

REPUBLIQUE DU CAMEROUN  
Paix-Travail-Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

Faculté des Sciences

Département de Physique

CENTRE DE RECHERCHE ET DE  
FORMATION DOCTORALE EN  
SCIENCES, TECHNOLOGIES ET  
GEOSCIENCES  
UNITE DE RECHERCHE ET DE  
FORMATION DOCTORALE PHYSIQUE  
ET APPLICATIONS



REPUBLIC OF CAMEROON  
Peace-Work-Fatherland

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

Faculty of Science

Department of Physic

POSTGRADUATE SCHOOL OF SCIENCE,  
TECHNOLOGY AND  
GEOSCIENCES  
RESEARCH AND POSTGRADUATE  
TRAINING UNIT FOR PHYSICS AND  
APPLICATIONS  
P.O.BOX 812 Yaoundé

## LABORATOIRE D'ÉNERGIE, SYSTÈMES ÉLECTRIQUES ET ÉLECTRONIQUES

# ÉTUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE D'UN SYSTÈME DE PRODUCTION SUR SITE D'OXYGÈNE MÉDICAL ET D'ÉLECTRICITÉ SOLAIRE DÉDIÉ À UN HÔPITAL NON RACCORDÉ AU RÉSEAU

Thèse présentée et soutenue en vue de l'obtention du diplôme de Docteur/PhD

Option: **Énergie et Environnement**

Par

**EDOUMA Fils Prosper**

Numéro matricule: 14Z2268  
Master of Sciences en Physique

Sous la direction de

**NSOUANDELE Jean Luc**  
Maître de Conférences  
Université de Maroua

**BEN-BOLIE Germain Hubert**  
Professeur  
Université de Yaoundé 1

Année : 2023





DÉDICACE

Je dédie cette thèse à ma tendre épouse :

**ASTA ETANKI Carine**

## REMERCIEMENTS

Pour l'aboutissement de ce travail, beaucoup de personnes m'ont apporté de loin ou de près et sous toutes formes possibles leur soutien.

Je suis d'abord reconnaissant au **Dieu Tout Puissant** qui m'a accordé la grâce de la santé pour réaliser ces travaux.

- Je remercie mes encadreurs : **Professeur BEN-BOLIE Germain Hubert ; Professeur NSOUANDELE Jean Luc**, pour avoir accepté m'encadrer, et d'avoir supporté mes indisponibilités liées à mes contraintes professionnelles. Merci de m'avoir pris comme un fils
- Ma reconnaissance va à l'endroit du feu Professeur **BEGUIDE BONOMA** qui a initié cet encadrement et qui malheureusement n'a pas achevé sa mission parce qu'il est décédé. Je prie sa famille à travers sa veuve, **Mme BEGUIDE Jeanne** de recevoir à travers ce document ma profonde gratitude.
- Je remercie les membres du jury de soutenance de cette thèse à savoir : **Pr NDOUGSA MBARGA Théophile ; Pr BEN-BOLIE Germain Hubert ; Pr NSOUANDELE Jean Luc ; Pr HONA Jacques ; Pr EDOUNG Marcel ; Pr SIMO Elie ; Pr VONDOU Derbetini Appolinaire.**
- Je remercie **Dr KOUMI NGOH Simon** qui a sacrifié énormément de temps pendant toutes ces années pour l'aboutissement de ce travail. Merci de m'avoir encouragé quand je vivais les moments difficiles pouvant entraîner l'abandon de ces travaux. Vous m'avez adopté comme un fils qu'on veut voir réussir.
- Je remercie **Professeur NJAKOMO ESSIANE Salomé**, pour m'avoir ouvert les portes de l'ENSET d'Ebolowa.
- Je remercie le **Professeur TIEDEU ALAIN Bertin** qui m'a également adopté comme un fils, m'a accueilli et intégré à l'ENSET d'Ebolowa, a initié et facilité mon voyage de recherche au MALI.

- Je remercie tous les Enseignants du Département de Physique de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé 1 et en particulier son Chef, le **Professeur NDJAKA Jean Marie**.
- Je remercie tous les Enseignants du laboratoire d'énergie de la faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé 1 et tout particulièrement le **Professeur NJOMO Donatien** qui m'a accueilli dans ce laboratoire en 2014.
- Je remercie les aînés académiques : **Dr ABANDA Antoine Yannick, Dr YEPDIA Mariel, Dr NGAH ONGODO, Dr MAH TSILA Philippe** pour leur soutien pendant cette épreuve.
- Je remercie le Doctorant **NDJONO** pour toute son aide dans les procédures de soutenance de cette thèse.
- Je remercie les Enseignants du laboratoire des énergies renouvelables de la faculté des Sciences et techniques de l'université de Bamako. Je pense particulièrement aux **professeurs BA'A, ISSIAKA TRAORE et SANOGO**. Merci de m'avoir permis d'effectuer ce séjour de recherche dans votre laboratoire en toute quiétude.
- Je remercie **l'AFSIN** qui a financé mon voyage de recherche au Mali.
- Je remercie mes parents : feu **EDOUMA Rémy et MENGUE Marguerite** pour m'avoir donné la vie sans laquelle tout ceci ne serait possible. Mon cher Papa, Dieu n'a pas voulu que tu assistes à ma soutenance. Tu décèdes juste avant celle-ci. Merci pour ton amour
- Je remercie toute ma famille en particulier son chef **MBASSI EDOUMA Abdon** qui a pris mes études en mains depuis l'Ecole Normale Supérieure et son épouse **OMOL NDJAKA Germaine**. Toutes mes pensées vont à l'endroit de ma sœur **NTSAH EDOUMA Marceline**.
- Je remercie mes parents adoptifs à savoir : Monsieur le Gouverneur de la région du Sud Monsieur **NGUELE NGUELE Flélix et son épouse**.
- Je remercie mon ami **GUIMFACK Boris** avec qui j'ai cheminé depuis l'ENS de Maroua et qui m'a beaucoup encouragé dans la recherche.
- Je remercie mon ami et frère **Dr KAZE DJOU Arnaud** avec qui j'ai cheminé depuis l'enfance.
- Je remercie mon ami et frère **ALOA ALOA Elie Honoré** qui m'a donné l'impulsion pour cette thèse.

- Je remercie mon ami **NSANGOU CHINTOUO ABDEL SALAM** pour sa disponibilité durant ces travaux.
- Je remercie ma belle-famille et en particulier **Mme AMINATOU TAKAWAI Lydienne** qui m'a apporté son soutien financier et moral dans le cadre de cette thèse,
- Je remercie mon Enseignant de physique au lycée de Monatélé **M. MBAH MANI Léon**. Car c'est lui qui m'a donné l'impulsion des sciences physiques. Merci Monsieur d'avoir cru en moi.
- Je remercie mes amis : le Lieutenant-Colonel médecin **ONANA NGONGO Rémy**, **Dr MVONDO Nicole**, **M. SAMBA TOKO Herman** et son épouse **TIEGOM NGOUNOU Carine**.
- Tous mes remerciements à mes enfants **TAKAWAI EDOUMA Faraday**; **AMINATOU EDOUMA Carine**; **MENGUE EDOUMA Abigaëlle**; **EDOUMA MBONE Ange Nadia** et **NTSAH EDOUMA Annick Prospérine**
- Je remercie tous ceux qui m'ont aidé et que j'ai certainement oublié de mentionner ici.

## TABLE DES MATIERES

<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>v</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>x</b>
<b>LISTE DES SIGLES, ACRONYMES ET ABREVIATIONS.....</b>	<b>xi</b>
<b>CHAPITRE 1: REVUE DE LA LITTERATURE .....</b>	<b>20</b>
1.1. Situation énergétique du Cameroun.....	20
1.2. L'énergie solaire photovoltaïque.....	21
1.2.1. Conversion photovoltaïque.....	23
1.2.2. Les différentes filières photovoltaïques.....	25
1.2.2.1. La filière à base de Silicium Cristallin. ....	25
1.2.2.2. Les cellules multi-jonctions à haut rendement. ....	25
1.2.2.3. Technologie couche-mince.....	26
1.2.3. Rendement associé à une chaîne Photovoltaïque .....	27
1.2.3.1. Définition.....	27
1.2.3.2. Paramètres externes affectants le rendement photovoltaïque.....	28
1.2.4. Systèmes Photovoltaïques non raccordés au réseau.....	30
1.2.4.1. Systèmes photovoltaïques autonomes .....	30
1.2.4.1.1 Système photovoltaïque autonome sans stockage.....	30
1.2.4.1.2 Système photovoltaïque autonome avec stockage. ....	31
1.2.4.2. Systèmes photovoltaïques autonomes hybrides .....	31
1.2.4.2.1. Systèmes photovoltaïques hybrides PV/Diésel avec stockage.....	32
1.2.4.2.2. Systèmes photovoltaïques hybrides sans stockage .....	36
1.3. Production et fourniture d'oxygène médical .....	37
1.3.1. Décomposition chimique.....	38
1.3.2. Système à membrane céramique.....	39
1.3.3. Les concentrateurs d'oxygène.....	40
1.3.4. L'absorption à variation de pression (Pressure Swing Adsorption) (PSA) .....	41
1.3.5. Distillation cryogénique (Cryogenic Distillation) .....	43
1.3.5.1 Processus Linde .....	45
1.3.5.2. Processus Claude.....	46
1.3.5.3. La conception cryogénique avec alimentation d'air .....	48
1.3.5.4. La conception cryogénique avec absorption de N <sub>2</sub> sous pression modulée.....	49

1. 3.5.4.1 La conception avec un moteur d'expansion.....	49
1. 3.5.4.2. La conception avec agrandissement Joule-Thomson.....	50
1.3.6. Production d'oxygène par électrolyse.....	51
<b>CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES.....</b>	<b>53</b>
2.1 Matériel.....	53
2.1.1 Architecture et description du système.....	53
2.1.1.1. Sous-système champ solaire photovoltaïque.....	54
2.1.1.2. Sous - système électrolyseur.....	56
2.1.1.3. Sous système pile à combustible.....	60
2.2. Modélisation et dimensionnement du système. ....	62
2.2.1. Sous- système champ solaire PV. ....	62
2.2.2. Sous- système électrolyseur.....	69
2.2.3. Sous système pile à combustible.....	79
2.3 Stockage de l'hydrogène et de l'oxygène.....	80
2.4 Approche de gestion de l'énergie.....	80
2.5 Analyse économique.....	82
<b>CHAPITRE 3: RESULTATS ET DISCUSSIONS.....</b>	<b>85</b>
3.1 Ressources et variables météorologiques d'entrée.....	85
3.2. Les Effets de l'irradiation et de la température sur les caractéristiques du PV.....	91
3.3 Production d'électricité, d'oxygène et d'hydrogène.....	95
3.3.1. Évolution de la puissance de chaque composant majeur du système.....	98
3.3.2. Production d'oxygène et d'hydrogène.....	99
3.4 Évaluation des coûts et de la rentabilité.....	102
<b>ANNEXE.....</b>	<b>112</b>
<b>Liste des publications issues de la thèse. ....</b>	<b>124</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : L'irradiation solaire globale horizontale [19].....	22
Figure 2: Irradiation solaire horizontale au Cameroun [19].....	22
Figure 3 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM [24].....	24
Figure 4: Spectres Solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM. Source NREL solar spectrum. ....	24
Figure 5: Schéma de principe de la conversion photoélectrique [24]. ....	25
Figure 6 : Principe de la cellule à hétérojonction [24]. ....	26
Figure 7 : Chaîne de conversion photovoltaïque [24]. ....	28
Figure 8 : Schéma de principe d'un système PV autonome sans stockage : exemple de pompage solaire [27].....	30
Figure 9 : Schéma de principe d'un système PV autonome avec stockage [27]. ....	31
Figure 10 : Schéma de principe d'un système hybride PV/Diésel série avec stockage [28].....	33
Figure 11 Schéma de principe d'un système hybride PV/Diésel commuté avec stockage [28].....	34
Figure 12: Schéma de principe d'un système hybride PV/Diésel parallèle avec stockage [28].....	35
Figure 13 : Schéma de principe d'un système hybride PV/Diésel sans stockage [27]. ....	37
Figure 14 : Des milliers de fibres à membrane creuses <a href="http://www.storagecontrol.com/documents/permea_scs_broch.pdf">http://www.storagecontrol.com/documents/permea_scs_broch.pdf</a> .....	39
Figure 15 : Schéma simplifié du concentrateur d'oxygène [24]. ....	40
Figure 16. Compresseur d'air et concentrateur d'oxygène à l'intérieur du module [31]. ....	41
Figure 17 : Tamis moléculaire zéolite 3A : <a href="http://www.tradekey.com/product_view/id/25010.htm">http://www.tradekey.com/product_view/id/25010.htm</a> ....	41
Figure 18 : Installation d'oxygène par adsorption modulée en pression [29]. ....	42
Figure 19 : Mécanismes de fourniture d'oxygène médical produits via PSA [29]. ....	43
Figure 20 : Usine cryogénique de production d'oxygène liquide [29]. ....	44
Figure 21: Processus de liquéfaction Linde [30]. ....	45
Figure 22 Diagramme température-entropie pour le procédé Linde [30]. ....	45
Figure 23 : Une Colonne Linde [30] .....	46
Figure 24 : Diagramme température-entropie pour le procédé Claude [30]. ....	47
Figure 25 : Processus de liquéfaction Claude [30]. ....	47
Figure 26 : Processus pour la conception cryogénique avec alimentation d'air [30]. ....	48
Figure 27 : Cryogénique avec PSA pour N <sub>2</sub> et un moteur d'expansion distillation [30]. ....	49
Figure 28 : Distillation cryogénique avec PSA pour N <sub>2</sub> et un avec vanne J-T [30]. ....	50
Figure 29 : Mécanismes de fourniture d'oxygène médical produit par la distillation cryogénique [29]. .....	51
Figure 30: Représentation schématique du système de production d'électricité solaire et d'oxygène medical sur site.....	54
Figure 31: Différentes technologies des cellules PV au silicium. De gauche à droite : poly-cristallin, monocristallin et amorphe [40]. ....	55
Figure 32: constitution d'un électrolyseur [52]. ....	58
Figure 33 : Eléments constitutifs de l'électrolyseur PEM [53]. ....	59
Figure 34: Schéma du principe de fonctionnement d'une cellule d'électrolyse de l'eau alcaline et PEM [51]. ....	59
Figure 35: Processus de de fonctionnement de la pile à combustible [52]. ....	61
Figure 36: Représentation du champ PV et du modèle à une diode [68]. ....	64
Figure 37: Couplage de modèles thermiques et électrochimiques [51]. ....	76

Figure 38: Représentation schématique d'un électrolyseur PEM [108].....	76
Figure 39: Organigramme de gestion optimale du système PV/électrolyseur/pile à combustible .....	83
Figure 40: Evolution par seconde de l'irradiation dans la zone d'étude. ....	86
Figure 41: Evolution par seconde de la température dans la zone d'étude. ....	86
Figure 42: Evolutions horaire de l'irradiation solaire pendant les jours le plus et moins ensoleillés de l'année. ....	87
Figure 43: Evolutions horaire de la température pendant les jours le plus et moins ensoleillés de l'année. ....	88
Figure 44: Moyennes horaires de la température pendant les jours le plus et moins ensoleillés de l'année. ....	89
Figure 45: Evolution mensuelle de l'irradiation solaire pendant les mois le plus et le moins ensoleillé de l'année. ....	89
Figure 46: Evolution mensuelle de la température pendant les mois le plus et le moins ensoleillé de l'année. ....	90
Figure 47: Evolution journalière de la demande en électricité pour l'hôpital et l'électrolyseur 1. ....	91
Figure 48: Comparaison des courbes P-V obtenues avec les approches hybrides et par le logiciel MATLAB de la fonction de Lambert.....	92
Figure 49: Comparaison des courbes I-V obtenues avec les approches hybrides et par le logiciel MATLAB de la fonction de Lambert.....	92
Figure 50: Caractéristiques courant-tension de la cellule PV pour différents rayonnements solaires pendant le jour le plus ensoleillé de l'année.....	93
Figure 51: Caractéristiques courant-tension de la cellule PV pour différents rayonnements solaires pendant le jour le moins ensoleillé de l'année.....	94
Figure 52: Caractéristiques puissance-tension de la cellule PV pour différents rayonnements solaires pendant le jour le plus ensoleillé de l'année.....	94
Figure 53: Caractéristiques puissance -tension de la cellule PV pour différents rayonnements solaires pendant le jour le moins ensoleillé de l'année.....	95
Figure 54: Evolution horaire de la puissance produite par le PV pendant les jours le plus ensoleillé et le moins ensoleillé de l'année par dimensionnement non optimal. ....	96
Figure 55: Comparaison de la puissance PV et de l'électrolyseur pendant l'heure la plus ensoleillée de l'année. ....	97
Figure 56: Evolution des puissances produite par le PV et la puissance consommée par les composants du système pendant le jour le plus ensoleillé de l'année. ....	97
Figure 57: Evolution des puissances produite par le PV et la puissance consommée par les composants du système pendant le jour le moins ensoleillé de l'année. ....	98
Figure 58: Evolution seconde par seconde de la production d'oxygène pendant une heure la plus ensoleillée de l'année par l'approche non optimale. ....	100
Figure 59 : Evolution seconde par seconde de la production d'hydrogène pendant une heure la plus ensoleillée de l'année par l'approche non optimale. ....	100
Figure 60: Evolution pendant les jours le plus et moins ensoleillés de l'année des paramètres électriques (courant et tension) du champ PV puis d'oxygène et d'hydrogène. ....	101
Figure 61: Evolution pendant les mois le plus et moins ensoleillés de l'année des paramètres électriques (courant et tension) du champ PV puis d'oxygène et d'hydrogène. ....	102
Figure 62: Evolution du NPV sur le cycle de vie de chaque composant pour les projections bas, médian et haut. ....	104
Figure 63: Impact du coût de vente de l'électricité sur la durée de vie du projet en fonction du NPV. ....	105

