérieure de la vitre et l'absorbeur**

$$h_{r,v-a} = \sigma \frac{(T_{vi} + T_a) (T_{vi}^2 + T_a^2)}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_a} - 1} \quad (III. 27)$$

➤ **Entre la tôle métallique et l'isolant sous la lame d'air**

$$h_{r,m-isl} = \sigma \frac{(T_{isl} + T_m) (T_{isl}^2 + T_m^2)}{\frac{1}{\varepsilon_{isl}} + \frac{1}{\varepsilon_m} - 1} \quad (III. 28)$$

➤ **Entre le panneau photovoltaïque et le ciel**

$$h_{r,pv-c} = \varepsilon_v \sigma (T_c^2 + T_{pv}^2) (T_c + T_{pv}) \quad (III. 29)$$

**D. Calcul des puissances absorbées par les matériaux**

En supposant que la surface d'absorbeur est opaque :

$$\alpha_v + \rho_v = 1 \quad (\text{III. 30})$$

$$G_{\text{globale}} = \tau_{\text{direct}} G_{\text{direct}} + \tau_{\text{diffus}} G_{\text{diffus}} \quad (\text{III.31})$$

➤ **Par la face extérieure de la vitre**

$$G_{a_{ve}} = G_{\text{globale}} \alpha_v \quad (\text{III.32})$$

➤ **Par la face intérieure de la vitre**

$$G_{a_{vi}} = \frac{G_{\text{globale}} (1 - \alpha_v)}{[1 - \rho_v (1 - \alpha_v)]} \quad (\text{III. 33})$$

➤ **Par l'absorbeur**

$$G_{a_a} = \frac{G_{\text{globale}}}{[1 - \rho_v (1 - \alpha_a)]} \quad (\text{III. 34})$$

➤ **Par le panneau photovoltaïque**

$$q_{pv} = G_{\text{globale}} \alpha_{pv} - E_{pv} \quad (\text{III. 35})$$

$$E_{pv} = G_{\text{globale}} \tau_v \eta_{0pv} [1 - \varphi_c (T_{pv} - 25)] \quad (\text{III. 36})$$

Avec :

$$\varphi_c = 0.0045^\circ\text{C} - 1 \quad \text{et} \quad \eta_{0pv} = 0.12$$

$$(\alpha\tau)_{pv} = \frac{\tau_v \tau_r \alpha_{pv}}{1 - (1 - \alpha_{pv})r} \quad (\text{III. 37})$$

### III.10. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents composants d'une installation solaire photovoltaïque avec leurs rôles et principes de fonctionnements. Le bon fonctionnement de cette installation requiert un bon dimensionnement de ces composants.

## Chapitre IV : la simulation du système PV à l'aide du logiciel Fortran et du mouvement de la bulle d'hydrogène avec le logiciel COMSOL

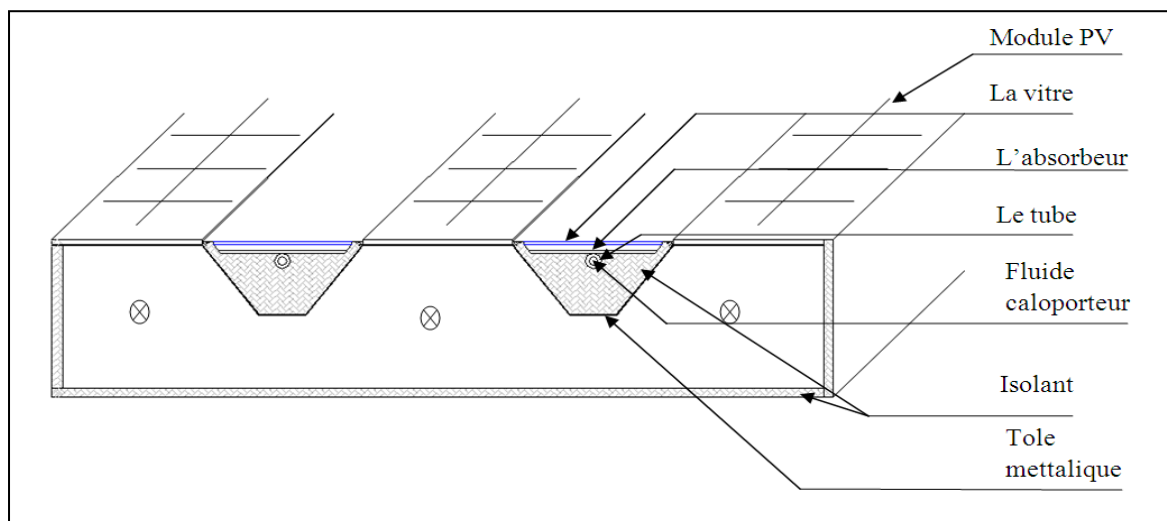
### IV.1 Simulation du système PV :

La modélisation des panneaux PV consiste en la détermination de leurs caractéristiques électriques sous diverses conditions de rayonnement et de température des cellules. Cependant, vu le niveau de modélisation adopté et les objectifs majeurs de notre thèse, nous limitons notre travail à l'analyse, détaillée certes, mais au niveau macroscopique, du comportement électrique des modules PV et de leur productivité électrique sous diverses sollicitations.

Pour le régime transitoire, la plus rigoureuse est une simulation "pas à pas" qui rend compte de l'évolution des températures de tous les éléments du capteur solaire hybride dans le temps.

### IV.2 Résolution numérique :

Les principaux constituants du capteur hybride PV /T sont une couverture transparente, un absorbeur, un fluide caloporteur, un module photovoltaïque, une isolation thermique et d'un coffre (figure IV.1).



*Figure IV.1: Composants d'un capteur solaire*

Divers types de matériaux ont été employés pour la construction des absorbeurs et des tubes constituant les capteurs solaires à eau dès les années 1980. Mais, de nos jours, le matériau le plus utilisé est le cuivre. L'acier inoxydable et le plastique sont utilisés dans le cas où un fluide caloporteur aux propriétés chimiques agressives circulerait dans les tubes.

Dans le cadre de notre étude, le matériau choisi pour l'absorbeur et le tube du capteur solaire à eau est le cuivre afin d'éviter les phénomènes de corrosion notés sur les absorbeurs en acier ou en aluminium en présence des liquides caloporteurs.

Afin d'accroître l'absorption du rayonnement solaire tout en réduisant les déperditions du rayonnement thermique, cet absorbeur est recouvert d'un revêtement sélectif.

L'intensité  $I$  produite aux bornes d'une cellule PV en fonction de la tension de la charge ( $V$ ), est donnée par l'équation (IV.1) :

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[ \left( \frac{q(V + R_S \cdot I)}{\gamma_i \cdot K \cdot T_{\text{cell}}} \right) \right] - \left[ \frac{V + R_S \cdot I}{R_p} \right] \right\} \quad (\text{IV. 1})$$

Où,  $I_L$  est le courant photo-généré des modules PV,  $q$  la charge des électrons ( $1.602 \cdot 10^{-19}$  C) et  $k$  la constante de Boltzmann (égale à  $1.381 \cdot 10^{-23}$  J/K).

Dans les conditions de référence,  $I_0$  le courant de saturation inverse,  $I_{cc}$  le courant de court-circuit et  $\gamma_i$  le facteur d'idéalité de la jonction s'obtiennent en fonction de  $V_{oc}$  la tension en circuit ouvert et de  $V_m$  et  $I_m$  la tension et l'intensité au point de puissance maximale.

Les méthodes de Runge-Kutta (ou RK), d'ordre 2 ou 4, sont très couramment utilisées pour la résolution des équations différentielles ordinaires. Ce sont des méthodes à pas unique, directement dérivées de la méthode d'Euler. Elles ont l'avantage d'être simples à programmer et d'être assez stables pour les fonctions courantes de la physique. Le procédé peut être résumé comme suit :

On part de la formule d'Euler, qui donne:

$$y_{n+1} = y_n + h * f(x_n, y_n) \quad (\text{IV. 2})$$

Et

$$x_{n+1} = x_n + h \quad (\text{IV. 3})$$

La méthode RK du deuxième ordre produit deux coefficients  $k_1$  et  $k_2$ , qui permettent d'écrire:

$$k_1 = h * f(x_n, y_n) \quad (\text{IV. 4})$$

$$k_2 = h * f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}\right) \quad (\text{IV. 5})$$

$$y_{n+1} = y_n + k_2 + O(h^3) \quad (\text{IV. 6})$$

Cette méthode exige donc deux évaluations de  $f$ . L'erreur de consistance est en  $O(h^3)$  et l'erreur globale de convergence est d'ordre  $O(h^2)$ .

Pour obtenir plus de précision, mais en doublant le temps de calcul puisqu'on procède à 4 évaluations de f, voici la méthode RK4:

$$k_1 = h * f(x_n, y_n) \quad (IV. 7)$$

$$k_2 = h * f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}\right) \quad (IV. 8)$$

$$k_3 = h * f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}\right) \quad (IV. 9)$$

$$k_4 = h * f(x_n + h, y_n + k_3) \quad (IV. 10)$$

$$y_{n+1} = y_n + \frac{k_1}{6} + \frac{k_2}{3} + \frac{k_3}{3} + \frac{k_4}{6} + O(h^5) \quad (IV. 11)$$

Résolution peut être envisagée par la méthode de Rung Kutta d'ordre 4. Pour cela il faut mettre le système d'équations précédent sous la forme suivante :

#### ☞ Pour le capteur hybride PV/T

$$F(T_{ve}) = \frac{dT_{ve}}{dt} = \frac{A_v}{M_v C_{p_v}} [Ga_{ve} + h_{r,v-c}(T_c - T_{ve}) + h_{vent}(T_a - T_{ve}) + h_{d,v}(T_{vi} - T_{ve})] \quad (IV. 12)$$

$$F(T_{vi}) = \frac{dT_{vi}}{dt} = \frac{A_v}{M_v C_{p_v}} [Ga_{vi} + (h_{c,v-a} + h_{r,v-a})(T_a - T_{vi}) + h_{d,v}(T_{ve} - T_{vi})] \quad (IV. 13)$$

$$F(T_a) = \frac{dT_a}{dt} = \frac{1}{M_a C_{p_a}} [(Ga_a A_a) - A_a (h_{c,v-a} + h_{r,v-a})(T_a - T_{vi}) - h_{d,a-i}(T_a - T_i) - h_{d,a-t}(T_a - T_t)] \quad (IV. 14)$$

$$F(T_t) = \frac{dT_t}{dt} = \frac{1}{M_t C_{p_t}} [h_{d,a-t}(T_a - T_t) + h_{c,f-t}(T_f - T_t) + h_{d,t-i}(T_i - T_t)] \quad (IV. 15)$$

$$F(T_f) = \frac{dT_f}{dt} = \frac{1}{M_f C_{p_f}} [h_{c,f-t}(T_t - T_f) - \dot{m} C_{p_f}(T_f - T_{fe})] \quad (IV. 16)$$

$$F(T_i) = \frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{M_i C_{p_i}} (h_{d,a-i}(T_a - T_i) + h_{d,t-i}(T_t - T_i) + h_{d,m-i}(T_m - T_i)) \quad (IV. 17)$$

$$F(T_m) = \frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{M_m C_{p_m}} [h_{d,m-i}(T_i - T_m) + h_{d,pv-m}(T_{pv} - T_m) + (h_{r,m-isl} - h_{c,m-isl})(T_m - T_{isl})] \quad (IV. 18)$$

$$F(T_{isl}) = \frac{dT_{isl}}{dt} = \frac{1}{M_{isl} C_{p_{isl}}} [(h_{c,m-isl} - h_{r,m-isl})(T_m - T_{isl}) - h_{d,isl-sol}(T_{isl} - T_{sol})] \quad (IV. 19)$$

$$F(T_{pv}) = \frac{dT_{pv}}{dt} = \frac{A_{pv}}{M_{pv} C_{p_{pv}}} [q_{pv} + h_{vent}(T_a - T_{pv}) + h_{r,pv-p}(T_c - T_{pv})] \\ + \frac{A_{pv}}{M_{pv} C_{p_{pv}}} [h_{d,pv-m}(T_m - T_{pv})] \quad (IV. 20)$$

### IV.3 Le programme :

Le programme informatique élaboré est établi en FORTRAN (Compaq Visuel Fortran Version 9.0).

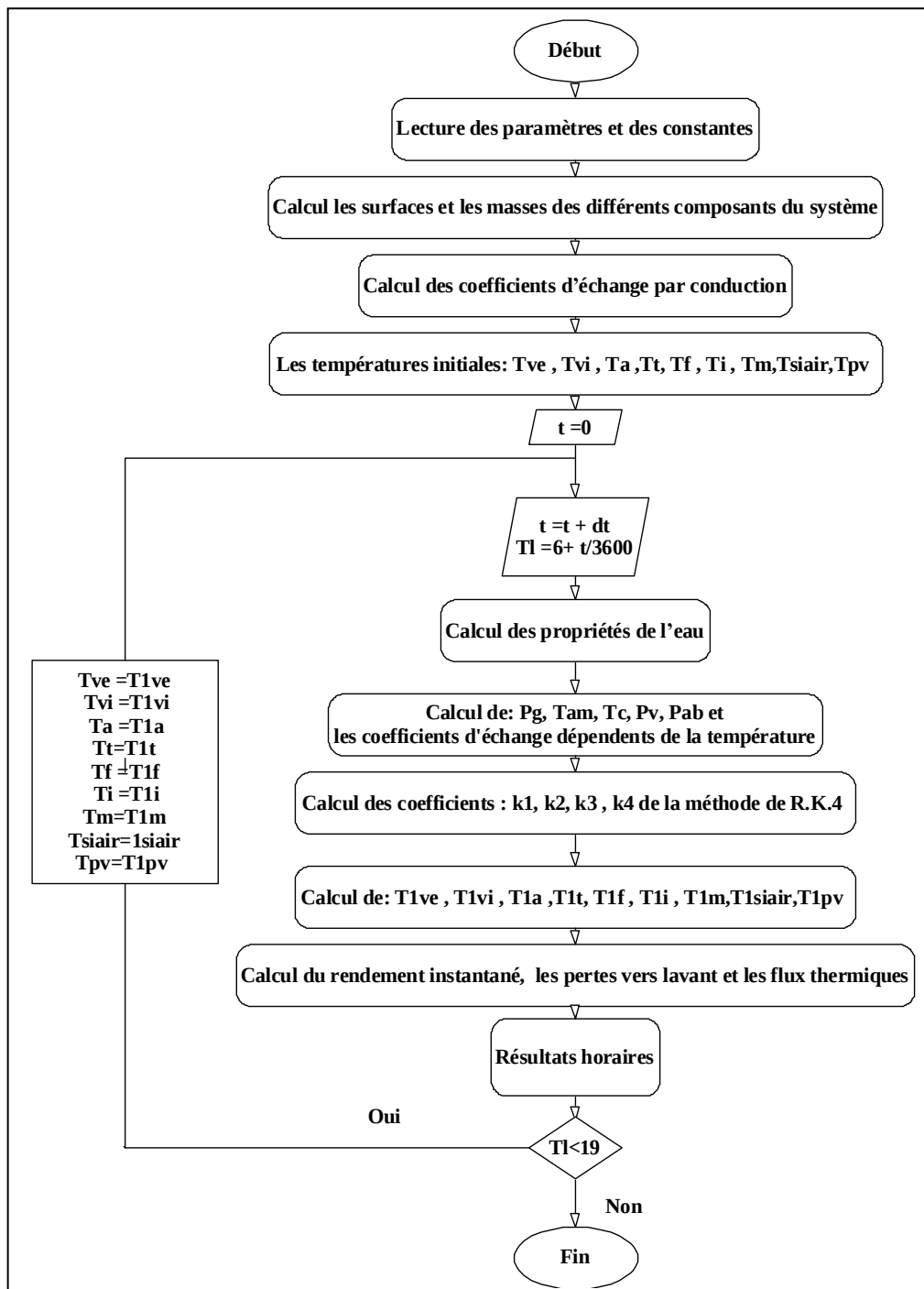
#### IV.3.1 Les étapes du programme :

- Première étape : déclaration des variables
- Deuxième étape : entrée des données et calcul des constants (les surfaces, les volumes, les masses, les flux échangés par conduction)
- Troisième étape : utilisation de la méthode de Rung Kutta d'ordre 4 .On choisit un intervalle de temps pour effectuer les calculs.
- Quatrième étape : calcul de la température ambiante, de la température du ciel, de l'angle horaire, du flux solaire, des propriétés thermo physiques du fluide caloporteur, des coefficients thermiques échangés par convection et par rayonnement (faire cette étape pour chaque coefficient de la méthode de RK4).
- Cinquième étape : on pose les températures obtenues comme des températures initiales de deuxième temps.

| Eléments et notations                                     | Dimensions |
|-----------------------------------------------------------|------------|
| Largeur de la vitre                                       | 72 (mm)    |
| Fond de nervure ( $b_0$ )                                 | 22 (mm)    |
| Hauteur de nervure ( $h_{nervure}$ )                      | 40 (mm)    |
| Epaisseur de la tôle métallique ( $\delta_m$ )            | 0.75 (mm)  |
| Diamètre intérieur du tube en cuivre ( $D_i$ )            | 7 (mm)     |
| Diamètre extérieur du tube en cuivre ( $D_e$ )            | 8 (mm)     |
| Epaisseur de l'absorbeur ( $\delta_a$ )                   | 0.2 (mm)   |
| Largeur de l'absorbeur ( $b_a$ )                          | 55 (mm)    |
| Epaisseur de l'isolant dans la nervure ( $\delta_{iso}$ ) | 6 (mm)     |
| Epaisseur du verre ( $\delta_v$ )                         | 3 (mm)     |
| Longueur du capteur solaire (L)                           | 2.7 (m)    |