Figure 64 : Effets de l'exonération de taxes sur le NPV durant le cycle de vie du projet.....	106
Figure 65: Coûts CAPEX, OPEX et total pour les principaux composants du système.....	107
Figure 66: Coûts CAPEX, OPEX et total composants auxiliaires du système. ....	108
Figure 67: Le poids du coût CAPEX de chaque composant .....	108

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Performance de la filière Silicium simple jonction [24].....	27
Tableau 2: Performances des six implémentations de la fonction de Lambert pour le cas des arguments positifs [70]. .....	68
Tableau 3 : Performances des six implémentations de la fonction de Lambert sur une courbe I-V d'un champ PV de 4kW [70].....	68
Tableau 4 : Caractéristiques électriques des composants majeurs du système. ....	90

## LISTE DES SIGLES, ACRONYMES ET ABREVIATIONS

### I. Liste des acronymes et abréviations

<b>PV</b>	Photovoltaïque
<b>AM</b>	Air-Masse
<b>MPPT</b>	Maximum Power Point Tracking
<b>PSA</b>	Pressure Swing Absorption
<b>SEOS</b>	Solid Electrolyte Oxygen
<b>PEM</b>	Proton Exchange Membrane
<b>PEMFC</b>	Proton Exchange Membrane Fuel cell
<b>PAC</b>	Pile A Combustible
<b>AFC</b>	Alcalin Fuel Cell
<b>DMFS</b>	Direct Methanol Fuel Cell
<b>PAFC</b>	Phosphorique Acide Fuel cell
<b>MCFC</b>	Molten Carbonate Fuel Cell
<b>SOFC</b>	Solide Oxyde Fuel cell
<b>LLP</b>	Loss of load probability
<b>MATLAB</b>	MATrix LABoratory
<b>NPV</b>	Net Present Value
<b>PV-GIS</b>	Photovoltaic Geographical Information System
<b>CAPEX</b>	Capital expenditure
<b>OPEX</b>	Operational expenditure.
<b>CURES</b>	Centre Universitaire de Recherche en Energie pour la Santé
<b>IRENA</b>	International Renewable Energy Agency
<b>PDER</b>	Plan Directeur d'Electrification Rurale
<b>OMS</b>	Organisation Mondiale de la Santé
<b>HTA</b>	Réseau Haute Tension
<b>AFSIN</b>	African Spectral Imaging Network

## II. Lettres, symboles grecs et indices

<b>U</b>	Tension (V)
<b>T</b>	Température (K)
<b>P</b>	Puissance (W)
<b>R</b>	Constantes des gaz parfaits
<b>H</b>	Enthalpie (J/mol)
<b>S</b>	Entropie (J/mol/K)
<b>F</b>	l'unité du Faraday
<b>R<sub>p</sub></b>	Résistance shunt (ohm)
<b>R<sub>s</sub></b>	Résistance série (ohm)
<b>SIR</b>	Solar Irradiation s (Kwh/m <sup>2</sup> /jour)
<b>V</b>	volume (m <sup>3</sup> )
<b>η<sub>F</sub></b>	Rendement de faraday
<b>V<sub>H2_ELZ_tank</sub></b>	Volume de H <sub>2</sub> dans le réservoir de stockage de l'électrolyseur.
<b>V<sub>O2_ELZ_tank</sub></b>	Volume de O <sub>2</sub> dans le réservoir de stockage de l'électrolyseur.
<b>V<sub>H2_tank_FC</sub></b>	Volume de H <sub>2</sub> dans le réservoir de stockage de La pile à combustible.
<b>V<sub>O2_tank_FC</sub></b>	Volume de O <sub>2</sub> dans le réservoir de stockage de la pile à combustible.
<b>E<sub>kWh</sub></b>	Production annuelle de l'électricité par le système.
<b>N<sub>elz</sub></b>	Nombre de cellules de l'électrolyseur
<b>R</b>	paramètre relatif à la résistance ohmique de l'électrolyseur, Ωm <sup>2</sup>
<b>S</b>	Coefficient de surtension sur les électrodes, V
<b>C<sub>p</sub></b>	compresseur
<b>rev</b>	réversible
<b>oc</b>	open circuit
<b>ohm</b>	ohmique
<b>act</b>	activation
<b>con</b>	concentration
<b>elz</b>	électrolyseur
<b>PL</b>	charge prioritaire
<b>FC</b>	pile à combustible

<b>ph</b>	photo
<b>th</b>	thermique
<b>cons</b>	consommé
<b>st</b>	stoechiométrique
<b>ds</b>	saturation de la diode
<b>m</b>	molaire
<b>PV</b>	photovoltaïque
<b>max</b>	maximum
<b>min</b>	minimum
<b>TK</b>	reservoir
<b>mc</b>	monocristallin
<b>pc</b>	polycristallin
<b>si</b>	silicium

## RÉSUMÉ

Beaucoup de pays et en majorité ceux de l'Afrique subsaharienne dont le système énergétique est fragile, souffrent d'une pénurie en fourniture d'électricité et en gaz médicaux en occurrence l'oxygène médical. Les hôpitaux des sites isolés du réseau électrique s'alimentent pour la plupart au moyen des groupes électrogènes qui constituent une source de nuisance sonore pour les patients et le problème de la pollution atmosphérique n'est pas en reste. Par ailleurs le problème de la fourniture en carburant lié à la chaîne logistique de transport. Les méthodes de production et de fourniture en oxygène médical mises en place actuellement dans de nombreux pays (les PSA et la distillation cryogénique) nécessitent une chaîne logistique d'approvisionnement coûteuse et rend les gaz médicaux non disponibles en temps opportun pour les interventions médicales.

Cette thèse propose donc une solution qui répond à cette double problématique. Ses travaux sont axés sur la faisabilité technico-économique d'un tel projet. L'étude est menée dans une région tropicale et ensoleillée hors réseau. Le système installé à cet effet comprend : un champ photovoltaïque, deux électrolyseurs (un électrolyseur prioritaire dont le rôle est de produire l'oxygène médical et un autre secondaire qui reçoit l'excédent de production PV) et une pile à combustible qui sert de stockage d'énergie. Ce système est conçu pour répondre à la fois aux besoins quotidiens en énergie et en oxygène médical de l'hôpital qui se chiffrent à 600.5 KWh/jour et à 20 m<sup>3</sup> respectivement.

Une analyse économique est faite pour évaluer la rentabilité du projet. Les résultats obtenus à l'issue du dimensionnement et de la simulation de chaque sous-système indiquent une production d'énergie électrique supérieure à la consommation journalière du système et dont l'excédent est stocké en vue de compenser le déficit pendant les mois les moins ensoleillés de l'année. Une production excédentaire de l'oxygène a aussi été obtenue. L'analyse économique du système montre que le projet devient rentable après 4 ans si l'on n'applique pas l'exonération fiscale sur les composants et sa rentabilité s'observe après 02 ans seulement si les composants du système sont exonérés des frais de douane comme le prévoit la loi des finances Camerounaise.

**Mots clés : Electricité solaire ; Electrolyseur ; oxygène médical ; Système de production ; Etude économique ; Rentabilité.**

**ABSTRACT**

Many countries, and mostly those in sub-Saharan Africa, whose energy system is fragile, suffer from a shortage of electricity supply and medical oxygen. Hospitals located on isolated sites are mostly powered by generators; however, supply by this means presents source of noise pollution for patients, the problem of atmospheric pollution is not left out and constitutes a danger for the patients. The methods of production and supply of medical oxygen currently in place in many countries (PSA and cryogenic distillation) require a supply chain that is costly and not available in a timely manner for medical interventions.

This thesis therefore proposes a solution that responds to this double problem. Its work focuses on the technical and economic feasibility of such a project. The study is conducted in a tropical and sunny region characterized by electrical disturbances. It includes: a photovoltaic field, two electrolyzers to produce medical gases and a fuel cell that serves as energy storage. This system is designed to meet both the daily energy and medical oxygen needs of the hospital, which amount to 600.5 KWh/day and 20 m<sup>3</sup> respectively. An economic analysis is done to assess the net present value of the project and its profitability. The results obtained at the end of the dimensioning and the simulation of each subsystem indicate a production of electrical energy higher than the daily consumption of the system and whose surplus is stored in order to compensate for the deficit during the least months. Sunshine of the year. Surplus production was also achieved in oxygen. The economic analysis of the system shows that the project becomes profitable after 4 years without tax exemption on the components and after only around 02 years if the components of the system are exempt from customs fees as provided for by Cameroonian finance law.

**Keywords : Solar electricity ; Electrolyser; Medical oxygen; production system, economie study; Profitability;**

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'énergie revêt une importance pour le développement durable. En effet, il est reconnu que les services énergétiques ont un effet profond sur la productivité, la santé, l'enseignement, les changements climatiques, la sécurité alimentaire et la sécurité de l'approvisionnement en eau. C'est pourquoi l'absence d'accès à une énergie propre, abordable et fiable, entrave le développement humain, social et économique et constitue un obstacle majeur à la réalisation des objectifs du millénaire pour le développement. Par ailleurs, l'épuisement prévisible des énergies fossiles, la nécessité de lutter contre le réchauffement climatique, la prise de conscience pour la sauvegarde de l'environnement, et enfin la prise en compte du développement durable dans les politiques énergétiques, ont mis les énergies renouvelables au cœur d'un enjeu stratégique pour l'avenir de notre planète. Selon Arnaud Rouget, analyste Afrique à l'Agence Internationale de l'Energie, Près de la moitié des Africains (six cent millions de personnes) n'ont pas accès à l'électricité en 2018 et environ 80% des entreprises d'Afrique subsaharienne subissent des coupures fréquentes, entraînant des pertes économiques substantielles. L'une des solutions à ce déficit énergétique est l'adoption véritable des énergies renouvelables donc l'énergie solaire. Le Cameroun en particulier regorge des ressources renouvelables à l'instar de l'énergie solaire où les valeurs moyennes de l'irradiation solaire sont de l'ordre de 4.9 Kwh/m<sup>2</sup>/j sur toute l'étendue du territoire national, 5,8 Kwh/m<sup>2</sup>/j dans la partie Nord du pays et 4 Kwh/m<sup>2</sup>/j dans la partie Sud [1]. Mais les énergies renouvelables implantées représentent seulement 0,09% de la puissance totale installée sur le territoire Camerounais, soit 0,01 % du solaire photovoltaïque. Tout comme la plupart des pays de l'Afrique subsaharienne, la situation de l'électrification rurale au Cameroun est inquiétante. Les rapports du plan directeur de l'électrification rurale (PDER) élaboré en 2016 et du ministère de l'eau et de l'énergie (MINEE) élaboré en 2021 donnent les chiffres suivants [2] : Sur les 13104 localités répertoriées, 9000 sont non électrifiées ce qui fait que 26% des populations du Cameroun n'aient pas accès à l'électricité. Une majeure des partie des localités non électrifiées ont moins de 500 habitants et se trouvent à plus de 50 Km du réseau électrique HTA, soit une population de 5 168 997 habitants. Cette situation montre que malgré les efforts du gouvernement Camerounais pour augmenter la production électrique via la construction de plusieurs centrales hydroélectriques, le coût élevé du transport de l'électricité des centres de production vers les lieux de distributions éloignés de ces sites, par ailleurs le faible nombre de consommateurs de ces sites, ne permet pas

aux investisseurs de faire un retour à l'investissement. Cet état de chose cause l'utilisation des groupes électrogènes dans les différents services publics, les domiciles et même dans les centres hospitaliers qui s'y trouvent. Le problème logistique de la chaîne d'approvisionnement du gazole pour alimenter ces groupes rend difficile la continuité d'approvisionnement en électricité. Par ailleurs, le souci de préserver l'environnement exige la limitation de cette source d'énergie fossile.

Le système de santé intègre l'oxygène médical comme produit de traitement de plusieurs pathologies respiratoires comme ce fut avec le cas de la pandémie de H<sub>1</sub>N<sub>1</sub> en 2009 et depuis 2019 avec la pandémie de la COVID 19. Il y a une forte corrélation entre fourniture d'électricité et production d'oxygène médical car toutes les méthodes de production d'oxygène demandent une consommation en énergie électrique. Cette forte corrélation justifie donc le fait que les pays dont le système énergétique est fragile connaissent des pénuries en oxygène médical ; notamment les pays de l'Afrique subsaharienne. Cette situation oblige beaucoup de pays de cette partie de l'Afrique à exporter de l'oxygène médical en l'occurrence le Ghana, la Namibie et le Zimbabwe selon le rapport de la banque mondiale en 2020.

L'un des principaux problèmes auxquels est confronté le système de santé dans les pays à faible revenu est la fréquence des interruptions imprévues du système d'approvisionnement en électricité et l'indisponibilité accrue d'oxygène médical abordable [3,4]. Une analyse similaire a été rapportée par Adair-Rohani et al. [5], qui ont souligné que les dysfonctionnements des dispositifs médicaux dans les pays en développement reflètent des défaillances dans les systèmes d'alimentation électrique et entraîne une augmentation du nombre de plaintes liées à la prestation inefficace des services de santé. Dans le contexte spécifique du Cameroun, l'analyse des informations obtenues auprès d'un échantillon représentatif d'hôpitaux par le CURES a permis de mettre à jour plusieurs questions à traiter. Ces questions sont notamment les suivantes : la rupture de l'alimentation électrique d'une durée de quelques heures à plusieurs jours ; les baisses de tension, les interruptions courtes, les variations de tension et les déséquilibres électriques [6]. Les résultats ont également révélé les problèmes de mauvaise qualité de l'énergie qui peuvent avoir des conséquences indésirables et raccourcir la durée de vie des dispositifs médicaux branchés directement sur la source d'alimentation du réseau. Concernant la disponibilité de l'oxygène médical dans le réseau de santé camerounais, seuls 3 des 27 hôpitaux référents disposent d'une unité de production d'oxygène. En outre, seuls 42 % des hôpitaux de district disposent d'une bouteille d'oxygène et seulement 51 % d'un concentrateur d'oxygène [6]. L'oxygène utilisé dans les hôpitaux est en grande partie fourni par les fabricants de gaz médicaux. Les concentrateurs d'oxygène, recommandés par l'Organisation

Mondiale de la Santé (OMS), sont progressivement intégrés dans la chaîne d'approvisionnement en oxygène existante dans certains grands hôpitaux [6]. La difficulté d'accès à l'oxygène médical est alors une question importante en ce qui concerne le besoin vital qui comprend la chirurgie, les unités de soins intensifs et la thérapie par inhalation. L'ampleur du problème de l'indisponibilité de l'oxygène a augmenté dans les hôpitaux camerounais lors de la récente pandémie de COVID-19. Pour répondre aux enjeux liés à l'arrêt fréquent de l'oxygène médical, plusieurs solutions technologiques sur site sont explorées et rapportées. Ces solutions valorisent l'utilisation de concentrateurs d'oxygène alimentés par l'électricité solaire ou favorisent l'apport d'oxygène solaire, qui utilise l'électricité photovoltaïque (PV) pour concentrer l'oxygène de l'air ambiant [7,8]. L'un des procédés les plus explorés est l'option électrolytique de l'oxygène qui offre une flexibilité avec l'hydrogène comme coproduit pour obtenir un vecteur de stockage d'énergie intéressant. Un électrolyseur couplé à un champ photovoltaïque comme source d'énergie pour un hôpital a été envisagé dans plusieurs études. Ces nouvelles technologies énergétiques ont également été promues comme une solution aux hôpitaux alimentés dans certaines études [9-11]. Toutefois, dans les travaux susmentionnés, la valorisation possible de l'oxygène pour les soins médicaux n'a pas été envisagée et l'analyse financière n'a pas été effectuée. Récemment, Maggio et al [12], Nicitta et al [13], puis Squadrito et al [14] ont proposé un système similaire valorisant la production d'oxygène médical dans un électrolyseur alcalin alimenté par un sous-système PV ; mais la charge hospitalière n'était pas directement prise en compte et le système était totalement dédié à la production d'oxygène médical. La faisabilité économique du système a également été évaluée pour les petites et grandes installations de système en supposant un prix de vente réaliste de l'oxygène et de l'hydrogène respectivement d'environ 4 euros / kg et de l'ordre de 6 à 10 euros / kg dans le contexte italien. Koumi et al [15] ont également validé la faisabilité d'une combinaison PV-électrolyseur comme solution durable pour la production d'électricité verte et d'oxygène médical dans les hôpitaux ruraux ; mais sans évaluer l'impact financier d'un tel projet. Cette thèse a pour objectif de concevoir un système qui pourra répondre à cette double problématique à savoir produire à la fois l'oxygène médical sur site et fournir de l'électricité solaire à un hôpital non connecté au réseau.