**Tableau IV.1 :** Dimensions de la maquette du capteur solaire PV/T hybride.

#### IV.3.2 L'organigramme général pour le régime transitoire :



#### IV.4 Résultats :

Les résultats obtenus sont présentés sous forme de graphes, en tenant compte les considérations suivantes:

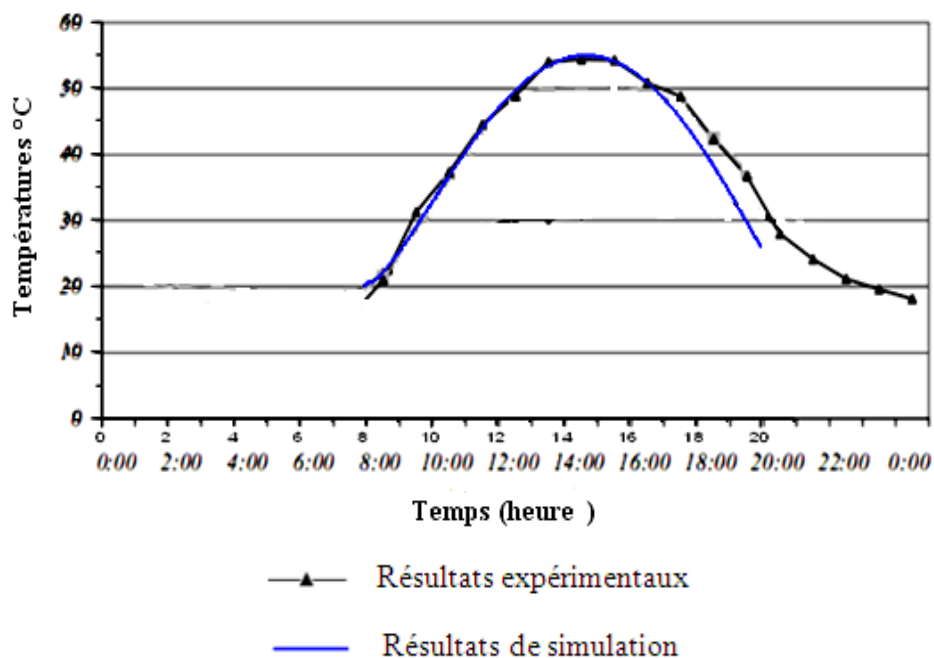
- Les calculs sont effectués à Constantine dont les coordonnées géographiques sont: latitude 36.17° Nord, longitude 6.36° Est, et un décalage horaire, d'une heure.
- La vitesse du vent est constante et égale à 3 (m.s<sup>-1</sup>) pour les deux types de système sans et avec préchauffage.

Dans cette étude nous avons utilisé la relation de la température ambiante sous les conditions suivantes [56]:  $6^h \leq TL \leq 18^h$  et  $288.15 \text{ K} \leq T_a \leq 318.15 \text{ K}$

$$T_a = 273.15 - 19.64595 + 9.91394 TL - 0.40724 TL^2 \quad (\text{IV.21})$$

$TL$ , le temps légal

La comparaison des résultats de simulation de la variation temporelle de la température du panneau photovoltaïque avec les résultats expérimentaux d'Assoa [57] (figure IV.2) montre un bon accord.

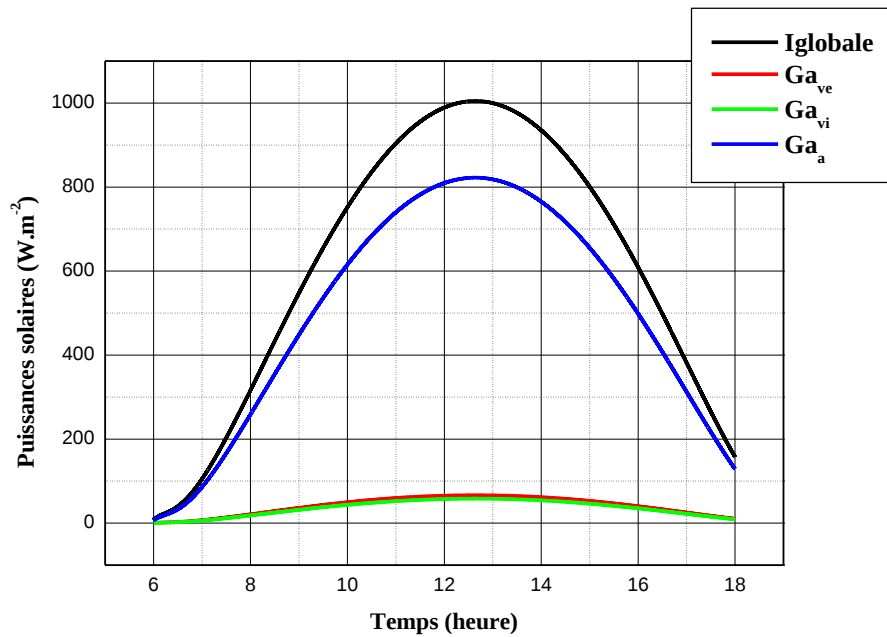


**Figure IV.2 :** Variation temporelle de la température de panneaux photovoltaïque

#### IV.4.1 Variation temporelle des puissances solaires reçue et absorbées :

L'irradiation solaire, étant le paramètre le plus influant sur le fonctionnement du système solaire, il serait intéressant d'étudier son effet sur les caractéristiques du système.

L'évolution temporelle du rayonnement solaire global ( $I_{\text{global}}$ ), reçu par unité de surface plane horizontale du capteur solaire des puissances absorbées par la vitre, côté intérieur et extérieur ( $G_{a_{ve}}$ ,  $G_{a_{vi}}$ ), et par l'absorbeur ( $G_{a_d}$ ) est illustrée par la figure IV.3.



**Figure IV.3 :** Variation temporelle des puissances solaires reçues et absorbées par la vitre et l'absorbeur en cuivre

On peut remarquer que la puissance atteint sa valeur maximale entre 12<sup>h</sup>00 et 13<sup>h</sup>00. Ce qui peut être expliqué par la hauteur du soleil et la masse atmosphérique. Nous pouvons par ailleurs noter que la puissance absorbée par la vitre n'est pas considérable et reste toujours inférieure à celle absorbée par l'absorbeur. Ceci est due à ses caractéristiques géométriques (épaisseur faible  $\delta_v = 3\text{mm}$ ), et optiques (coefficient d'absorption faible  $\alpha_v = 0.066$  et coefficient de transmission élevé  $\tau_v = 0.88$ ).

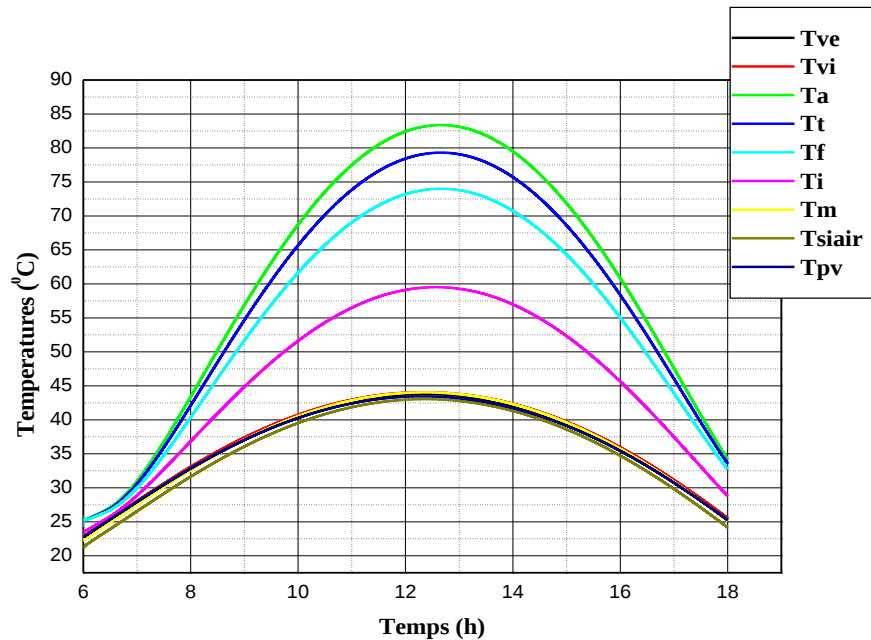
La puissance absorbée par l'absorbeur est très importante résultant de son coefficient d'absorption élevé  $\alpha_a = 0.93$ .

#### IV.4.2 Variation temporelle des températures des différentes parties du capteur :

L'observation de la figure IV.3 permet de noter que la température  $T_a$  est la plus élevée et atteint approximativement 83(°C), elle est suivie de très près par la température du tube  $T_t$  dont la valeur maximale est de l'ordre de 79.5 (°C). Le fait que ces deux températures soient proches s'explique par le coefficient d'échange par conduction entre l'absorbeur et le tube qui atteint une valeur maximale de 124 ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ).