Cette thèse comporte trois chapitres en plus de l'introduction et de la conclusion générale.

Le premier chapitre présente une revue de la littérature sur le système solaire photovoltaïque et sur la production d'oxygène médical. Dans ce chapitre, La situation énergétique du Cameroun y est d'abord présentée puis l'énergie solaire photovoltaïque à travers sa disponibilité mondiale, sa conversion, ses différentes technologies et ses types de montages sur sites autonomes. Le chapitre

présente dans la suite les différentes méthodes de production d'oxygène médical; leurs technologies, les avantages et les limites de chaque type.

Le deuxième chapitre porte sur le matériel et la méthodologie utilisées. Chaque sous-système est présenté et modélisé. Une approche de gestion de l'énergie y est présentée et une analyse économique du système est effectuée.

Le troisième chapitre porte sur l'analyse des résultats obtenus. Tout d'abord les paramètres climatiques sont présentés pour vérifier que la zone d'étude est propice à l'implantation d'un tel projet. La production d'énergie et d'oxygène médical sont évalués pendant les périodes de fort et de faible rayonnement au cours de l'année et comparés aux besoins de l'hôpital. Le chapitre se referme sur l'analyse des résultats de l'étude économique, pour vérifier la soutenabilité d'un tel projet.

Ce mémoire de thèse s'achève avec une conclusion générale puis quelques perspectives pour améliorer cette étude.

## CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTERATURE

### Introduction

Le système de production d'oxygène médical et d'électricité solaire nécessite des connaissances préalables sur le fonctionnement de la source d'énergie solaire et aussi les méthodes de production d'oxygène médical. C'est dans cette optique que le présent chapitre présente dans un premier temps la situation énergétique du Cameroun pour impliquer l'étude de l'énergie solaire qui est une des ressources abondamment exploitables. Dans cette étude nous aborderons la conversion photovoltaïque, les différentes filières photovoltaïques, le rendement d'une cellule photovoltaïque puis les types de montages photovoltaïques en autonome. Dans un deuxième temps, ce chapitre aborde les différentes méthodes de production d'oxygène médical puis les avantages et inconvénients de chaque type de méthode de production.

### 1.1. Situation énergétique du Cameroun

Le Cameroun est un pays de l'Afrique centrale s'étendant de 1 200 km de latitude 2° Nord à 13° Nord et sur 800 km de longitude 3° Est à 16° Est. Sa superficie est d'environ 475 000 Km<sup>2</sup>. ses caractéristiques géographiques et les climats font du Cameroun un pays au fort potentiel énergétique et diversifié. On y retrouve des forêts tropicales, des montagnes, des savanes, des régions côtières et désertiques. Ces atouts permettent d'y retrouver un gisement hydraulique, solaire, éolien, géothermique et biomasse. Ainsi donc, en dehors des sources fossiles, les énergies renouvelables sont exploitables. Selon les chiffres du Ministère de l'eau et de l'énergie, du 4<sup>ème</sup> rapport du PDSE et du rapport annuel d'Eneo 2020 sur la situation énergétique du Cameroun, Plus des trois quarts de l'électricité produite ont été consommés par les secteurs industriel et résidentiel. La capacité de production d'électricité dans le pays s'élève à environ de 1500MW en 2020. Cette production provient de trois types de sources : l'hydroélectricité (62,8% soit 967 MW), l'énergie thermique (37,12% soit 571,8 MW) et les sources d'énergies renouvelables (0,09%) soit 0,01 % du solaire photovoltaïque [16]. Il est donc visible que le secteur électrique est dominé par l'hydroélectricité et les centrales thermiques. L'énergie renouvelable ne représente que 1 % de la production intérieure brute d'électricité. L'irradiation solaire moyenne de 4,3 Wh/m<sup>2</sup>/jour sur tout

le territoire (5.8 Kwh/m<sup>2</sup>/jour dans la partie nord du pays et de 4.9 Kwh/m<sup>2</sup>/jour dans le grand sud) [1] montre que l'énergie solaire présente des perspectives intéressantes à travers tout le pays comme le montre la figure 1.1. Deuxième plus grand potentiel en biomasse en Afrique subsaharienne, le Cameroun regorge 25 millions d'hectares de forêts couvrant trois quarts de son territoire. Le potentiel en biomasse est constitué des récoltes agricoles et des résidus de bois provenant de l'exploitation forestière. Deuxième plus grand potentiel hydroélectrique en Afrique subsaharienne avec un potentiel estimé à 23 GW, plusieurs centrales hydroélectriques sont installées au Cameroun : Edea (263 MW) ; Songloulou (388 MW) ; Lagdo (72 MW) ; Memve'ele (211 MW) ; Mekin (15 MW). Le potentiel éolien moyen sur le plan national présente les vents de 2 à 4 m/s à des altitudes voisines de 100 mètres. Le potentiel géothermique est encore mal connu, mais semble propice dans le Mt Manengouba et dans la région de Ngaoundéré, selon le 'Cameroon contry Report ,2014 '.

## 1.2. L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire est la forme d'énergie renouvelable la plus abondante [17]. Cette énergie provenant du soleil est exploitable et convertie en deux applications : l'énergie électrique et l'énergie thermique. L'énergie du soleil que reçoit la terre permet de produire 7900 fois plus d'énergie que la population mondiale utilise actuellement [17]. En moyenne à l'échelle mondiale, chaque mètre carré de terre qui reçoit suffisamment de soleil peut générer 1700 KW de puissance chaque année [18]. La figure 1.1 nous donne une idée sur l'abondance de l'énergie solaire dans le monde et donc qui semble être une source d'énergie inépuisable. Cette figure montre que les pays en développement ont un fort potentiel pour recevoir suffisamment de rayonnement solaire en raison de leur situation géographique par rapport aux pays développés. L'énergie est connue comme une source d'énergie renouvelable, réalise son potentiel et les avantages que l'énergie solaire peut apporter pour faire face aux conséquences du changement climatique et les questions de sécurité énergétique.

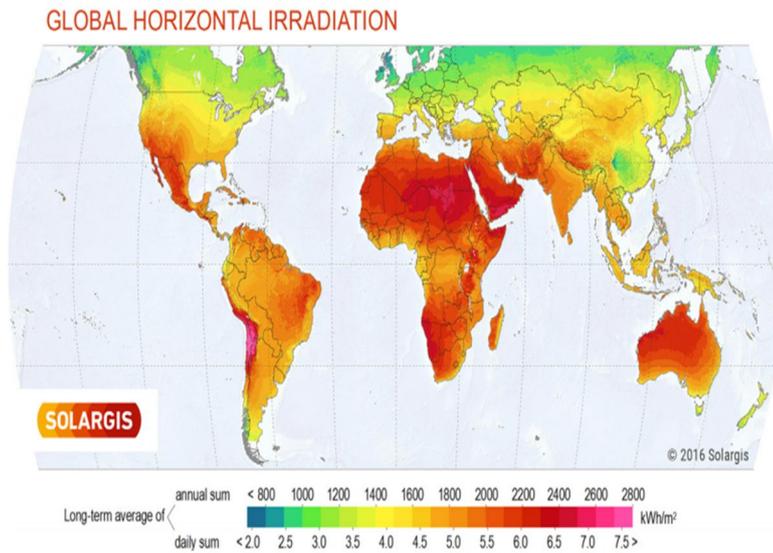


Figure 1 : L'irradiation solaire globale horizontale [19]

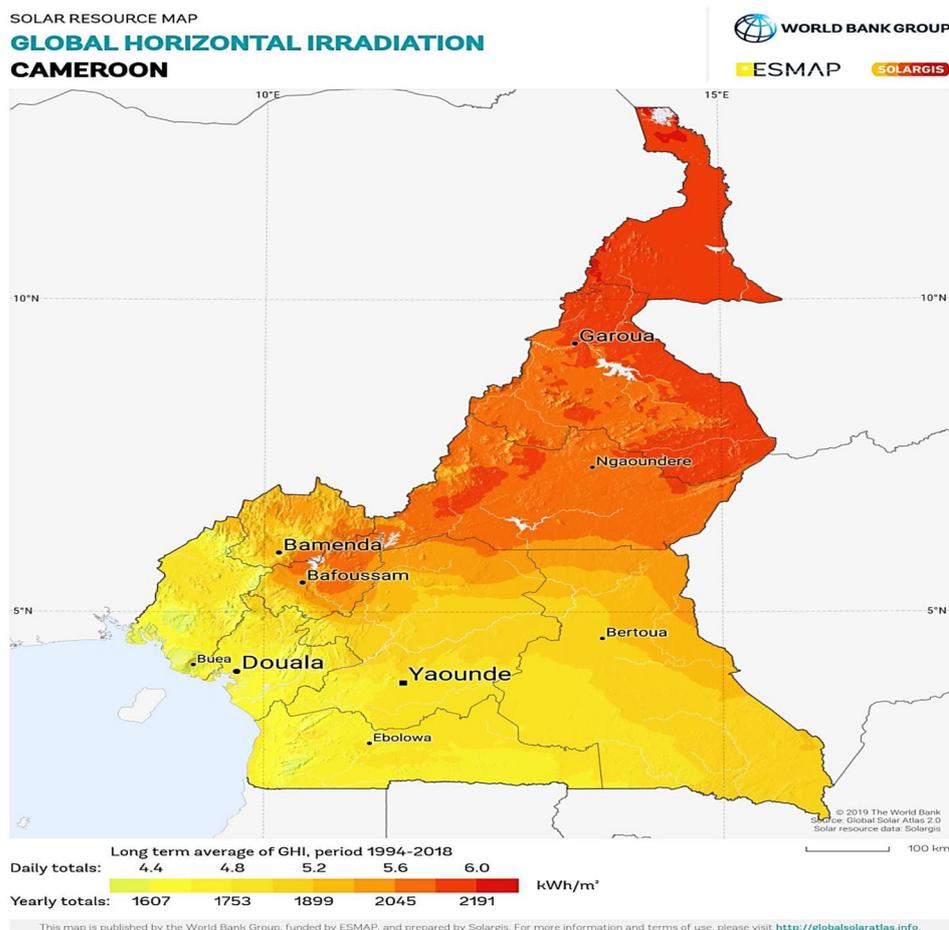


Figure 2: Irradiation solaire horizontale au Cameroun [19]

### 1.2.1. Conversion photovoltaïque

L'énergie solaire PV est une source d'énergie renouvelable, qui est transformée en électricité par les panneaux solaires PV.

Un panneau photovoltaïque est un convertisseur composé de cellules photovoltaïques transformant l'énergie lumineuse en courant électrique. Il utilise l'effet photoélectrique découvert par Heinrich Hertz, présenté pour la première fois par Antoine Becquerel en 1839 et expliqué par Albert Einstein en 1905 [20]. La majorité des panneaux solaires actuels sont constitués de silicium. Le silicium est un élément que l'on retrouve en abondance sur terre, car il est extrait de la silice principalement contenue dans le sable. Cet élément a des propriétés indispensables dans la production d'électricité (c'est le semi-conducteur le plus utilisé actuellement [21]).

La conversion photovoltaïque est définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière (une cellule photovoltaïque) : On obtient l'énergie solaire photovoltaïque. Ces photons proviennent du rayonnement solaire qui est constitué de photons de longueur d'onde s'étendant de l'ultraviolet ( $0.2\mu\text{m}$ ) à l'infrarouge lointain ( $2.5\mu\text{m}$ ). Pour caractériser le spectre solaire en terme d'énergie émise, on utilise la notion AM [22, 23]. Le rayonnement solaire transporte une énergie totale de  $1350\text{ W/m}^2$  dans l'espace hors atmosphère terrestre [24]. Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre à la suite des phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. La couche d'ozone absorbe donc une partie du spectre lumineux provenant du soleil et beaucoup plus les ultraviolets qui sont dangereux pour la santé. Cette absorption du spectre lumineux par l'atmosphère (AM1) fait que Le rayonnement solaire reçu au niveau du sol (incliné à  $90^\circ$ ) n'atteigne plus que  $1000\text{ W/m}^2$ . Il faut noter tout de même que cette valeur change en fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol. Plus l'angle de pénétration  $\Theta$  est faible, plus il y a perte d'énergie. Par exemple, lorsque le rayonnement solaire arrive à la surface de la terre sous une incidence de  $48^\circ$ , l'énergie solaire vaut  $833\text{ W/m}^2$  (AM1.5) [24].

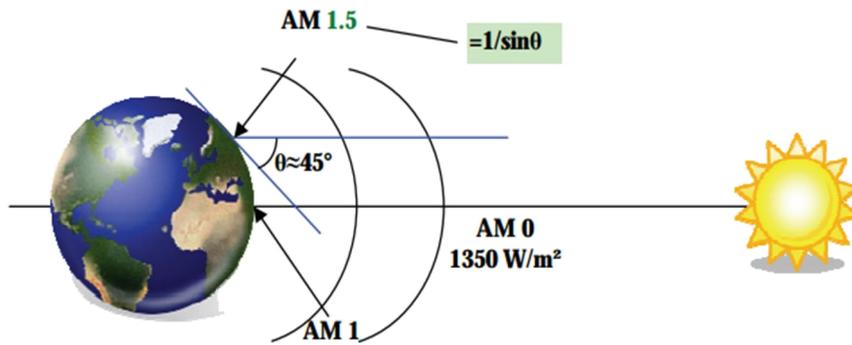


Figure 3 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM [24]

La lumière du soleil peut être captée puis transformée en courant électrique. Ce phénomène connu sous le nom d'effet photoélectrique est découvert par Edmond Becquerel en 1839 [25]. Par la suite, Albert Einstein découvre que la lumière transporte des particules appelées photons.

Ces photons sont dotés d'une énergie telle que :

$$E = h \cdot C / \lambda$$

Où  $h$  est la constante de Planck,  $C$  la vitesse de la lumière et  $\lambda$  sa longueur d'onde.

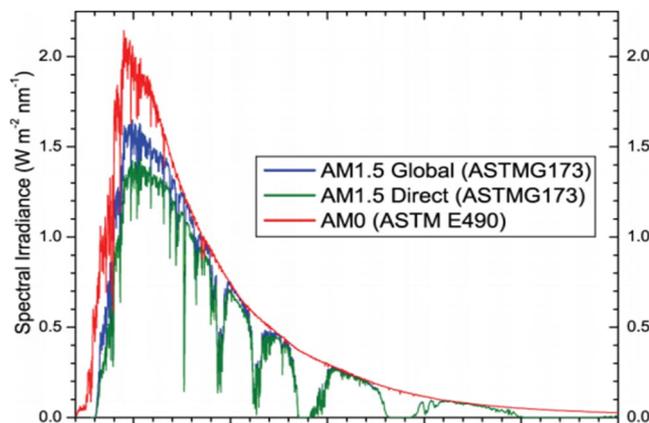


Figure 4: Spectres Solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM. Source NREL solar spectrum.

Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, une partie de son énergie arrache un électron par collision. Cet électron passe d'un niveau d'énergie inférieur à un niveau d'énergie supérieur, créant

un déséquilibre électrique au sein de la matière se traduisant par une paire électron-trou de même énergie électrique. Pour que ce phénomène se produise, certaines conditions doivent être réunies, voilà pourquoi la conversion photon-électron est faible. La grande majorité de l'énergie solaire reçue par le matériau est absorbée sous forme thermique par le matériau. Cet effet thermique détruit la plupart des capteurs et diminue les performances de ce dernier [26].

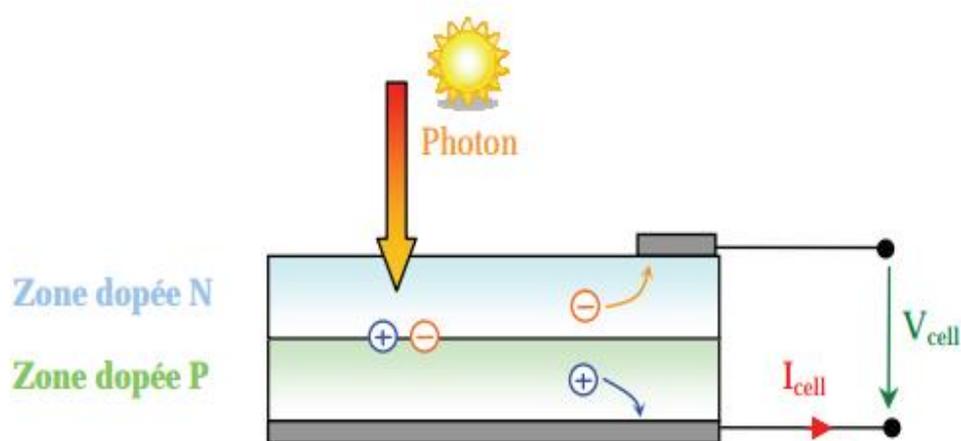


Figure 5: Schéma de principe de la conversion photoélectrique [24]

## 1.2.2. Les différentes filières photovoltaïques

### 1.2.2.1. La filière à base de Silicium Cristallin

Les modules photovoltaïques à base du silicium cristallin dominent actuellement le marché avec 90% de ventes [24]. On distingue le silicium monocristallin (mc-Si) et le silicium Poly-cristallin (pc-Si). Les modules au silicium monocristallin coûtent plus chères que les poly-cristallin mais présentent un rendement plus élevé que ces derniers [24].

### 1.2.2.2. Les cellules multi-jonctions à haut rendement

Les cellules multi-jonctions corrigent le problème de conversion PV des cellules simple jonction. Le problème de conversion PV des cellules simple jonction est que, seuls les photons dont l'énergie est égale ou supérieure à la bande interdite du matériau ( $E_g$  en eV) peuvent extraire les électrons du métal. C'est l'une des raisons pour lesquelles la réponse photovoltaïque d'une cellule simple jonction est limitée. L'énergie des photons plus faible n'est pas utilisable dans ce cas. Pour exploiter tous les photons (ceux de faible et de forte énergie), un système à plusieurs niveaux est

développé en empilant des jonctions possédant des gaps croissants comme le montre la figure 1.6. Cette disposition permet d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi-totalité dans le but d'augmenter leur rendement de conversion.

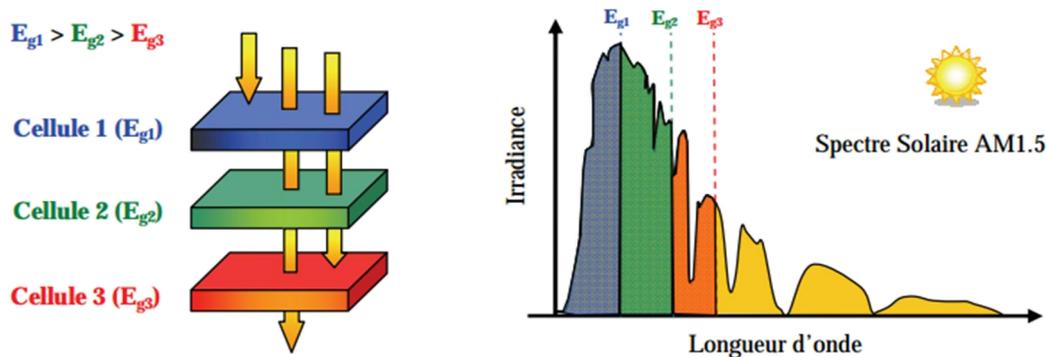


Figure 6 : Principe de la cellule à hétérojonction [24]

Les cellules PV multi-jonction présentent des rendements très élevés parfois supérieurs à 40 % mais leur coût de fabrication est très élevé et présentent un défaut d'interface [24]. Ces cellules ont été mises sur pied vers les années 60 pour les applications spatiales. En dehors de leur rendement élevé, ces cellules ont un avantage de résister aux fortes radiations solaires et peuvent être toujours performantes même après leur vieillissement.

### 1.2.2.3. Technologie couche-mince

Les cellules PV à couches minces (thin-film) sont dites de seconde génération. Elles se différencient des autres cellules cristallines par la faible quantité de matériaux utilisés. Juste quelques microns d'épaisseur du matériau photosensible efficace sont nécessaires pour absorber le rayonnement solaire. Cette technologie vise également la limitation des coûts de fabrications. Aujourd'hui, trois technologies à couches minces sont émergentes [24] :

- Le silicium amorphe et microcristallin noté TFS<sub>i</sub> (Thin-Film silicon)
- Le semi-conducteur poly-cristallin CdTe (Tellure de cadmium)
- L'alliage Cu(In,Ga) Se<sub>2</sub> (cuivre-Indium/Gallium-Sélénium) noté CIGS.

Il est à noter que des recherches ont permis aujourd'hui d'obtenir une nouvelle technologie de cellules PV à hétérojonction en alliant le silicium amorphe et me monocristallin. Cette nouvelle technologie est d'ailleurs développée par l'entreprise Sango [24]. Cette association permet d'obtenir des rendements de plus de 16% même à haute température avec une durée de vie supérieure à 20 ans [24].

Les filières silicium les plus présentes actuellement sur le marché sont : le poly-cristallin ; le monocristallin et le cristallin amorphe. Le tableau 1 présente ces trois filières avec leurs rendements, leurs dégradations.

Tableau 1 : Performance de la filière Silicium simple jonction [24]

Technologie	Rendement Typique	Influence Température	Taux de dégradation
Monocristallin	12 à 16%	-0.442% par °C	-0.38% par an
Poly-cristallin	11 à 14%	-0.416% par °C	-0.35% par an
Amorphe	6 à 7%	+0.175 % par °C	-1.15% par an

### 1.2.3. Rendement associé à une chaîne Photovoltaïque

#### 1.2.3.1. Définition

Le rendement d'une chaîne de conversion photovoltaïque est nécessaire d'être évalué car le rayonnement PV reçu par le générateur PV n'est pas transformé entièrement en électricité. Les pertes d'énergie dans le système s'observent à trois niveaux :

- Au niveau de la capacité du générateur PV à transformer le rayonnement solaire en électricité. Les panneaux solaires installés ne traduisent pas tout le rayonnement solaire qu'ils reçoivent en électricité. Cette conversion dépend du type de matériau utilisé pour les cellules, de l'inclinaison et de la surface efficace du panneau ( $A_{eff}$ ). On peut donc évaluer un premier rendement noté  $\eta_{pv}$  par :

$$\eta_{PV} = \frac{P_{max}}{G \cdot A_{eff}}$$

Où G représente l'irradiation solaire au-dessus du panneau.

- La deuxième perte d'énergie dans le système de conversion est liée à la capacité du système à exploiter la puissance maximale disponible aux bornes du panneau solaire. Elle est notée  $\eta_{MPPT}$ . Ces pertes sont dues aux installations (onduleur, convertisseur DC-DC

et connexion directe). Il correspond au rapport de la puissance disponible à la puissance maximale que peut délivrer le panneau.

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{PV}}{P_{max}}$$

- Le troisième niveau de perte d'énergie correspond à la conversion électrique-électrique. La charge peut nécessiter un courant alternatif, alors il faut convertir le courant continu des panneaux en courant alternatif. Cette conversion s'accompagne d'une perte d'énergie. Dans ce cas, le rendement évalué noté  $\eta_{conv}$  est donné par :

$$\eta_{conv} = \frac{P_{out}}{P_{PV}}$$

Le rendement global sur toute la chaîne de conversion PV ( $\eta_{total}$ ) correspond donc au produit des trois rendements définis ci-dessus.

$$\eta_{total} = \frac{P_{max}}{G \cdot A_{eff}} \times \frac{P_{PV}}{P_{max}} \times \frac{P_{out}}{P_{PV}}$$

La figure 7 illustre la chaîne de conversion PV.

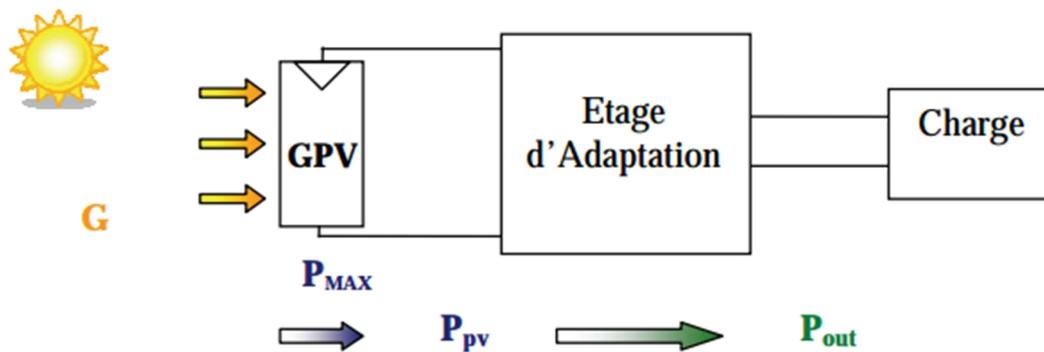


Figure 7 : Chaîne de conversion photovoltaïque [24]

### 1.2.3.2. Paramètres externes affectants le rendement photovoltaïque

Certaines configurations peuvent dégrader le rendement d'une cellule photovoltaïque :

- la perte d'énergie au sein du semi-conducteur, notamment à travers les résistances série et shunt par effet Joule ;
- la perte de photons incidents, notamment lorsqu'il y a réflexion sur la surface de la cellule ou lorsque les photons incidents la traversent sans être absorbés ;

- les pertes dues à des défauts des composants présents au sein du dispositif photovoltaïque qui peuvent consommer une partie du courant généré. D'autres situations conduisent aux mêmes effets :
- les pertes dues à l'ombrage ou à l'occultation partielle des cellules ;
- la présence de poussières ou de gouttes d'eau sur la surface de la cellule ;
- la variation de la température. En effet, quand un semi-conducteur est pris en dehors de son équilibre thermique, par exemple sous illumination et/ou par injection de courant, les concentrations en électrons et en trous tendent à revenir vers leur position d'équilibre thermique par un phénomène de relaxation. On peut prévoir une variation qualitative du rendement dans ces situations :
- le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement. La puissance électrique délivrée par la cellule photovoltaïque est donc également fonction linéaire de l'éclairement,
- l'augmentation de la température pour un éclairement constant provoque une diminution des valeurs de la tension de circuit ouvert tandis que le courant de court-circuit augmente lui légèrement. La puissance a quant à elle diminué lors de l'augmentation de la température
- la présence d'une couche d'eau améliore les propriétés optiques de la surface des cellules photovoltaïques car elle augmente l'intensité de la lumière incidente qui atteint la surface des cellules. La couche d'eau contribue également à absorber la chaleur générée par les cellules d'où une amélioration de la puissance maximale, et donc du rendement,
- le courant de court-circuit dépend du diamètre des particules et de la densité du dépôt. En effet, plus le diamètre des particules est faible et plus le courant de court-circuit diminue vite, et plus la densité du dépôt est importante et plus le courant de court-circuit diminue. La présence de particules provoque également une diminution, mais moins sensible, de la tension de circuit ouvert. Le dépôt de poussière a donc pour effet la diminution du rendement. Celle-ci est d'autant plus marquée que le diamètre des particules est faible et que la densité du dépôt est grande.

Un autre facteur, inévitable, est le vieillissement des cellules photovoltaïques qui se traduit par la diminution progressive du courant de court-circuit et, dans une moindre mesure, de la tension de circuit ouvert. Le vieillissement provoque donc une diminution du rendement électrique de la cellule photovoltaïque.

#### 1.2.4. Systèmes Photovoltaïques non raccordés au réseau

Les systèmes photovoltaïques non raccordés au réseau permettent d'apporter une solution au problème de fourniture en énergie pour les sites éloignés du réseau électrique. Deux configurations majeures peuvent être mises en place à cet effet : les systèmes autonomes fonctionnant sans autre source d'énergie que le photovoltaïque et les systèmes hybrides faisant appel à une ou plusieurs sources d'énergie complémentaires d'origine renouvelables ou non. Chaque configuration dépendra des ressources énergétiques disponibles dans la zone d'installation et des priorités économiques du concepteur.

##### 1.2.4.1. Systèmes photovoltaïques autonomes

Le système photovoltaïque autonome peut se faire avec ou sans stockage.

###### 1.2.4.1.1 Système photovoltaïque autonome sans stockage

Dans ce cas, le générateur photovoltaïque est directement utilisé ou alors est utilisé à travers un convertisseur CC/CC ou CC/AC selon les besoins d'utilisation. Les principales utilisations d'un tel système sont : le pompage, la ventilation, la production du froid et autres. Les avantages d'un tel système résident sur le moindre coût d'installation et sa maintenance. Mais son inconvénient majeur est le non continuité en fourniture de l'énergie, due à l'intermittence de la source solaire, ce qui rend le système totalement inutilisable la nuit. Il est donc clair qu'un tel système n'est pas efficace pour les services délicats comme les hôpitaux.

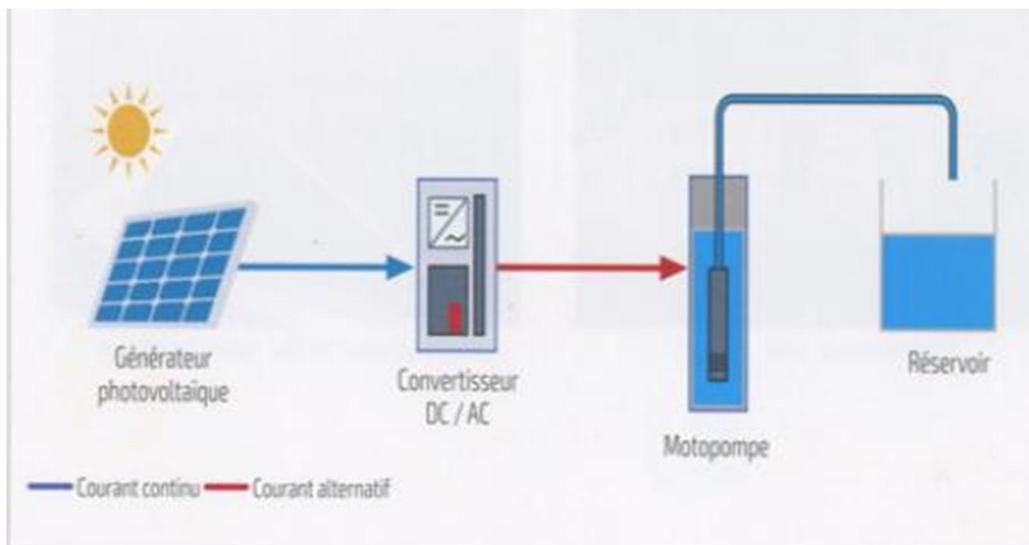


Figure 8 : Schéma de principe d'un système PV autonome sans stockage : exemple de pompage solaire [27]

### 1.2.4.1.2 Système photovoltaïque autonome avec stockage

Ce système est mis en place lorsque la charge veut être alimentée continuellement. Il fonctionne de la manière suivante : pendant la journée où l'irradiation solaire est favorable, le générateur photovoltaïque alimente la charge et l'excès de production est stocké via les accumulateurs. Il peut s'agir des batteries, des piles à combustibles ou toutes autres formes de stockage. Un contrôleur de charge installé entre le PV et les accumulateurs permettent d'éviter leur surcharge en cas de surproduction. Pendant le déficit énergétique dû au mauvais temps où pendant la nuit, les accumulateurs restituent l'énergie stockée. Un onduleur placé avant la charge permet de convertir le courant continu du PV en courant alternatif. La figure 9 illustre ce principe de fonctionnement.

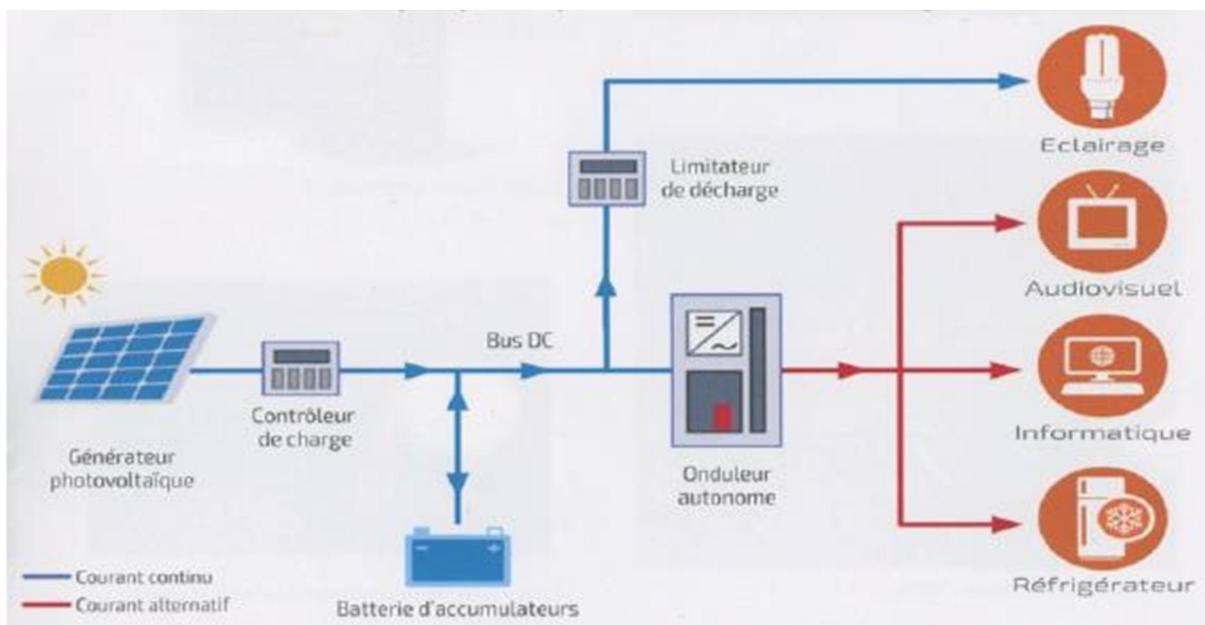


Figure 9 : Schéma de principe d'un système PV autonome avec stockage [27]

### 1.2.4.2. Systèmes photovoltaïques autonomes hybrides

Il s'agit d'un système qui regroupe des sources d'énergie de nature différentes telles qu'une installation éolienne, un générateur diesel ou une centrale de cogénération en plus du générateur photovoltaïque. Ce type d'installation est utilisé lorsque le générateur photovoltaïque seul ne couvre pas toute l'énergie requise.