Dans un ordre des avant se succéderont la température du fluide caloporteur  $T_f$  du fait descendant de la quantité d'énergie relativement importante qui lui est transmise de l'absorbeur par convection (coefficient d'échange par convection estimé à 121 ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ )) ensuite la température de l'isolant, puis les températures de la vitre côtés

extérieur  $T_{ve}$  et intérieur  $T_{vi}$  qui sont proches la du fait de la faible épaisseur de la vitre , puis la température de la tôle métallique  $T_m$ , celle du panneau photovoltaïque PV,  $T_{pv}$  présentant une valeur maximale de l'ordre de 44 (°C), et en dernier lieu la température du coffre  $T_{siar}$  qui échange de la chaleur avec l'extérieur (sol et ambiance).

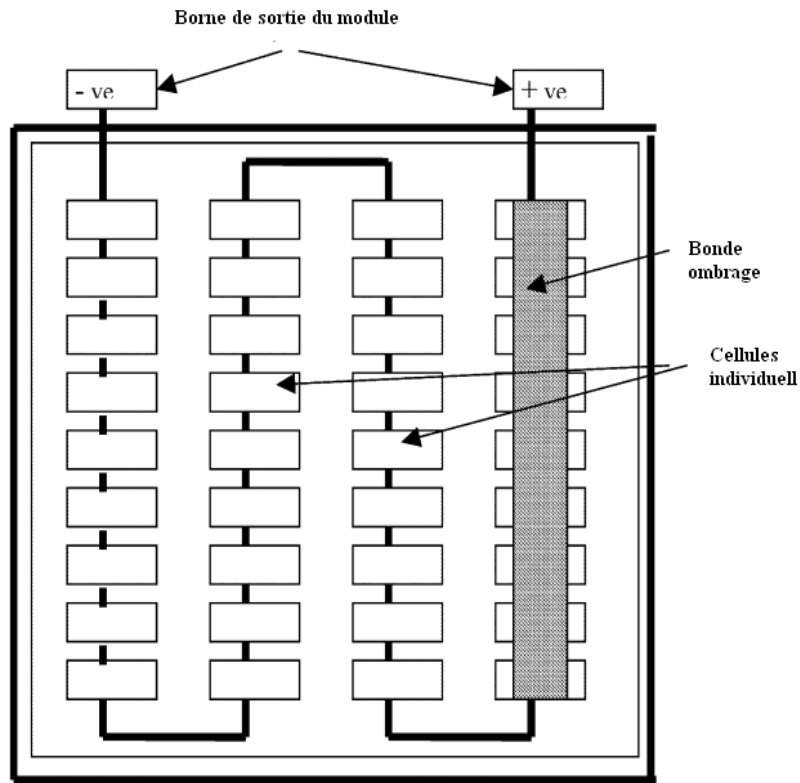


**Figure IV.4 :** Variation temporelle de la température des différentes parties du capteur solaire

#### IV.4.3 Panneau photovoltaïque :

Dans ce qui suit notre intérêt a porté sur le panneau photovoltaïque.

Un panneau photovoltaïque est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel. Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallel pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Pour obtenir un module photovoltaïque les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallel, puis encapsulées sous verre. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallel accroît le courant en conservant la tension.



**Figure IV.5 : Module PV**

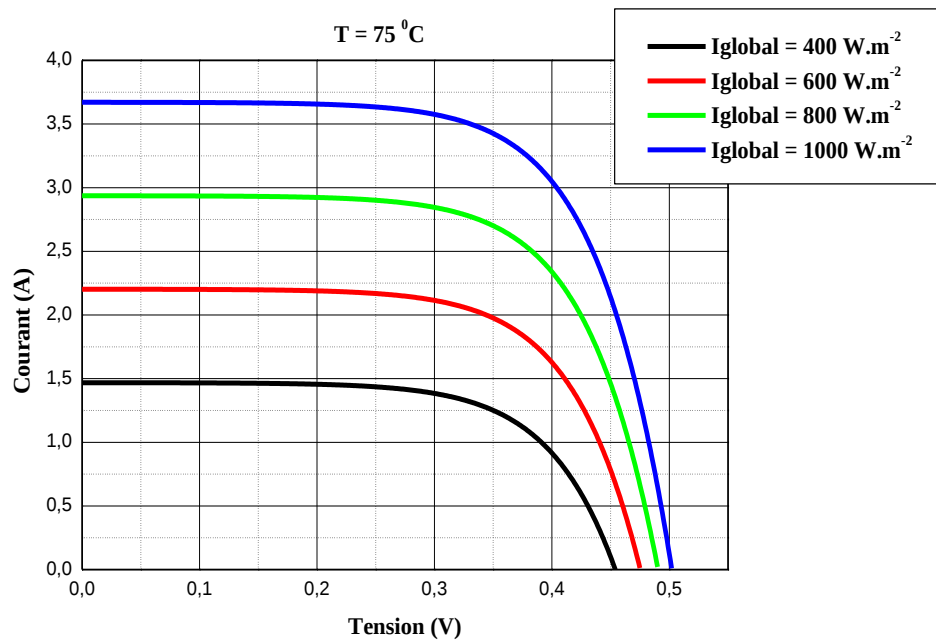
Le module PV utilisé dans le cadre de ce travail est fabriqué par Siemens SM55 (Monocristal), il est constitué de 36 cellules connectées en série. Le Tableau IV.2 donne les paramètres qui caractérisent le module en conditions standards.

|                        | $I_m(A)$ | $v_m(V)$  | $v_{co}(V)$ | $I_{sc}(A)$ |
|------------------------|----------|-----------|-------------|-------------|
| <b>Module PV</b>       | 3.15     | 17.4      | 21.7        | 3.45        |
| <b>Cellule solaire</b> | 3.15     | 0.4833333 | 0.6027778   | 3.45        |

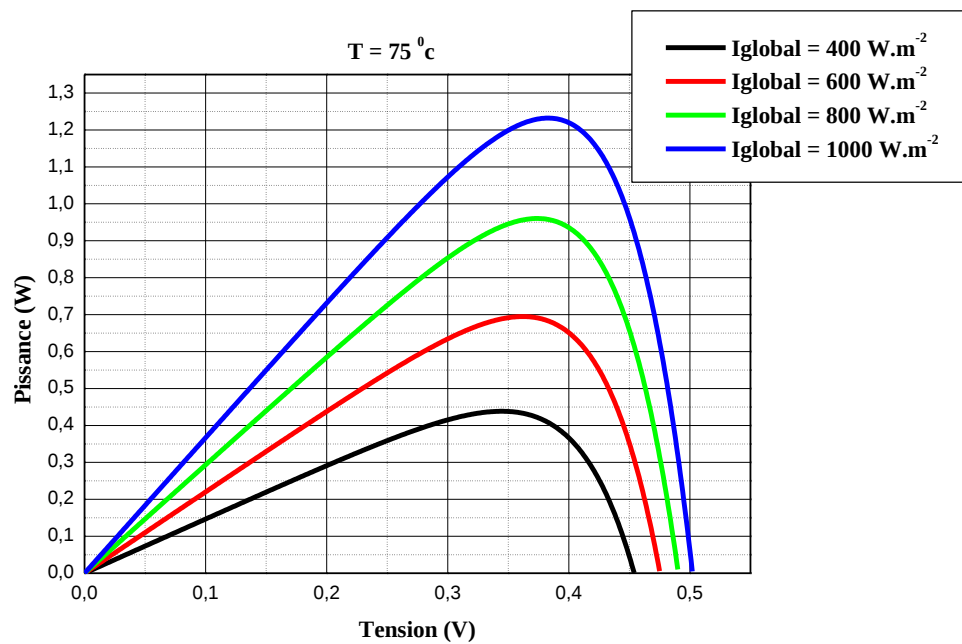
**Tableau IV.2 :** Caractéristiques techniques du module et de la cellule solaire fabriqués par Siemens SM55.

#### IV.4.4 Effet de l'éclairement :

Il apparaît sans ambiguïté sur les figures IV.6 et IV.7 qu'une augmentation de l'éclairement ( $I_{global}$ ) conduit à un accroissement important de l'intensité du courant photovoltaïque et de la puissance. La photo courant est par conséquent directement lié au flux lumineux. Par contre l'effet de l'éclairement est moindre sur la tension.