On peut considérer deux architectures électriques de systèmes hybrides selon la présence ou non de stockage :

- des systèmes photovoltaïques avec accumulateurs couplés avec une source d'énergie renouvelable (éolien, micro hydraulique...) et/ou un groupe électrogène,
- des systèmes photovoltaïques sans accumulateurs couplés avec des groupes électrogènes.

Dans les systèmes hybrides photovoltaïques, le groupe électrogène reste l'un des moyens le plus associé au PV. La principale raison est que l'utilisation du groupe électrogène ne dépend pas des ressources énergétiques d'un site à un autre. Dans un tel système, chaque source d'énergie présente ses avantages à être associée à l'autre pour une fourniture optimale en énergie électrique. Ainsi :

- ✓ Le système photovoltaïque réduit la consommation, le temps de fonctionnement et donc de la maintenance du groupe,
- ✓ Présence du stockage par batteries réduit la puissance nominale du groupe,
- ✓ La présence du groupe réduit la taille du champ photovoltaïque et la capacité de stockage des batteries diminuant ainsi le coût du système,
- ✓ La fiabilité du système global est augmentée,
- ✓ Les puissances et les énergies mises en jeu sont plus importantes et la charge à alimenter plus élevée.

Le système hybride PV/Diésel présente plusieurs configurations. On distingue :

- Système hybride PV - Diésel série
- Système hybride PV - Diésel commuté
- Système hybride PV - Diésel parallèle.

Chaque configuration présente des avantages et inconvénients.

#### **1.2.4.2.1. Systèmes photovoltaïques hybrides PV/Diésel avec stockage**

- **Système hybride PV - Diésel série**

Le Système photovoltaïque hybride avec stockage est beaucoup plus utilisé dans les grands centres hospitaliers isolés. Dans cette configuration, l'énergie produite par le générateur diésel est

d'abord redressée, puis convertie de nouveau en alternatif pour être fournie à la charge. Cette opération implique de grandes pertes. Le premier cas de figure est lorsque l'énergie produite par le champ photovoltaïque et l'énergie stockée sont suffisantes pour répondre à la demande de la charge. Dans ce cas, le groupe est débranché. La puissance en courant continu fournie par le champ et la batterie est convertie en courant alternatif par un onduleur. Le deuxième cas de figure est lorsque le stockage de l'énergie est vidé et que même le PV ne peut pas répondre directement aux besoins de la charge, soit par valeurs faibles de l'irradiation solaire ou alors dans la nuit. Dans ce cas, le groupe électrogène est mis en marche. Il faut noter que dans la plupart des systèmes de ce type, le rendement du système est diminué à cause du transit d'une grande partie de l'énergie par la batterie, augmentant ainsi le nombre des cycles charge – décharge (Fig 10).

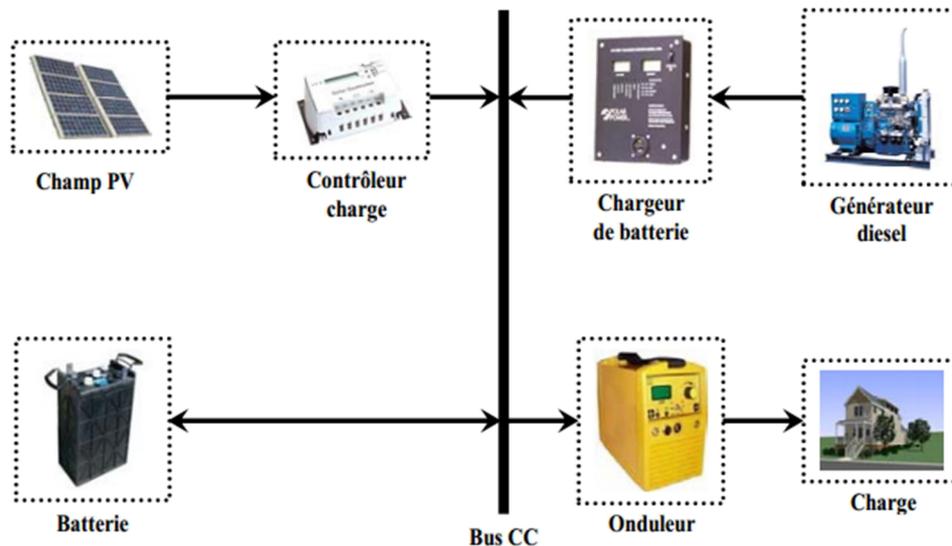


Figure 10 : Schéma de principe d'un système hybride PV/Diesel série avec stockage [28]

Le contrôleur de charge permet de prévenir la surcharge et la décharge complète de la batterie. Généralement on utilise un convertisseur CC/CC (MPPT) qui permettra au champ PV de fonctionner à son point maximum de puissance. Pour moderniser le système en la faisant fonctionner automatiquement, on peut ajouter un système de mise en marche et arrêt du générateur diesel.

#### Les avantages d'un tel système sont les suivants [28]

- La puissance du générateur électrique est optimale vis-à-vis) de la charge.

- La mise en marche du générateur diesel ne provoque pas d'interruption de l'alimentation de la charge.
- Grâce à l'onduleur, on peut obtenir différentes formes du courant selon les besoins (sinusoïdal, carré,...).

### Les limites d'un tel système sont les suivantes [28]

- L'onduleur ne peut pas travailler en parallèle avec le générateur diesel, c'est pourquoi il doit être dimensionné pour satisfaire la puissance de pointe de la charge.
- Le nombre des cycles charge – décharge de la batterie diminue son cycle de vie.
- Le rendement total du système est faible à cause des pertes de conversion dues au fait que le générateur diesel ne peut pas fournir son énergie directement à la charge.
- Une fois l'onduleur est défectueux, l'alimentation s'arrête complètement.

### ➤ Système hybride PV - Diesel commuté

Dans cette configuration fréquemment utilisée malgré ses limites opérationnelles [28], le générateur photovoltaïque, à travers les batteries ou l'onduleur peuvent alimenter la charge au même titre que le générateur diesel. La batterie déchargée peut être rechargée par le diesel et par le photovoltaïque. Cette configuration présente un avantage par rapport à la configuration série parce que les pertes énergétiques sont limitées due à la limitation de la convention de l'énergie du générateur. En principe, la puissance produite par le générateur est supérieure à la demande de la charge et l'excès est utilisé pour la charge de la batterie. Comme dans le cas précédent, le diesel est arrêté, lorsque la demande est faible et peut être satisfaite par le champ photovoltaïque et la batterie. La complexité du système implique l'utilisation d'un contrôle automatique à la place de la commande manuelle (Fig 11)

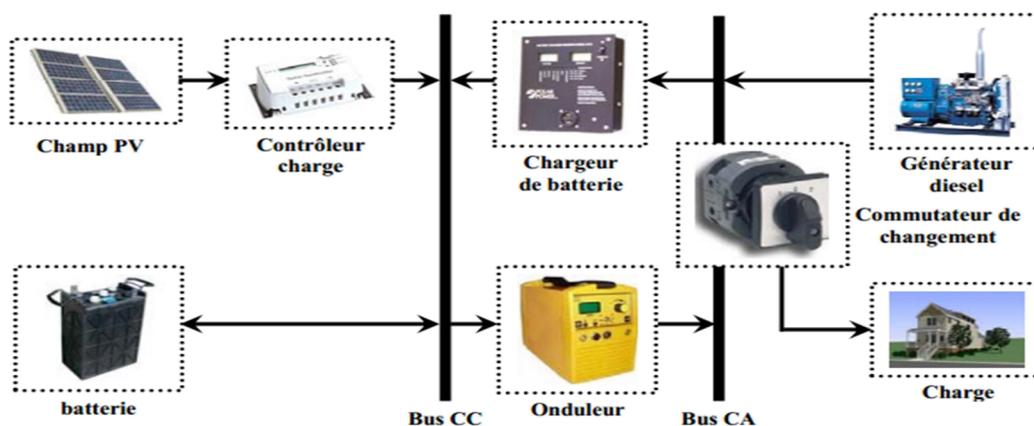


Figure 11 Schéma de principe d'un système hybride PV/Diesel commuté avec stockage [28]

**Les avantages de cette configuration sont [28]**

- Cette configuration peut fournir toute forme de courant à la charge, selon les besoins (sinusoïdal, signal carré).
- Le générateur peut fournir l'énergie produite directement à la charge, ce qui augmente le rendement du système et diminue la consommation de carburant.

**Les limites de cette configuration sont les suivantes [28]**

- lors de la commutation des sources alternatives, Il y a une coupure instantanée.
- Le générateur et l'onduleur sont dimensionnés pour la puissance pointe de la charge, ce qui réduit leurs rendements en fonctionnement à faible charge.

**➤ Système hybride PV - Diésel parallèle**

Dans la configuration parallèle, la charge peut être alimentée au même moment et séparément par toutes les sources. L'onduleur utilisé ici est bidirectionnel et fonctionne soit comme un redresseur (lorsque le diésel produit un excès d'énergie qui charge les batteries), soit comme un onduleur, pour transférer l'énergie fournie par le champ photovoltaïque ou par la batterie vers la charge. L'onduleur bidirectionnel confère à cette configuration la possibilité d'alimenter une charge dont la puissance est supérieure à la puissance nominale du générateur (figure 12).

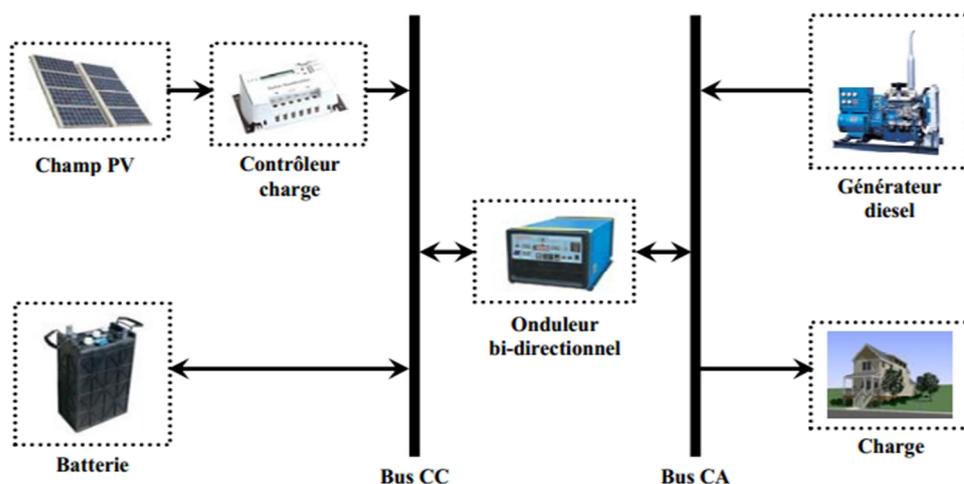


Figure 12: Schéma de principe d'un système hybride PV/Diésel parallèle avec stockage [28]

Par rapport aux configurations série et commutée, ce système présente deux améliorations à savoir :

- Tout d'abord, en associant l'onduleur et le générateur diesel, on obtient une charge supérieure alimentée par chaque élément seul. Ceci confère à cette configuration une capacité plus large. Le système devient plus flexible en combinant diesel et onduleur, ce qui permet de choisir un diesel de faible puissance nominale en diminuant les coûts. Le rendement du système devient élevé.
- Par ailleurs, le nombre d'éléments dans le système est diminué par le fait qu'un seul convertisseur est utilisé comme onduleur et redresseur. Tous les composants sont intégrés dans une seule unité, ce qui permet une réduction du câblage de l'installation et donc des coûts. Mais Il est clair qu'il devient difficile d'augmenter la taille du système par l'ajout de nouveaux composants si la demande en électricité augmente.

#### **Avantages [28]**

- L'alimentation de la charge peut être faite d'une manière optimale.
- Le rendement du générateur diesel peut être augmenté.
- Le besoin d'une maintenance du diesel est réduit.
- Les puissances nominales des différents éléments peuvent être diminuées par rapport aux puissances nominales dans les autres configurations, en alimentant toujours la même charge.

#### **Limites [28]**

- Le contrôle automatique est indispensable pour le fonctionnement du système.
- L'onduleur doit fournir un courant sinusoïdal pour que la synchronisation avec le générateur diesel soit possible.
- Le fonctionnement du système n'est pas évident pour une personne non formée.

#### **1.2.4.2.2. Systèmes photovoltaïques hybrides sans stockage**

Dans cette configuration, l'énergie solaire et le diesel alimentent directement la charge sans stockage de l'énergie. Les fluctuations du rayonnement solaire font que le générateur solaire soit quelques fois défaillant même pendant la journée. Pendant ces moments, c'est le diesel qui fournit automatiquement de l'énergie à la charge via une commande. Et dans la nuit, la charge est totalement alimentée par le diesel.

Le principal avantage de ce système est qu'il est moins coûteux à l'installation. Par contre, le fait de solliciter régulièrement la commande PV/diesel peut la rendre défectueuse, et donc

augmenter son coût d'entretien. Par ailleurs, en cas de déficit du générateur solaire et la rupture de l'approvisionnement en carburant pour le groupe, la charge n'est plus alimentée.

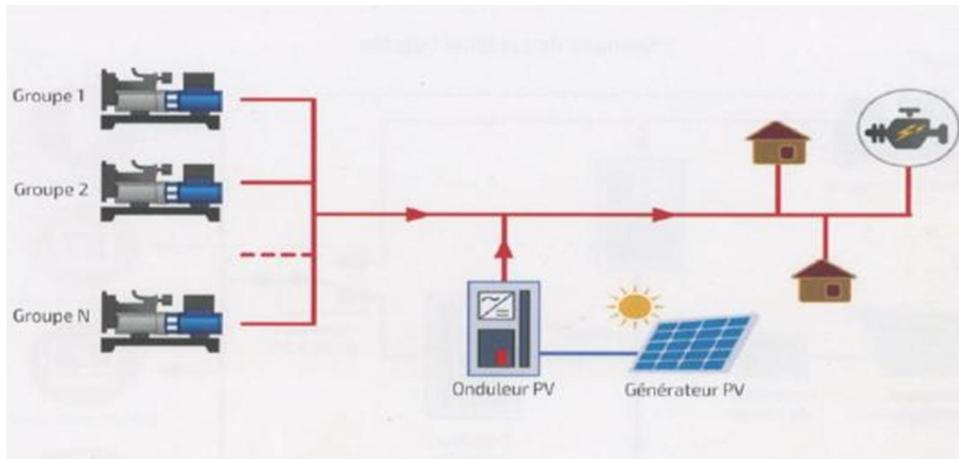


Figure 13 : Schéma de principe d'un système hybride PV/Diésel sans stockage [27]

### 1.3. Production et fourniture d'oxygène médical

L'oxygène médical peut être produit par plusieurs mécanismes. La production d'oxygène médical peut avoir lieu directement sur site ou alors en industrie et acheminée avec la chaîne logistique d'approvisionnement exigeant le transport d'oxygène vers les centres hospitaliers.

Plusieurs méthodes de production d'oxygène médical existent. Les deux méthodes les plus utilisées pour cette production d'oxygène médical sont : la distillation cryogénique et l'absorption modulée en pression (PSA). D'autres méthodes existent telles que la séparation des gaz par membrane et la génération d'oxygène à partir des matières premières chimiques. Mais ne sont pas largement utilisées [29].

L'oxygène médical produit peut être fourni aux centres hospitaliers par trois méthodes en fonction du type de centre hospitalier. On peut citer :

- Les cylindres rechargeables

Ce sont des bouteilles remplies d'oxygène liquide en industrie PSA et livrées aux centres hospitaliers. Cette technique de fourniture en oxygène médical est la plus répandue en Afrique subsaharienne [29]. L'inconvénient avec cette technique est que les bouteilles

doivent être régulièrement nettoyées et inspectées, et leur déploiement sur les sites de traitement reste difficile sur le plan logistique.

- Le système de canalisation

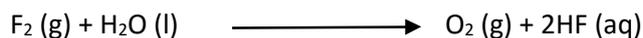
C'est un système mécanique qui permet de prendre l'oxygène des points de stockage des usines de productions installées sur le site, vers le chevet du lit du malade à travers une tuyauterie. L'inconvénient avec cette technique est que son installation coûte chère et donc difficile à acquérir par les hôpitaux des pays sous-développés. Ce système est beaucoup utilisé dans les hôpitaux tertiaires qui ont beaucoup de lits à oxygéner.

- Les concentrateurs d'oxygène

Les concentrateurs d'oxygène sont basés sur le principe PSA mais à petite échelle. Les concentrateurs d'oxygène sont destinés à un petit nombre d'oxygène. Il sépare l'oxygène de l'air ambiant et le fournit aux patients. A la différence du système de canalisation, les concentrateurs d'oxygène peuvent être utilisés mêmes dans les hôpitaux primaires et même dans les domiciles. Mais ce procédé nécessite une fiabilité d'alimentation électrique et un besoin régulier d'entretien, sans lesquels les concentrateurs d'oxygène peuvent cesser de fonctionner après un temps.

### 1.3.1. Décomposition chimique

Cette technique consiste à produire de l'oxygène par réaction chimique entre les composés. L'oxygène existe en majorité dans certains composés comme le chlorate, le perchlorate de sodium, le superoxyde de potassium. Ces composés sont comprimés à l'état solide dans les chandelles métalliques introduits dans un générateur. Un exemple est la réaction entre le fluor et l'eau suivant l'équation :



Produit élaboré à partir de chlorate de sodium. L'oxygène obtenu dans ce processus est gazeux. Il s'obtient après amorçage mécanique. L'oxygène obtenu par ce processus a une pureté supérieure à 99% [30]. Et le reste de produit est principalement de la vapeur d'eau, du monoxyde et dioxyde de carbone et des traces de chlore.

En dehors de la pureté de l'oxygène obtenu, cette technique présente d'autres avantages :

- La température de conservation des chandelles est sur un large intervalle (entre -20 et +50°C) [30]. Ce qui permet d'utiliser cette technique sous plusieurs types de climats
- Les chandelles ne nécessitent aucune opération de maintenance. Même si elles sont stockées pendant des dizaines d'années, elles produiront la même quantité d'oxygène [30].
- Les chandelles ne présentent pas de danger de réservoir d'oxygène sous pression et ne peuvent pas avoir des fuites comme dans le cas des bouteilles d'oxygène.
- Cette technique fournit d'une manière régulière la même quantité d'oxygène et les chandelles chimiques sont plus légères que les bouteilles d'oxygène.

Cette technique de production d'oxygène médicale présente tout de même quelques inconvénients à savoir :

- Le coût très élevé du mètre cube d'oxygène produit. Une chandelle au chlorate de sodium de 300 L d'oxygène coûte environ 1000 euros [30].
- Ce système nécessite toujours un moyen de transport pour acheminer des chandelles sur le terrain.

### 1.3.2. Système à membrane céramique

Le système à membrane céramique pour la production d'oxygène médical fait partie des derniers-nés des récentes technologies issues des laboratoires américains [30]. La technique consiste en la séparation sélective de l'oxygène par électro diffusion ou SEOS (Solid Electrolyte Oxygen separation). La majorité des dispositifs utilisent des fibres polymères creuses [29].



Figure 14 : Des milliers de fibres à membrane creuses  
[http://www.storagecontrol.com/documents/permea\\_scs\\_broch.pdf](http://www.storagecontrol.com/documents/permea_scs_broch.pdf)

Les polymères membranaires agissent sur le principe de la diffusion du gaz à travers le polymère. Pendant qu'une pression plus faible est maintenue à l'extérieur des fibres pour créer un gradient de

pression partielle à travers les parois des fibres. La pression du gaz est acheminée dans les alésages des polymères. De ce fait, certains gaz pénètrent à travers la paroi de la membrane plus rapidement que d'autres. Les gaz qui pénètrent lentement s'accumulent dans le flux à haute pression. Cette technique présente l'avantage d'être moins coûteuse et l'oxygène obtenue à une pureté de plus de 99.99 %, favorable pour les applications médicales [30]. Mais des inconvénients importants sont à noter :

- La céramique doit être chauffée à très grande température. Ce qui nécessite une forte consommation de l'énergie électrique.
- A cause de la taille faible des céramiques, le débit de production d'oxygène reste faible.
- La rentabilité économique de cette technique n'a pas encore été établie pour son adoption à grande échelle.

### 1.3.3. Les concentrateurs d'oxygène

Les concentrateurs d'oxygène permettent de séparer l'oxygène des autres gaz contenus dans l'air. Une série de filtre est située à l'entrée du concentrateur ; ces filtres absorbent l'air ambiant dans la machine. Cet air est par la suite comprimé et passe dans une colonne contenant de la zéolite (un tamis moléculaire). L'Azote se lie à la zéolite tandis que l'oxygène passe à travers. Le flux d'Azote est basculé sur une seconde colonne. Par la suite, la première colonne est ventilée par l'atmosphère, ce qui permet une décharge d'une grande partie de l'Azote absorbé, pendant qu'une infime partie d'oxygène est éliminée par le dos de la deuxième colonne. Cet oxygène passe dans une chambre de réservoir au moyen d'un système de contrôle de débit d'oxygène qui est délivré par la suite au patient. La figure 15 présente le schéma simplifié d'un concentrateur d'oxygène.

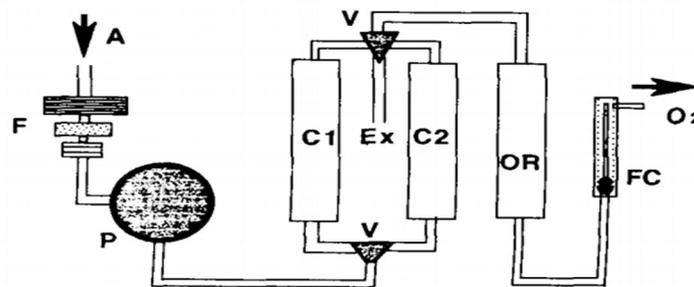


Figure 15 : Schéma simplifié du concentrateur d'oxygène [24]

A, prise d'air; F, filtres d'entrée; Compresseur; C1 et C2, colonnes de zéolithe; V, vannes de régulation; FC, dispositif de contrôle de flux; OR, réservoir d'oxygène;



Figure 16. Compresseur d'air et concentrateur d'oxygène à l'intérieur du module [31]

La plus grande application des concentrateurs d'oxygène en médecine a été dans la fourniture sur site à long terme de l'oxygénothérapie aux patients souffrants de troubles respiratoires chroniques [32]. Depuis plus de 10 ans, les pays industrialisés utilisent d'une manière régulière des concentrateurs d'oxygène, ce qui prouve leur fiabilité [32-33]. Ce système de production d'oxygène présente un fort avantage sur son coût faible. Le prix d'achat d'un concentrateur d'oxygène est environ la moitié du coût d'un an d'approvisionnement en oxygène à partir des bouteilles [34].

Quelques inconvénients sont à noter quant à cette technologie :

- Elle nécessite une forte consommation électrique
- Son poids et son volume sont négligeables
- Son utilisation nécessite une adaptation d'un climat à un autre
- Cette technique demande une maintenance constante

#### 1.3.4. L'adsorption à variation de pression (Pressure Swing Adsorption) (PSA)

Le système PSA est une méthode qui permet d'obtenir l'oxygène par séparation de gaz de l'air. Ce système a été utilisé pour la première fois en 1970 [29]. La PSA utilise un matériau absorbant,

généralement à tamis moléculaire (voir figure 17) ou du gel de silice en raison de leur sélectivité des composants. La zéolite absorbe l'oxygène et l'Azote à différents taux au fur et à mesure que la pression change. Plus la pression augmente, plus l'azote est absorbé sur la zéolite, produisant ainsi un gaz riche en oxygène à partir du lit d'absorption. Lorsque la surface de la zéolite est saturée en Azote, la pression est réduite et l'Azote est désorbé puis libéré par pression atmosphérique. Les systèmes PSA ont généralement deux lits d'absorption, qui alternent entre absorber l'Azote de l'air tout en permettant à l'oxygène de circuler. La figure 18 montre l'architecture et une installation du système PSA.

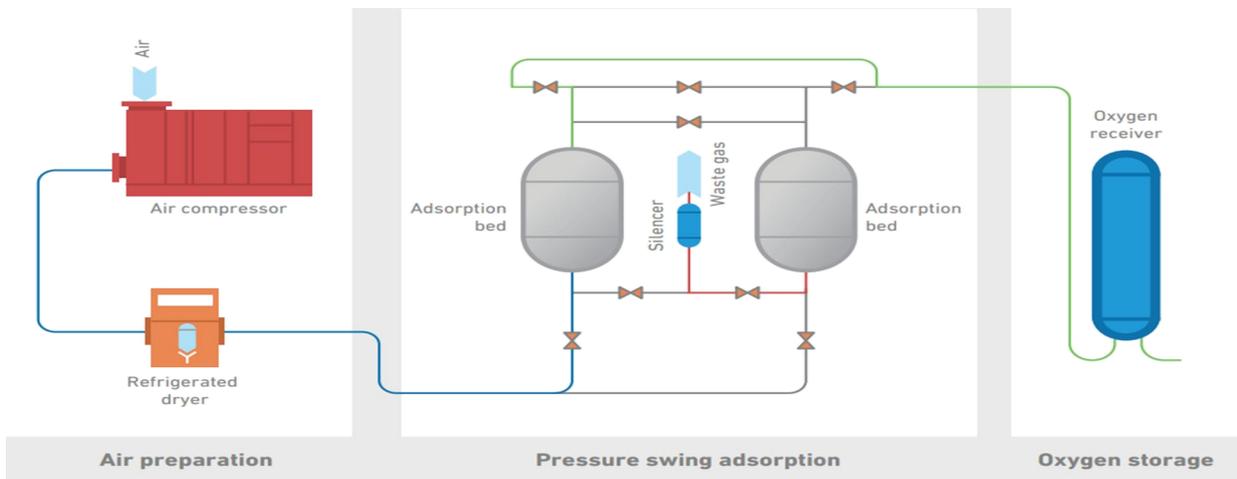


Figure 18 : Installation d'oxygène par adsorption modulée en pression [29].

L'utilisation de l'air comme flux d'alimentation du système PSA confère l'avantage qu'on achète plus constamment les matières premières pour son alimentation. Le processus de PSA est fiable car il produit l'oxygène de 90 à 95 % de pureté [29], ce qui est bien au-dessus des exigences médicales. Le coût typique d'une installation PSA est de 150.000 \$ à 250.000 \$ pour une usine qui produit 150.000 m<sup>3</sup> à 500.000 m<sup>3</sup> d'oxygène avec une durée de vie de dix ans [29]. Le système PSA peut être installé sur site tout comme l'oxygène produit peut être chargé dans des cylindres puis livré dans les hôpitaux. Le système PSA pour la production d'oxygène fut utilisé pour la première fois en 1970. [29].

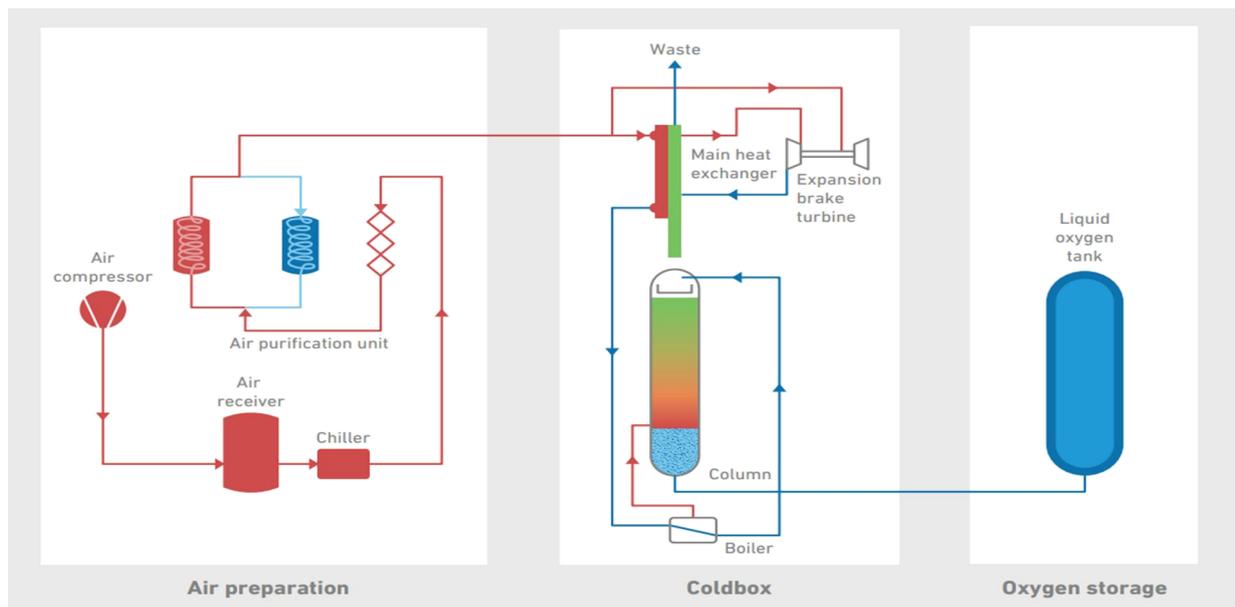
L'oxygène médical provenant du système PSA peut être fourni aux patients dans les hôpitaux à travers deux mécanismes comme le montre la figure 19.



Figure 19 : Mécanismes de fourniture d'oxygène médical produits via PSA [29]

### 1.3.5. Distillation cryogénique (Cryogenic Distillation)

La technique de production d'oxygène par distillation cryogénique utilise les mêmes principes que la distillation simple, sauf que dans ce cas, la température dite température cryogénique est inférieure à  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A cette température, l'air se liquéfie, l'Azote et l'Argon se vaporisent avant l'oxygène. L'air est purifié avant le refroidissement pour éliminer les vapeurs d'eau. Cette technique produit l'oxygène liquide ultra-pur (environ 99.5%) [30]. Mais ces installations sont à forte intensité de capital, le coût pouvant atteindre des dizaines de millions de dollars [29]. Cette technique fut développée la première fois par Carl von Lind en Allemagne dans les années 1900 [29]. Technique développée à l'échelle mondiale, c'est une des techniques de production d'oxygène médicale sur site la plus utilisée [29]. La figure 20 présente l'organigramme d'une usine de distillation cryogénique.



**Figure 20** : Usine cryogénique de production d'oxygène liquide [29]

Pour atteindre les températures extrêmes nécessaires pour séparer l'oxygène liquide de l'azote, l'air doit être refroidi. La réfrigération est un processus important pour abaisser les températures. Le cycle le plus associé à la réfrigération est le cycle de Brayton. Ce cycle utilise un compresseur, un condenseur, un évaporateur, une vanne Joule-Thomson et un réfrigérant. Le fluide frigorigène est choisi en fonction de la température fraîche souhaitée. Le fluide frigorigène est comprimé, augmentant la température. Cette chaleur est ensuite dissipée par le condenseur agissant comme un échangeur de chaleur, avant qu'il ne soit détendu à travers une vanne Joule-Thomson.

L'effet Joule-Thomson trouve son utilisation dans la distillation cryogénique en refroidissant un gaz à haute pression déjà refroidi par liquéfaction partielle du gaz. Une caractéristique importante de la distillation cryogénique est le manque de ressources pour la condensation du distillat sortant du sommet de la tour. Les flux suffisamment froids pour condenser l'air ne sont pas facilement disponibles. Cela limite la variabilité de la tour.

Plusieurs processus de distillation cryogénique existent et le développement des différentes technologies aide à améliorer le processus sur le plan de l'apport énergétique et de la qualité de l'oxygène produit.

### 1.3.5.1 Processus Linde

L'une des méthodes la plus simple pour séparer l'oxygène de l'air par distillation cryogénique est le processus Linde. Ce processus comprend : un compresseur, de la chaleur échangeur, une vanne Joule-Thomson (J-T) et un collecteur qui se comporte comme un réservoir flash. L'échangeur de chaleur comprime d'abord l'air puis la refroidit. Le flux est ensuite refroidi par dilatation à travers la vanne Joule-Thomson. Après expansion, le gaz se liquéfie partiellement et Le liquide riche en oxygène est recueilli dans le réservoir flash. La figure 21 ci-dessous est une conception pour un procédé Linde de réfrigération au gaz. Le flux traverse le compresseur, ce qui correspond aux points 1 à 2 du diagramme d'entropie de température (voir figure 22). Ce flux est ensuite refroidi par un échangeur de chaleur à travers la tuyauterie ce qui correspond aux points 2 à 3. Le gaz est par la suite dilaté, ce qui abaisse la température, correspondant aux points 3 à 4. La diminution de la température accomplit la liquéfaction du ruisseau.

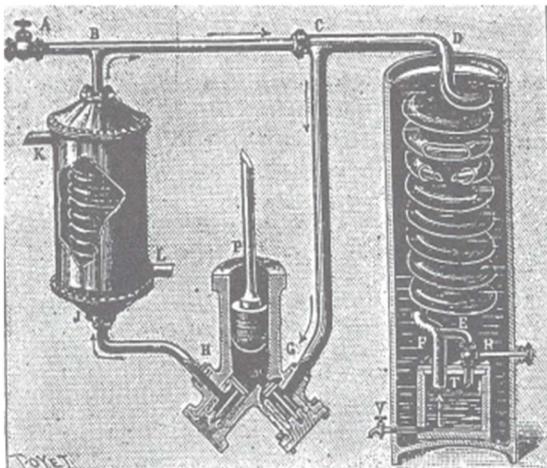


Figure 21: Processus de liquéfaction Linde [30]

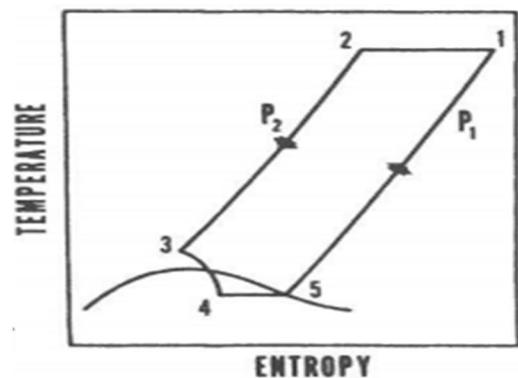


Figure 22 Diagramme température-entropie pour le procédé Linde [30]

Jusqu'à cette étape, l'oxygène obtenu n'a pas encore atteint sa pureté optimale. Pour augmenter sa pureté à 99,2 %, une colonne de distillation est ajoutée après le détendeur. L'alimentation de la vanne est utilisée pour fournir de la chaleur au rebouilleur car elle est plus élevée en température que le fluide après le détendeur [30].