**Figure IV.6 :** Caractéristique  $I(V)$  d'une cellule solaire pour différents éclairagements solaires



**Figure IV.7 :** Influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P-V$

## IV.5 Simulation du mouvement de la bulle d'hydrogène avec le logiciel COMSOL :

### IV.5.1 Introduction :

Avec l'avènement des sources d'énergie basées sur les conditions météorologiques, les pics d'énergie lors des journées de forte production deviennent de plus en plus fréquents. Pour équilibrer ces pics, l'électrolyse peut être utilisée pour convertir l'énergie en gaz stockable. Avec l'intérêt croissant pour l'électrolyse, de plus en plus de recherches sont menées dans ce

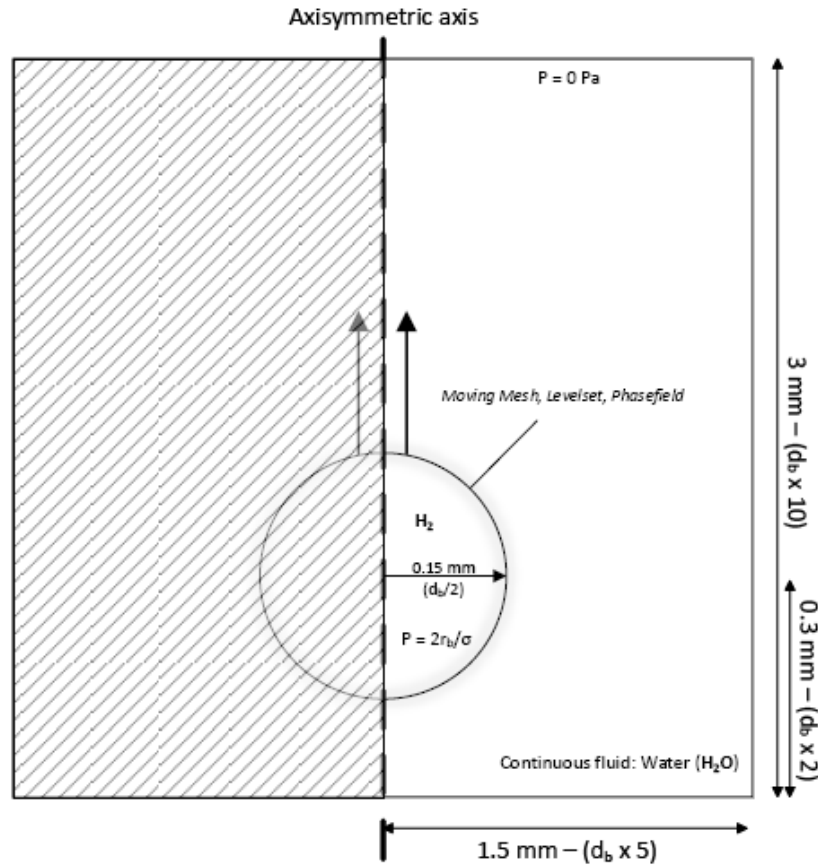
domaine. De nombreuses études expérimentales ont été réalisées sur la croissance des bulles, mais moins d'études numériques. Ce parti de notre travail vise à créer des modèles dans COMSOL Multiphysics qui simulent de manière précise la croissance d'une bulle électrogénérée sur des électrodes. Les simulations ont été réalisées dans COMSOL avec un solveur numérique direct et des modèles d'électrochimie. Une méthode de capture de l'interface appropriée pour suivre l'interface d'une bulle en croissance a été sélectionnée. Le cadre de maillage mobile a été conclu comme étant le meilleur pour les simulations de croissance des bulles parmi les méthodes de capture d'interface levelset, phasefield et moving mesh.

Un domaine clé où des améliorations peuvent être apportées se situe au niveau de l'électrode où se produit la génération de bulles. L'électrode peut produire du gaz de manière optimale lorsqu'aucune bulle n'est présente, ce qui n'est pas possible car les bulles se forment en raison de la génération de gaz. Cependant, il est possible de réduire le temps pendant lequel la bulle reste sur l'électrode, et cela peut être fait de deux manières. La croissance de la bulle peut être accélérée de sorte qu'elle atteigne plus rapidement le rayon critique de détachement, ou le rayon critique de détachement peut être réduit. Cette simulation se concentre sur la première méthode, c'est-à-dire l'analyse de la croissance de la bulle afin de mieux comprendre comment augmenter l'efficacité en réduisant le temps de croissance. Pour cette analyse, seules des bulles singulières sont nécessaires, c'est pourquoi, souvent, des micro-électrodes sont utilisées dans les expériences. Les micro-électrodes ont l'avantage de générer une seule bulle qui passera par les phases suivantes : nucléation, croissance et détachement. Il est très avantageux d'étudier une seule bulle car il est beaucoup plus simple de la suivre et elle est exempte de tout événement de coalescence qui peut se produire avec des électrodes plus grandes.

#### **IV.5.2 Définition du cas :**

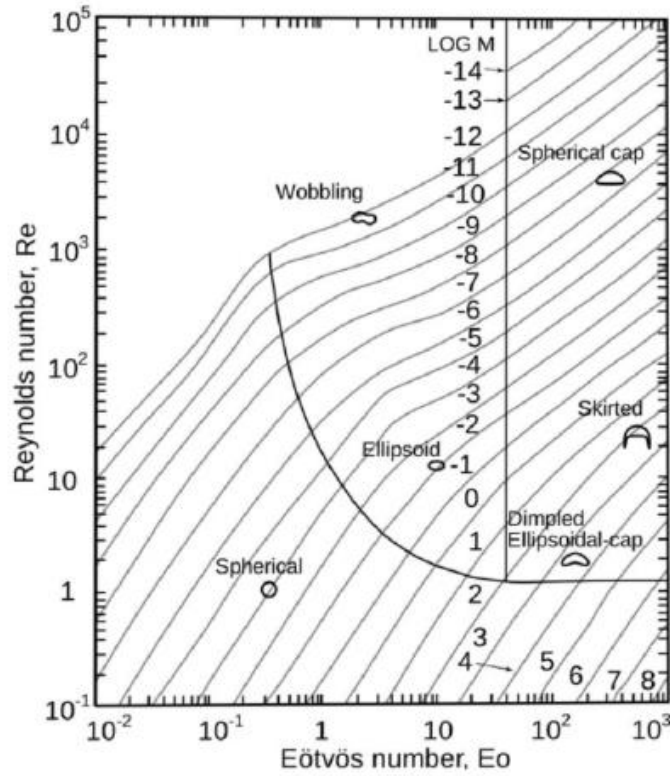
Pour garantir une bulle sphérique, les nombres d'Eötvös et de Morton ont déterminé la taille de la bulle, et le nombre de Reynolds a été utilisé pour déterminer la traînée. En utilisant une bulle d'hydrogène dans l'eau, les propriétés des matériaux sont définies, ce qui entraîne un nombre de Morton d'environ  $M_o = 2,6 \times 10^{11}$ . Le nombre d'Eötvös ne dépend pas uniquement des paramètres des matériaux, mais inclut également une longueur caractéristique qui serait le diamètre de la bulle dans ce cas. Pour que la bulle soit sphérique, le nombre d'Eötvös doit être inférieur à  $E_o = 0,3$ , ce qui correspondrait à un diamètre de bulle de  $d_b = 1,5$  (mm). Pour des raisons de sécurité, un diamètre de bulle de  $d_b = 0,3$  (mm) a été choisi, ce qui correspond à un

nombre d'Eötvös de  $E_o = 0,0121$ . La géométrie de la simulation est configurée en 2D en symétrie axiale, ce qui est moins intensif en termes de calcul. La Figure IV.8 donne une illustration détaillée de la géométrie utilisée dans COMSOL Multiphysics.



**Figure IV.8:** Vue schématique du cas simulé, montrant les caractéristiques et paramètres les plus importants, les dimensions ne sont pas à l'échelle.

Une bulle en ascension atteindra rapidement sa vitesse terminale, par conséquent, le domaine n'a pas besoin d'être très élevé dans la dimension  $z$ . La dimension  $r$  est maintenue assez grande pour minimiser les effets de paroi qui peuvent se produire en raison de la bulle en ascension. La gravité créera une différence de pression sur la bulle, entraînant son mouvement. Pour déterminer le temps de fin de la simulation, une approximation de la vitesse terminale doit être utilisée. Cette approximation peut être réalisée selon deux méthodes. La première méthode consiste à extrapoler le nombre de Reynolds à partir de la Figure IV.9, mais cela ne sera pas très précis.



**Figure IV.9 :** Le diagramme de Grace offre différents régimes de forme de bulles ascendantes en fonction des nombres de Reynolds, d'Eotvos et de Morton [Clift et al, 1978].

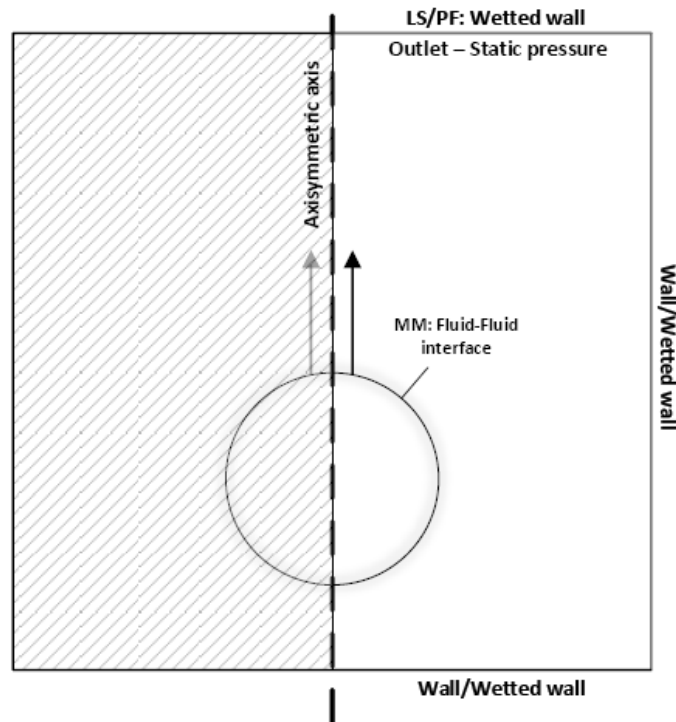
La deuxième méthode consiste à utiliser l'équation de Hadamard-Rybczynski [Clift et al, 1978] pour la vitesse terminale, définie comme suit :

$$W_b = \frac{2}{3} r_b^2 g \frac{(\rho_b - \rho_f)}{u_f} \frac{\mu_f + \mu_b}{2\mu_f + 3\mu_b} \quad (\text{IV. 22})$$

Où  $W_b$  est la vitesse résultante de la bulle,  $r_b$  est le rayon de la bulle,  $g$  est l'accélération gravitationnelle,  $\rho_b$  est la densité du fluide de la bulle,  $\rho_f$  est la densité du fluide continu,  $\mu_f$  est la viscosité dynamique du fluide continu et  $\mu_b$  est la viscosité dynamique du fluide de la bulle. En utilisant les valeurs déterminées, la vitesse terminale résultante sera  $W_b = 0,0724$  (m/s). La vitesse terminale donne une indication sur le temps de fin de la simulation, ce qui est important car lorsque la bulle atteint le bord supérieur, les résultats ne seront pas réalistes. Les résultats de la vitesse terminale calculée prédisent que la bulle quittera le domaine en environ 0,05 (s), donc le temps de fin des simulations a été fixé à cette valeur.

#### IV.5.3 Conditions aux limites :

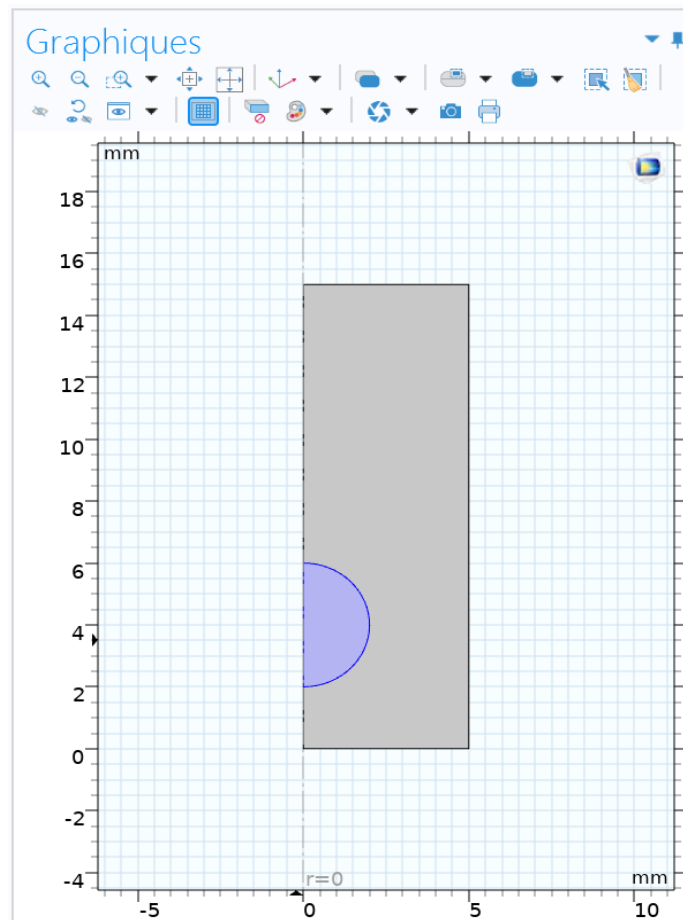
Ce cas comporte de nombreuses conditions aux limites différentes, afin de mieux les visualiser, la Figure IV.10 a été créée. La complexité des conditions aux limites provient principalement de l'ajout de méthodes de capture d'interface. Il convient de noter que seule la méthode de maillage mobile nécessite une condition aux limites internes définie, à savoir l'interface fluide-fluide qui utilise une approche de glissement libre.



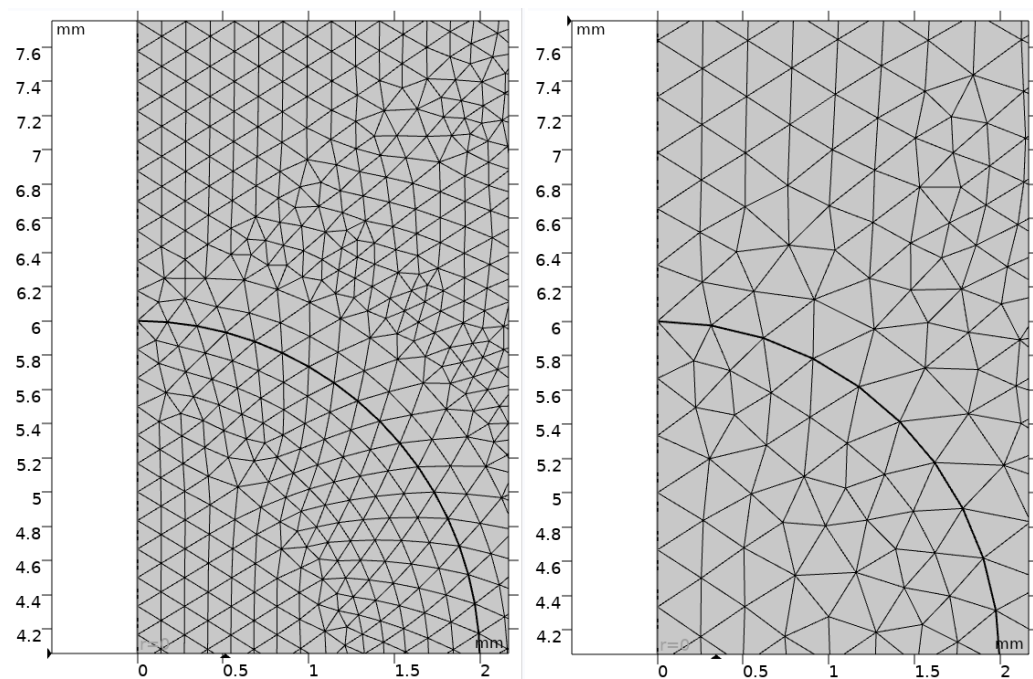
**Figure IV.10 :** Aperçu des conditions aux limites utilisées et de leurs positions, les dimensions ne sont pas à l'échelle.

#### IV.5.4.Géométrie et maillage :

Les figures IV.11 et IV.12 représentant la géométrie de la configuration à étudier, et leur maillage mobile, respectivement.



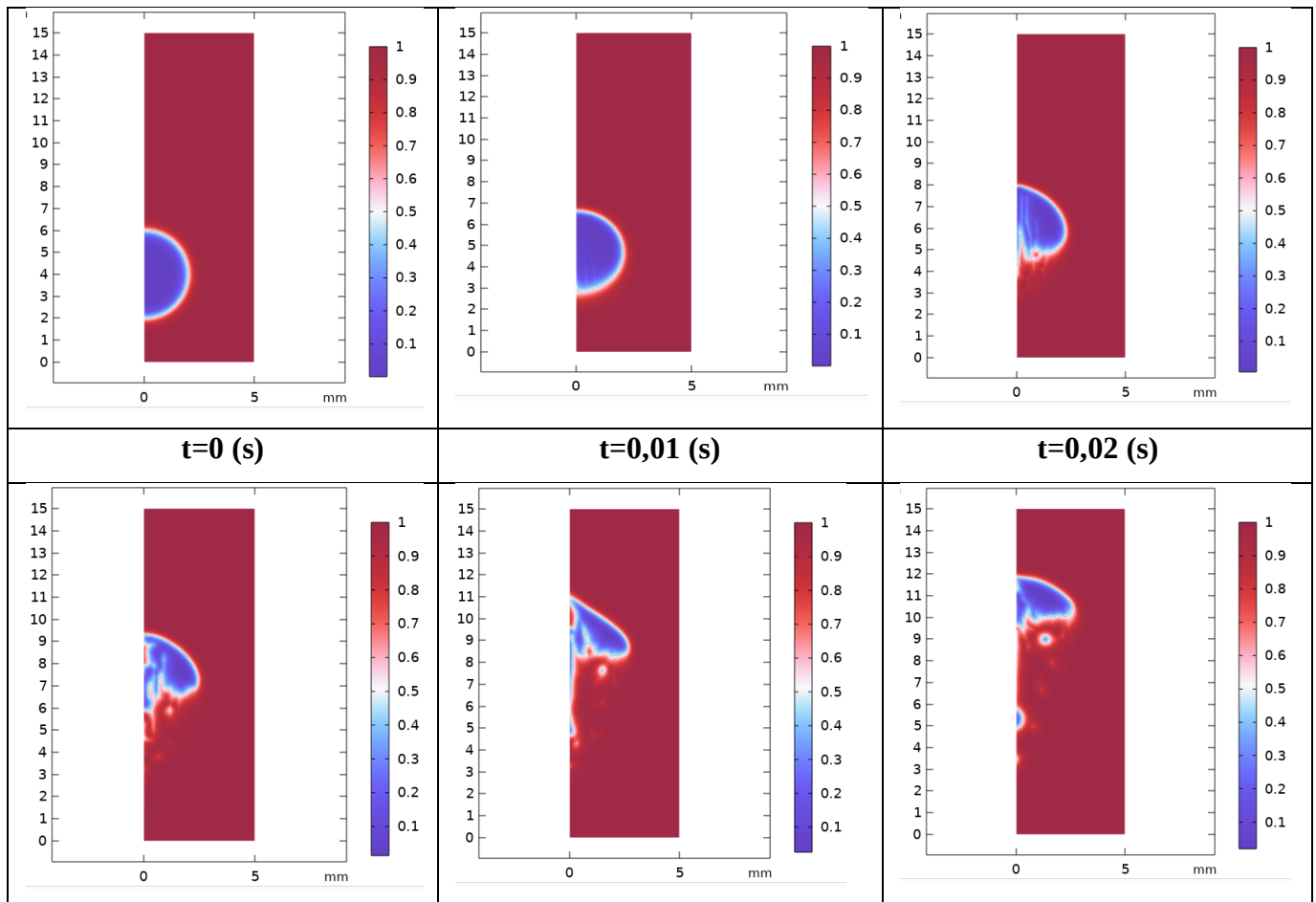
**Figure IV.11 : La géométrie à étudier**