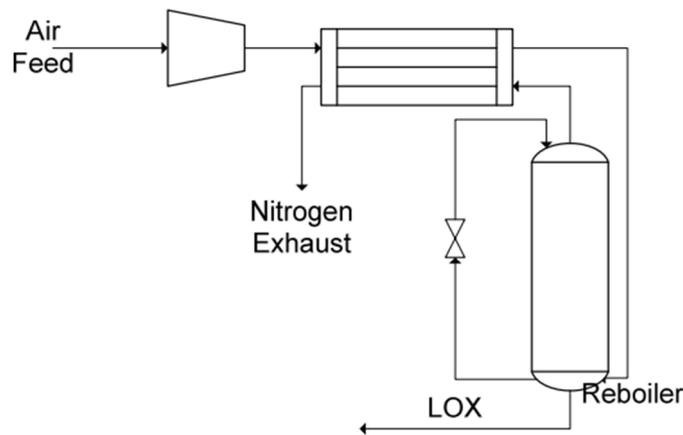


Figure 23 : Une Colonne Linde [30]

### 1.3.5.2. Processus Claude

Le procédé Claude est l'un des plus simples des procédés cryogéniques. La valeur ajoutée de ce procédé est qu'il incorpore un cycle de réfrigération qui manque dans le procédé Linde. Le refroidissement supplémentaire du cycle de réfrigération aide à refroidir davantage l'air comprimé, augmentant ainsi l'efficacité du processus. Son diagramme d'entropie est similaire à celui du processus Linde tel que représenté à la figure 24. Le moteur d'expansion ajouté à ce procédé permet d'utiliser plus efficacement l'énergie. Ce qui fait une différence supplémentaire avec le procédé Linde. Cette amélioration est une composante commune dans l'industrie. L'utilisation du moteur d'expansion peut réellement aider dans le compresseur, ainsi que permettre un meilleur contrôle du gaz lorsqu'il se dilate et entre dans la colonne de distillation. Un exemple d'écoulement du procédé Claude intégrant une tour de distillation est illustré à la figure 25 ci-dessous. Le trajet des points 1 à 2 dans le diagramme d'entropie – température correspond au moment où le flux d'alimentation traverse le compresseur. Ce flux est comprimé puis refroidi à travers trois échangeurs de chaleur séquentielle : ce qui correspond aux points 2 à 5. À ce stade, le gaz est dilaté à la liquéfaction et distillé. Le moteur d'expansion est utilisé en dilatant le flux de gaz d'alimentation et en le refroidissant en plus.

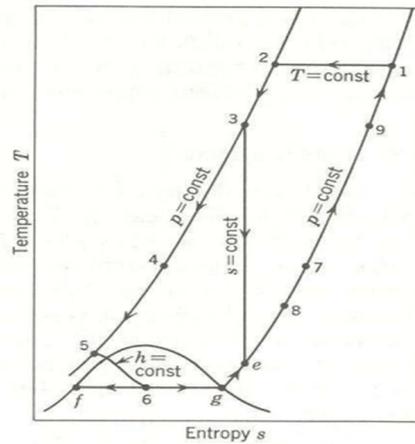


Figure 24 : Diagramme température-entropie pour le procédé Claude [30]

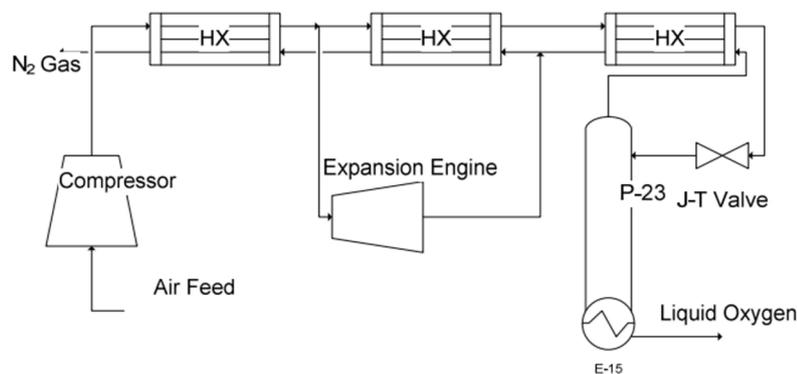


Figure 25 : Processus de liquéfaction Claude [30]

Jusqu'ici, Distillation cryogénique et Adsorption modulée en pression constituent les moyens les plus utilisés pour la production d'oxygène médical en industrie mais sa production sur site nécessite un apport important d'énergie pour une quantité modérée de production d'oxygène médical sur site [30]. Pourtant ces méthodes produisent l'oxygène de bonne qualité pour les applications médicales. Ce qui rend leur applicabilité difficile dans les pays pauvres. De ce fait, le développement de ces techniques à l'instar de la distillation cryogénique, permettant d'apporter quelques améliorations espérant minimiser leur coût d'installation. On peut citer :

- La conception cryogénique avec alimentation d'air
- La conception cryogénique avec absorption de  $N_2$  sous pression modulée.

Cette deuxième conception présentée sous deux sous-ensembles :

- La conception avec un moteur d'expansion
- La conception avec agrandissement Joule-Thomson

### 1.3.5.3. La conception cryogénique avec alimentation d'air

La conception cryogénique avec alimentation d'air diffère du processus Linde par la tour de distillation qui remplace la tour flash. Puisqu'il s'agit essentiellement du même processus. Cette modification est assortie d'une concentration d'oxygène plus élevée et le distillat a un débit plus élevé. L'air provenant de l'atmosphère, est purifié pour éliminer le dioxyde de carbone et traces d'impuretés. Cet air purifié s'écoule ensuite dans un compresseur où elle est comprimée à une pression de 3000 psi. Ce flux est refroidi à température ambiante en utilisant de l'eau comme fluide du côté froid. Le flux échange ensuite de la chaleur avec le gaz vaporisé et refroidi sortant du haut de la Tour de distillation. Afin de refroidir davantage le flux, il est utilisé pour chauffer le rebouilleur dans le fond de la tour de distillation. Enfin, le flux de gaz est étendu à la pression atmosphérique à travers un J-T valve où il refroidit et se liquéfie partiellement. Ce ruisseau mixte se jette dans une tour de distillation à pression atmosphérique, où l'oxygène médical est le produit de fond. Le diagramme ci-dessous illustre le processus de distillation cryogénique avec alimentation d'air.

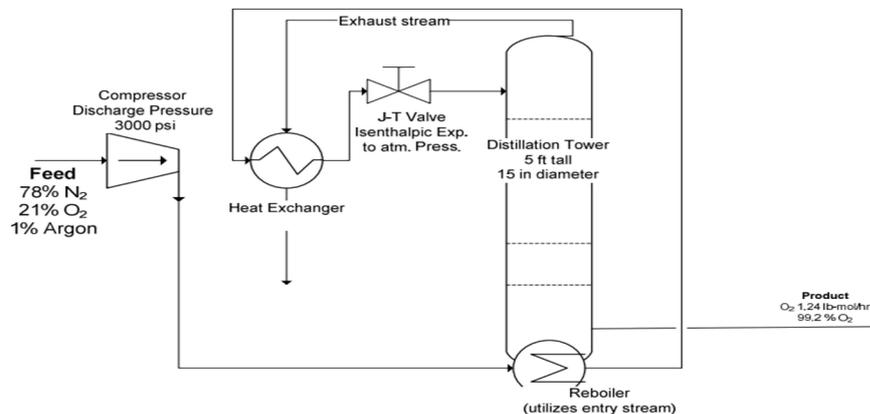


Figure 26 : Processus pour la conception cryogénique avec alimentation d'air [30]

Dejuan Frank et al ont utilisé le logiciel de simulation Science Pro II pour évaluer le rendement de ce processus. Il ressort que pour chaque mole d'oxygène produit dans ce flux, 210 moles d'aliments d'air sont nécessaires dans le flux d'alimentation. Afin d'atteindre le débit nécessaire pour un hôpital (3 000 gal liq. O<sub>2</sub>/mois ~ 1,24 lb-mol/h), le débit d'alimentation de ce système a été déterminé à 265 lb-mol/hr, ou 95,000 ft<sup>3</sup>/hr. Sur la plan énergétique et économique, les résultats montrent que la puissance nécessaire pour 1,24 lb-mol/h est de 1400 KW. Au bout d'un mois, l'énergie nécessaire est de 1000 MW, pour un coût total annuel de 700. 000 \$. Il est donc évident que cette conception n'est pas réalisable. Même en ne tenant pas compte du capital, l'argent perdu en coûts énergétiques estime que ce processus n'est pas économiquement rentable.

#### 1.3.5.4. La conception cryogénique avec absorption de N<sub>2</sub> sous pression modulée

##### 1. 3.5.4.1 La conception avec un moteur d'expansion

L'alimentation en air dans le système de distillation cryogénique étant jugée coûteuse, l'option d'adsorption supplémentaire a été introduite. Dans le but d'augmenter le rendement du procédé, un procédé d'adsorption de l'Azote par variation de pression modulée a été ajouté à la conception du système. Ce système d'adsorption à variation de pression est utilisé pour éliminer l'azote de l'entrée flux d'air atmosphérique, puis précède le compresseur pour le processus cryogénique et augmente la concentration d'oxygène dans le flux entrant. Cette expansion à l'aide d'un moteur d'expansion, dérivé du cycle de Claude. Le processus de cette conception est représenté ci-dessous.

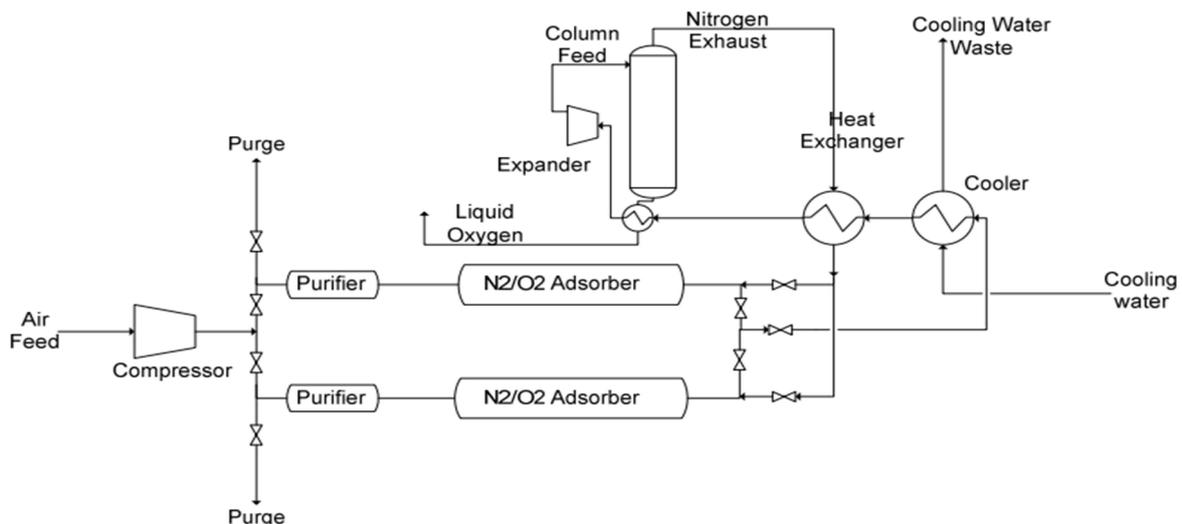


Figure 27 : Cryogénique avec PSA pour N<sub>2</sub> et un moteur d'expansion distillation [30]

Grâce à la turbine d'expansion, le compresseur fonctionne à une compression beaucoup plus faible. Pour produire 1,24 lb-mol/h avec ce processus, l'énergie nécessaire est à 86 kW [30]. Alors que pour seulement 1,24 lb-mol/h avec la conception à alimentation d'air, la puissance énergétique s'élevait à 1400 kW ; Ce qui prouve une amélioration du système ; mais entraînant toujours des coûts annuels importants qui s'élèvent à 237.000 \$ [30]. Le compresseur est généralement nécessaire dans ce processus est un modèle Gardner Denver numéro PA 150 DS sans huile compresseur d'air à vis rotative [30]. Le compresseur est l'un des composants les plus importants de l'ensemble du système, car l'air doit être d'abord comprimé à des pressions relativement élevées pour satisfaire aux conditions nécessaires pour liquéfaction.

#### 1.3.5.4.2. La conception avec agrandissement Joule-Thomson

Dans la conception avec expansion du moteur, le coût d'investissement élevé est principalement dû à la présence de l'expandeur. Ce coût peut être facilement amélioré en échangeant simplement le détendeur contre une vanne J-T. Pour améliorer la conception et donc le rendement, une autre tour est ajoutée. Le processus est similaire et est présenté à la figure 28.

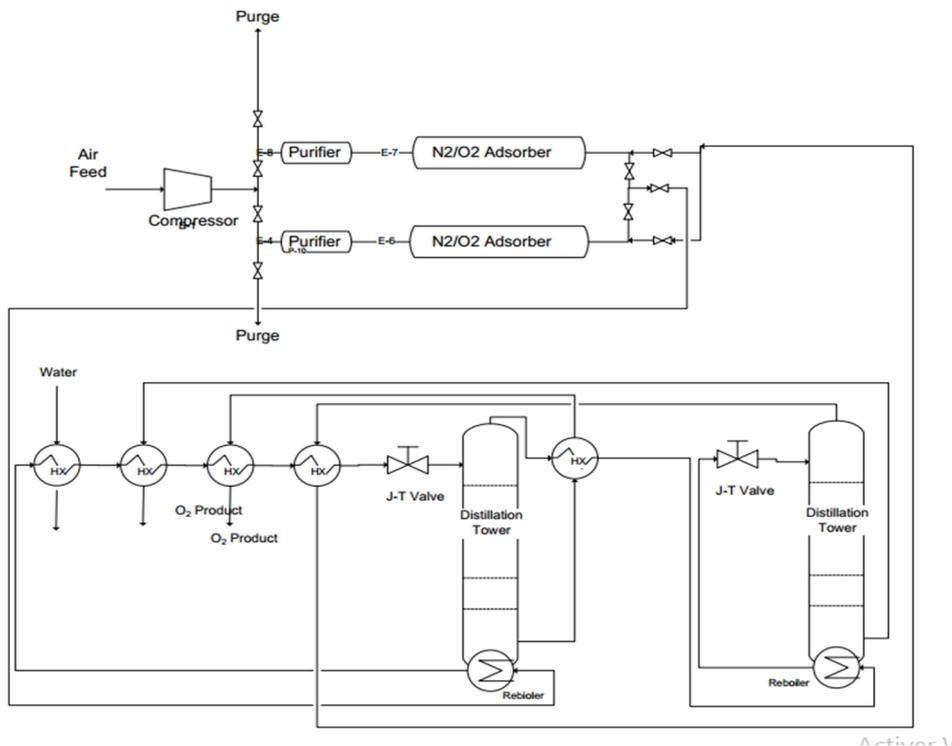


Figure 28 : Distillation cryogénique avec PSA pour N<sub>2</sub> et un avec vanne J-T [30]

L'oxygène médical provenant de la distillation cryogénique peut être fourni aux patients dans les hôpitaux à travers trois mécanismes comme le montre la figure 29.