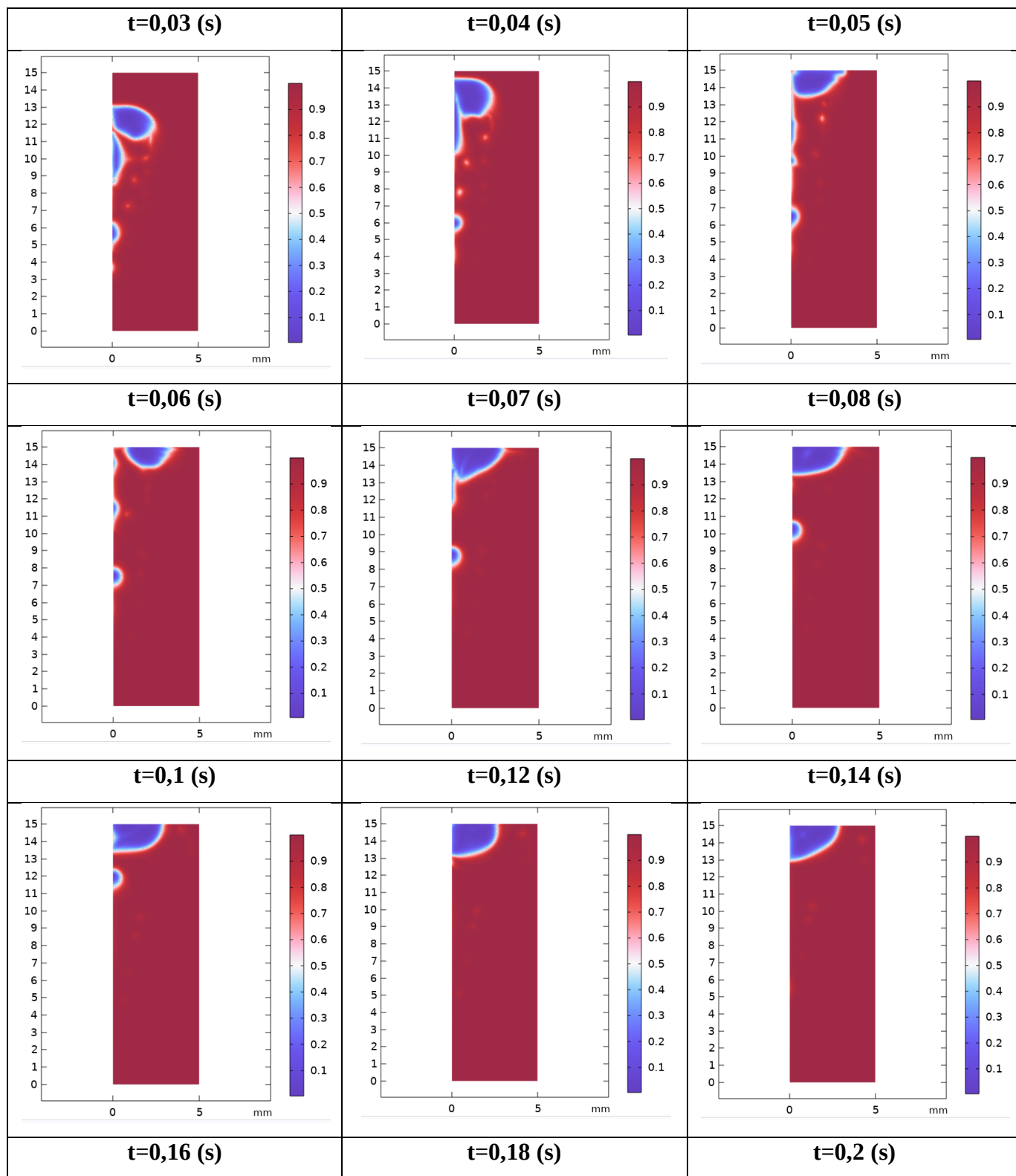


**Figure IV.12 : Maillage mobile**

## IV.6.Résultats :

Dans le cas de l'hydrogène et de l'eau, la différence de densité est très importante. Avec le champ de phase, il a été découvert que réduire virtuellement ce rapport peut conduire à des solutions plus stables. Réduire virtuellement le rapport signifie que l'effet de ce rapport réduit se traduit uniquement par un changement du paramètre d'ajustement de la mobilité en modifiant les densités en dehors de la simulation. Dans le cas de l'hydrogène et de l'eau, cela signifie que la vitesse terminale diminue et, par conséquent, le paramètre d'ajustement de la mobilité devient également plus petit. Obtenir ces paramètres correctement est important, car les simulations stables convergent beaucoup plus rapidement. Lorsque les paramètres sont incorrects avec le modèle du champ de phase, cela signifie que la bulle se réduit en taille et semble disparaître. Une analyse plus approfondie a révélé que la fraction de volume moyenne sur le domaine ne change pas, ce qui signifie que l'interface ne pouvait tout simplement pas se maintenir et qu'en réalité aucune masse n'était perdue. Dans la Figure IV.13, cet effet peut également être observé, mais en ajustant ces paramètres, l'effet est réduit à une perte de rayon d'environ 20%.





*Figure IV.13 : La progression de la bulle montante à différents moments*

## Conclusion générale

Dans cette étude l'utilisation du gaz d'hydrogène résultant de l'électrolyse de l'eau en utilisant un courant électrique obtenu à partir de panneaux solaires et stocké dans une batterie, comme carburant pour faire fonctionner un moteur de pompe à eau à usage agricole a été exploité. Nous avons étudié tout d'abord la théorie de l'électrolyse de l'eau et du système de production d'énergie électrique à l'aide de panneaux solaires. Les équations de production d'énergie électrique utilisant des panneaux solaires ont été programmées dans le logiciel Fortran, et nous avons simulé le mouvement de la bulle d'hydrogène à l'intérieur de l'eau à l'aide du logiciel COMSOL. Les résultats obtenus dans cette étude ont été analysés et discutés, démontrant l'importance de s'appuyer sur des sources d'énergie renouvelables et propres en raison de leur respect de l'environnement et de leur coût inférieur par rapport aux sources d'énergie traditionnelles. L'étude montre également que l'utilisation efficace de l'hydrogène en tant qu'indicateur de transition énergétique permettra de trouver des solutions alternatives, notamment avec la diminution des réserves d'énergie pétrolière, à condition de bien maîtriser les technologies de production.

Les simulations ont été réalisées dans COMSOL Multiphysics 5.6, en utilisant un solveur numérique direct pour obtenir les solutions. Les modèles ont été créés avec une axi-symétrie en 2D afin de réduire le temps de calcul. Les méthodes de capture de l'interface du champ de phase, du levelset et du maillage mobile ont été évaluées en termes de performances afin de déterminer la meilleure méthode de capture d'interface à implémenter dans le modèle de croissance de bulle. Le maillage mobile s'est avéré être la meilleure option, non seulement il a fourni les meilleures données, mais il était également le plus précis par rapport au modèle théorique de la bulle montante. En plus de cela, le maillage mobile est également beaucoup plus pratique pour décrire les conditions aux limites sur une interface de bulle en mouvement, ce qui s'est avéré crucial pour la bulle en croissance.

## Référence :

- [1] <https://www.independentarabia.com> 3.5.2023
- [2] <https://www.un.org/ar/climatechange/raising-ambition/renewable-energy> 8.4.2023
- [3] A. Kovac, D. Marcius, L. Budin ; Solar hydrogen production via alkaline water electrolysis; International Journal of Hydrogen Energy (2019) 44 : 9841-9848.
- [4] D. D'Arc de Fatima Palhares, L. G. M. Vieira, J. J. R. Damasceno; Hydrogen production by a low-cost electrolyzer developed through the combination of alkaline water electrolysis and solar energy use; international journal of hydrogen energy (2018) 43 : 4265 - 4275.
- [5] P. C. Okonkwo, E. M. Barhoumi, I. B. Mansir, W. Emori, H. Bhowmik ; Effect of electrode material on the hydrogen production using a low-cost home-made alkaline electrolyzer; Vacuum (2022) 198 : 110878.
- [6] B. Panigrahy, K. Narayan, B. Ramachandra Rao; «Green hydrogen production by water electrolysis: A renewable energy Perspective»; Materials Today: Proceedings (2022) 67: 1310–1314.
- [7] J. Barco-Burgosa, U. Eickerb, N. Saldaña-Roblesc, A.L. Saldaña-Roblesc, V. Alcántar-Camarena; Thermal characterization of an alkaline electrolysis cell for hydrogen production at atmospheric pressure; Fuel (2020) 276: 117910.
- [8] E. Açikkalp, O. Altuntas, H. Caliskan, G. Grisolia, U. Lucia, D. Borge-Diez, E. R. Asensio ; Sustainability analyses of photovoltaic electrolysis and magnetic heat engine coupled novel system used for hydrogen production and electricity generation; Sustainable Energy Technologies and Assessments (2022) 52 : 102094.
- [9] D. Huang, B. Xiong, J. Fang, K. Hu, Z. Zhong, Y. Y. Xiaomeng Ai, Zhe Chen; A multiphysics model of the compactly-assembled industrial alkaline water electrolysis cell; Applied Energy 314 (2022) 118987.
- [10] Dohyung Jang, Wonjae Choi, Hyun-Seok Cho, Won Chul Cho, Chang Hee Kim, Sanggyu Kang; Numerical modeling and analysis of the temperature effect on the performance of an alkaline water electrolysis system ; Journal of Power Sources 506 (2021) 230106. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230106>.

- [11] E. Amores, M. S.z-Molina, M. Sánchez; Effects of the marine atmosphere on the components of an alkaline water electrolysis cell for hydrogen production; Results in Engineering (2021) 10: 100235. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100235>.
- [12] Z. Ren, J. Wang, Z. Yu, C. Zhang, S. Gao, P. Wang ; Experimental studies and modeling of a 250-kW alkaline water electrolyzer for hydrogen production; Journal of Power Sources (2022) 544: 231886. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231886>.
- [13] S. Anwar, F.I Khan, Y. Zhang, A. Djire ; Recent development in electrocatalysts for hydrogen production through water electrolysis; International Journal of Hydrogen Energy (2021) 46 :32284-32317.
- [14] K. Torii, M. Kodama, S. Hirai; Three-dimensional coupling numerical simulation of two-phase flow and electrochemical phenomena in alkaline water electrolysis; International Journal of Hydrogen Energy (2021) 46 :35088-35101. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.08.101>.
- [15] M. T. de Groot, J. Kraakman, R. L. G. Barros; Optimal operating parameters for advanced alkaline water electrolysis; International Journal of Hydrogen Energy (2022) 47: 34773-34783. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.075>.
- [16] A. C. Avci, E. Toklu; A new analysis of two phase flow on hydrogen production from water electrolysis, International Journal of Hydrogen 47 (2022) 6986-6995. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.180>.
- [17] V. Halatte Oises. Les techniques de production de l'hydrogène et les risques associés. Rapport d'étude (2008).
- [18] CA. Grimes, OK. Varghese, S. Ranjan, "Light, Water and Hydrogen", Springer (2008).
- [19] R. Kothari, D. Buddhi, R.L. Sawhney, Sust. Energ. Rev. 12 (2008) 553-63.
- [20]:R.Boudries, R.dizène, A. Khellaf and M. Belhamel, «HYDROGEN AS AN ENERGY CARRIER », Editor: Aiden M.Harris, © 2010 Nova Science Publishers, Inc.

- [21] G. Bourbonneux, Production d'hydrogène ; Le Raffinage du Pétrole, T3 Procédés de transformation, (1998) 463-515.
- [22] O. Megret, L. Hubert, M. Calbry ,E. Trably, H. Carrere, D. Garcia-Bernet, N. Bernet. Rapport final production d'hydrogène à partir de déchets état de l'art et potentiel d'émergence Septembre 2015.
- [23] P. Marion, S. Vinot, Production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles, Mémento de l'Hydrogène, Fiche 311, AFH2, 2009.
- [24] D. Mathieu, JF. Mastrangelo, F. Valmage: Quelle place pour l'hydrogène dans les systèmes énergétiques?», Ecole des Ponts, Paris Tech, Mars 2004.
- [25] J. Legrand, Mémento de l'hydrogène, Fiche 3.3.2, AFH2.
- [26] H. Derbal, M. Belhamel et A. M'Raoui, L'hydrogène, vecteur énergétique solaire, Revue des Energies Renouvelables ICRES-07- Tlemcen (2007) 235-47.
- [27] Julien Labbe, Thèse de Doctorat : L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage pour systèmes photovoltaïque isolés école de mines de paris, Ecole de Mines de Paris (2006).
- [28] T. Nakamura, Sol. Energy, Vol. 19 (1977) 467
- [29] T. Sreethawong, S. Yoshikawa, Int. J. Hydrogen Energy, 31 (2006) 786.
- [30] TJ. Gardner, EP. Boesflug, CJ. Brinker, AG. Sault, AC. Tsai, JP. Collins, 'Hydrogen Production for Fuel Cells by Selective Dehydrogenation of Alkanes in Catalytic Membrane Reactors, Sandia, Report SAND99-0681, 1999.
- [31] DMF. Santos et al., Quím. Nova, 36 (2013) 1176.
- [32] A. Damien, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie des procédés, J.6366.1992.
- [33] O. Ulleberg, Intl. J of Hydrogen, vol. 28 (2003) 21.
- [34] K. Zeng, D. Zhang, Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications., Int. J. Prog., Energy and Combustion Science, 36 (2010) 307-26.
- [35] S. Dunn, Hydrogen futures: Towards a sustainable energy system. Int. J. Hydrogen En. 27(2002) 235–64.
- [36] E. Mayousse, Production d'hydrogène, Développement et étude de composants optimisés pour l'électrolyse PEM, Institut Polytechnique de Grenoble, Grenoble, 2010.
- [37] Marcelo Carmo, David L. Fritz, Jürgen Mergel, Detlef Stolten, Review, A comprehensive review on PEM water electrolysis Int. J. Hydrogen En., 38 (2013) 4 901-34.
- [38] M. Kaninski, S. Miulovic, G. Tasic, A. Maksic, V. Nikolic, Int. J. Hydrogen En., 36(2011)5227-35.

- [39] T. Smolinka, Water Electrolysis, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany 2009, Elsevier B.V.
- [40] Mémento de l'Hydrogène Fiche 3.2.1 Révision : Mai 2013.
- [41] : Sabrina MILOUDI. Etude d'un système photovoltaïque autonome à base d'hydrogène vert. Thèse de master académique, UKMO, 2016.
- [42] : S. M. Ait-Cheikh, «Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [43] <https://kahraba4u.com> 29.5.2023
- [44] [http://www.paturage.be/electro/elo/diodes/d\\_theorie.html](http://www.paturage.be/electro/elo/diodes/d_theorie.html) 30.5.2023
- [45] <https://www.electricalcity.net> 30.5.2023
- [46] <https://alemt yaz-jo.com> 29.5.2023
- [47] <https://kahraba4u.com> 30.5.2023
- [48] <https://www.aquaportail.com/definition-13159-insolation.html>
- [49] Yves JANNOT « thermique solaire », édition mars 2011.
- [50] Chirifi Oussama, Madache Hamza « Etude technico-économique d'une installation photovoltaïque pour une carrière », Mémoire de mastère II, département de génie mécanique, faculté du génie de la construction, UMMTO 2013.
- [51] C. Lerouge « Recherche & Industrie Photovoltaïque (PV) Etats-Unis » Sciences physique États-Unis, 2006.
- [52] Ministry of energy <http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?page=potentiels>
- [53] M. Kenane, S.Sadoudi « Modélisation de modules photovoltaïques en milieu réel d'implantation », Mémoire de Master II, département de génie mécanique, faculté du génie de la construction, UMMTO 2013.

[54] Mémoire sur la Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance Énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie  
[http://bu.univ-chlef.dz/doc\\_num.php?explnum\\_id=445](http://bu.univ-chlef.dz/doc_num.php?explnum_id=445)

[55] <https://www.vattenfall.fr/le-mag-energie/electricite/toutes-les-techniques-pour-produire-de-l-electricite>