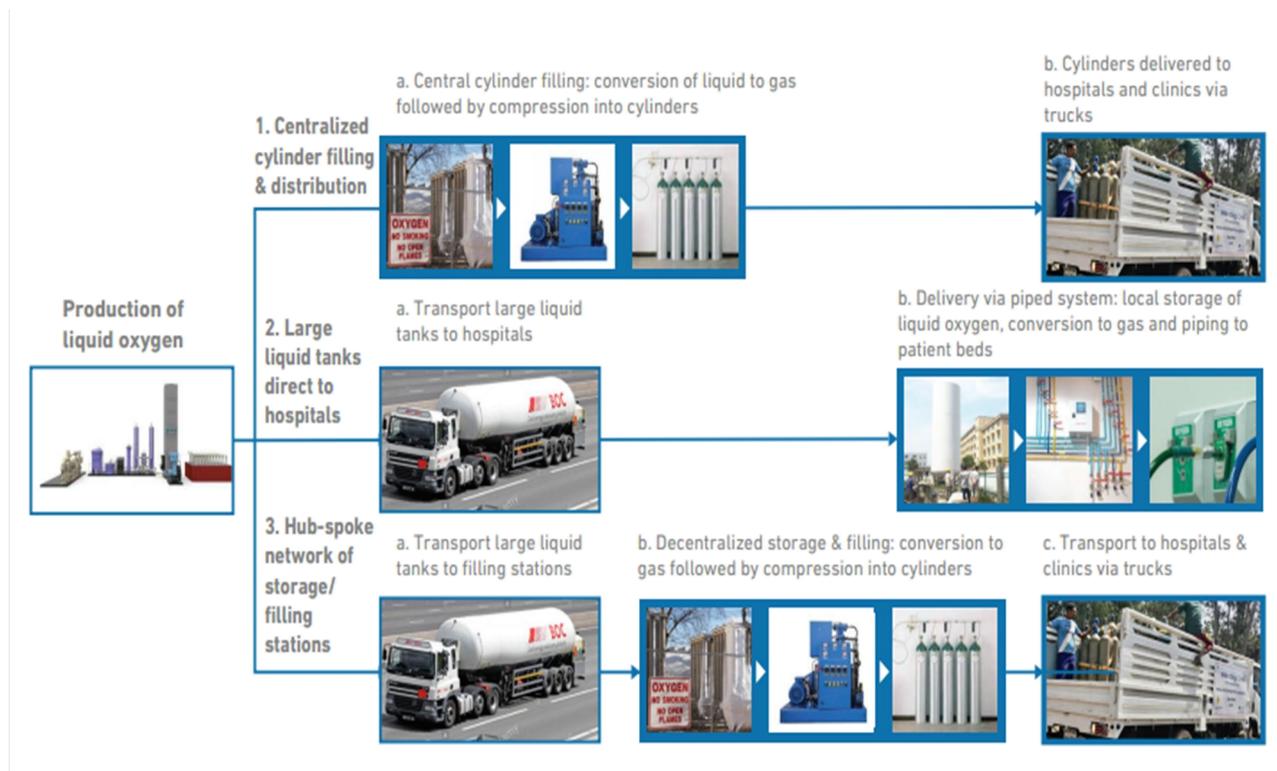


Figure 29 : Mécanismes de fourniture d'oxygène médical produit par la distillation cryogénique [29]

### 1.3.6. Production d'oxygène par électrolyse

Le phénomène d'électrolyse a été découvert par Troostwijk et Diemann en 1789 [35]. C'est un phénomène qui implique le passage du courant à travers une solution ionique et l'immersion d'une paire d'électrodes métalliques dans le liquide. Les ions d'hydrogène et d'oxygène se rassemblent à la cathode et à l'anode respectivement. L'utilisation de l'eau comme matière première est très avantageuse car elle est facilement disponible. Bien qu'il s'agisse d'un moyen acceptable d'obtenir de l'oxygène pur, il existe un besoin continu de métal pour fournir les électrodes et alimentation pour fournir le courant. Les électrodes métalliques doivent être remplacées car ils se combinent avec les ions, les consommant finalement au-delà du point d'utilité. L'énergie libre de Gibbs nécessaire pour produire une mole d'oxygène à partir d'eau est de 475 kJ [32]. Pour la production d'hydrogène, le courant alimente l'électrolyseur qui décompose l'eau en dihydrogène et dioxygène. L'hydrogène produit par électrolyse est dite hydrogène vert contrairement à l'hydrogène gris et bleu produites par reformage du méthane à la vapeur. L'hydrogène est souvent considéré comme le meilleur moyen de stocker l'énergie provenant des sources d'énergie renouvelables et

intermittentes [36]. Avec la capacité croissante de localiser des sources d'énergie renouvelables dépassant la gamme du gigawatt, un système de stockage à égale ampleur est requis.

### **Conclusion**

Ce chapitre était consacré à l'état de l'art sur la production d'oxygène médical et la fourniture de l'électricité solaire à un site isolé. L'évaluation de la ressource énergétique solaire dans le monde à travers la carte de l'irradiation globale montre que l'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable abondante et disponible dans presque tous les continents. L'on observe également que les pays de l'Afrique subsaharienne en sont les plus nantis, raison pour laquelle l'énergie solaire reste une alternative favorable pour combler le déficit énergétique observé tout en contribuant à la lutte contre le réchauffement climatique. Une revue de la littérature sur les méthodes de production d'oxygène médical montre que celui-ci peut être produit en industrie et être acheminé vers les structures hospitalières ou alors être produit sur le site d'utilisation. Cette étude permet de conclure que les méthodes majoritairement employées sont celles de production industrielles à travers la distillation cryogénique et l'absorption modulée en pression. Cependant, l'implémentation de ces méthodes coûtent chères. Il apparaît donc clairement la nécessité de développer des méthodes de production sur site, d'où sa production par hydrolyse associé à la pile à combustible alimentée à l'énergie solaire. Le chapitre suivant aborde l'étude méthodologique et l'analyse financière d'un tel système de production.

## CHAPITRE 2 : MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Introduction

Dans le précédent chapitre, nous avons présenté les généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque et ses applications. Puis quelques solutions de production d'oxygène médical sur site. Dans le souci de concevoir un système qui prend en compte des deux problématiques à savoir : fournir à la fois de l'électricité solaire et l'oxygène médical sur site isolé, le présent chapitre propose dans un premier temps une étude technique de la réalisation d'un tel système à travers son architecture et la modélisation des sous-systèmes qui le composent. Deux approches de dimensionnement photovoltaïque et la technique de gestion de l'énergie du système sont proposées. Nous réaliserons enfin une étude économique du projet.

### 2.1 Matériel

#### 2.1.1 Architecture et description du système

Le système conçu pour cette étude est illustré à la figure 30. Il comprend trois sous-systèmes : Le sous-système PV qui est la principale source d'alimentation électrique pour la charge hospitalière (divisée en charge prioritaire et auxiliaire) et pour l'électrolyseur. Le sous-système électrolyseurs, conçus pour produire de l'oxygène et le sous-système pile à combustible pour servir de stockage de l'excédent d'énergie sous forme hydrogène produit secondaire de l'électrolyseur.

Le système est conçu pour un hôpital avec des charges électriques et au moins une urgence absolue avec ventilation. Il est donc dimensionné pour permettre à l'électrolyseur de produire en une journée une quantité suffisante d'oxygène pour la prise en charge des patients en détresse respiratoire tout en assurant les charges électriques prioritaires. L'énergie électrique produite est principalement utilisée pour alimenter le premier électrolyseur (ELZ<sub>1</sub>), afin de produire de l'oxygène et d'alimenter les charges électriques prioritaires de l'hôpital. L'excédent de production d'énergie électrique est détourné vers les charges auxiliaires de l'hôpital et le deuxième électrolyseur (ELZ<sub>2</sub>). Ce deuxième électrolyseur permet de produire encore une quantité supplémentaire d'oxygène et d'hydrogène. L'hydrogène produit dans les deux

électrolyseurs est stocké via la pile à combustible qui servira d'alimenter les charges hospitalières en cas de déficit de production PV.

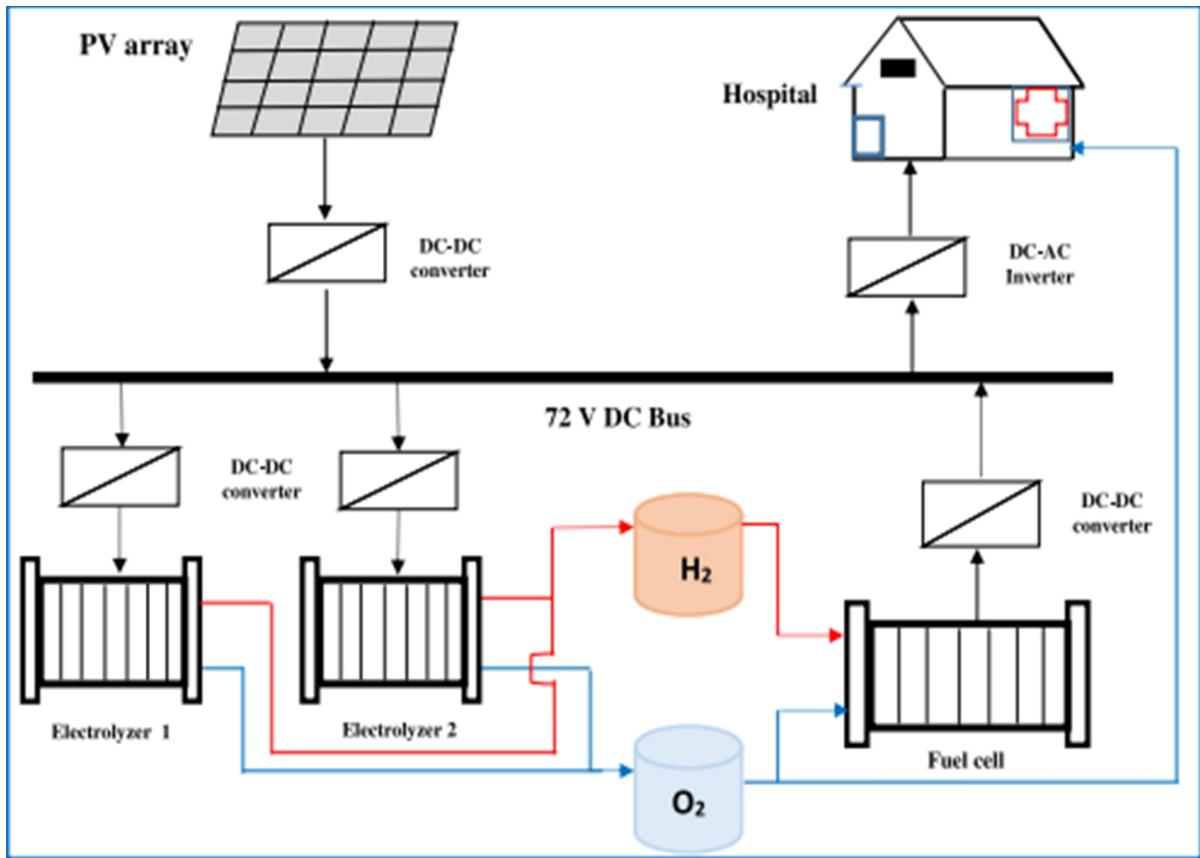


Figure 30: Représentation schématique du système de production d'électricité solaire et d'oxygène médical sur site

### 2.1.1.1. Sous-système champ solaire photovoltaïque

Le champ solaire ici est constitué de panneaux solaires photovoltaïques. La majorité des panneaux solaires actuels est constituée de silicium. Le silicium est un élément que l'on retrouve en abondance sur terre, car il est extrait de la silice principalement contenue dans le sable. Cet élément a des propriétés indispensables dans la production d'électricité (c'est le semi-conducteur le plus utilisé actuellement [37]). Plusieurs cellules reliées entre elles forment un module photovoltaïque (ou panneau solaire) et plusieurs modules regroupés forment un champ solaire. Ces modules peuvent être regroupés en série, en parallèle ou en série-parallèle.

Les cellules photovoltaïques au silicium présentent plusieurs technologies, mais les plus utilisées sont les suivantes :

➤ **Les cellules au silicium poly-cristallin**

Ce type de cellule consomme peu d'énergie et leur rendement est situé entre 14% et 18 % [38]. Cette technologie occupe actuellement 62 % du marché mondial [39].

➤ **Les cellules au silicium monocristallin**

Elles sont constituées d'un seul cristal, sa couleur est noire au reflet bleuté. Ces cellules ont un meilleur rendement que les cellules au silicium poly-cristallin, pouvant aller jusqu'à 24% [38]. Cependant, sa mise en place nécessite plus d'énergie. Ce type de photopile occupe 33% du marché mondial [39].

➤ **Les cellules au silicium amorphe**

Leur coût de fabrication est le plus faible mais c'est la technologie la moins utilisée sur le marché, certainement à cause de leur durée de vie faible et sont fabriquées pour des charges de faibles puissances. Leur rendement se situe entre 5% et 7% [38], représentant 5% du marché mondial en 2017 [39].

La figure 31 illustre les types de cellules Photovoltaïques au silicium

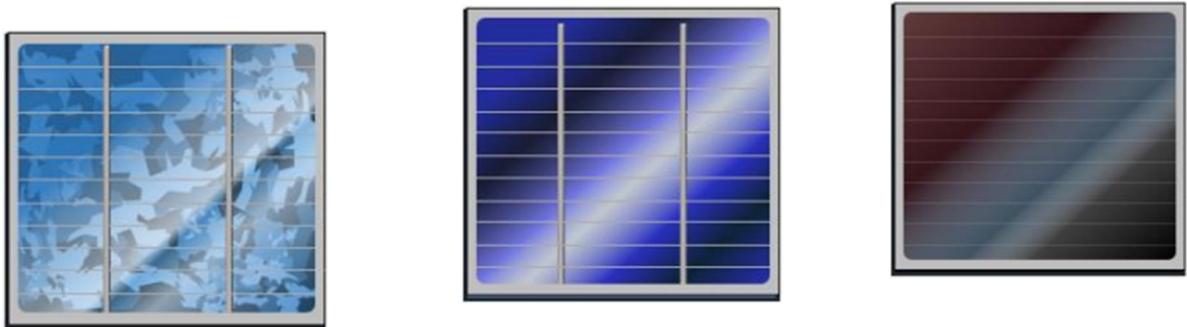


Figure 31: Différentes technologies des cellules PV au silicium. De gauche à droite : poly-cristallin, monocristallin et amorphe [40]

Bien que les cellules amorphes présentent un rendement plus important, nous avons choisi les panneaux solaires au silicium poly-cristallin pour concevoir le champ solaire PV de notre système, en raison de leur grande disponibilité sur le marché.

### 2.1.1.2. Sous - système électrolyseur

L'électrolyseur est un appareil utilisé pour réaliser une électrolyse, pour décomposer chimiquement certains corps composés (en fusion ou en solution) sous l'action d'un courant électrique. Il existe différents types d'électrolyseurs. Les deux électrolyseurs à hydrogène les plus connus sont : l'électrolyseur alcalin et l'électrolyseur à membrane échangeuse de protons (PEM).

#### ➤ L'électrolyseur alcalin

L'électrolyseur alcalin est une technologie plus ancienne et la plus étendue au niveau commercial [41]. Ce type d'électrolyseur se caractérise par deux électrodes immergées dans le liquide électrolytique alcalin, constitué d'une solution de potasse caustique (KOH) de 20 à 30%. Les deux électrodes sont séparées par un diaphragme qui a pour rôle de séparer l'un de l'autre les gaz produits, pour des raisons d'efficacité et de sécurité [42].

Cependant, cette technologie présente trois problèmes majeurs à savoir :

- **une faible plage de charge partielle**

Le diaphragme empêche la diffusion complète croisée des gaz produits à travers lui. La diffusion de l'oxygène dans la cathode réduit l'efficacité de l'électrolyseur, car l'oxygène est catalysé à nouveau dans l'eau avec l'hydrogène présent à la cathode. A faible charge (<40%), le taux de production d'oxygène diminue, augmentant ainsi considérablement la concentration d'hydrogène à des niveaux indésirables et dangereux (limite inférieure d'explosion >4 mol% H<sub>2</sub>) [43].

- **une densité de courant limitée**

Le deuxième inconvénient des électrolyseurs alcalins est la faible densité de courant maximal réalisable, en raison de la haute densité ohmique à travers l'électrolyte liquide et le diaphragme.

- **une faible pression de service.**

Le troisième problème attribué à l'électrolyseur alcalin, est son incapacité à fonctionner à haute pression, ce qui rend sa configuration encombrante et donc difficile pour sa conception.

L'électrolyseur alcalin utilise un électrolyte liquide alcalin. L'eau contenue dans cet électrolyte est divisée en ions hydrogène et hydroxyde au pôle cathodique. Ces ions sont ensuite mis en contact avec une membrane, après quoi ils sont oxydés en eau et en oxygène au pôle anodique.

### ➤ L'électrolyseur PEM

Pour pallier aux problèmes de l'électrolyseur alcalin, General Electric, dans les années 1960 a développé le premier électrolyseur à eau à base d'un polymère solide : il s'agit de l'électrolyseur à membrane échangeuse de protons (PEM) [44]. L'électrolyseur PEM fonctionne à haute pression. La faible épaisseur de membrane (~20-300 $\mu\text{m}$ ) fait partie des raisons qui confèrent de nombreux avantages à cet électrolyseur [44]. Sa membrane polymère ne laisse passer que les ions Hydrogène. L'eau se divise en Oxygène, en ions Hydrogène et en deux électrons à l'anode. Les ions Hydrogène et les électrons traversent ensuite la membrane et sont transformés en Hydrogène à la cathode.

### ❖ Aspects positifs

Les électrolyseurs PEM présentent plusieurs avantages :

- peuvent fonctionner à des densités de courant beaucoup plus élevées, capables d'atteindre des valeurs supérieures à  $2 \text{ A cm}^{-2}$ , cela réduit les coûts opérationnels et potentiellement le coût global.
- Sa membrane mince (contrairement à l'électrolyseur alcalin) est capable de fournir une bonne conductivité protonique ( $0.10.02 \text{ S cm}^{-1}$ ) [45], ce qui limite au maximum les pertes ohmiques et donc capable de fournir des densités de courant plus élevées.
- Le faible taux de croisement gazeux de l'électrolyte permet de produire de l'hydrogène de haute pureté, ce qui permet également à l'électrolyseur PEM de fonctionner sous une large gamme d'entrée de puissance (aspect économique). Cela est dû au fait que le transport du proton à travers la membrane répond rapidement à l'entrée de puissance, non retardé par l'inertie comme dans les électrolytes alcalin [46].
- Comme on l'a vu plus haut, dans les électrolyseurs alcalins fonctionnant à faible charge, le taux de production d'hydrogène et d'oxygène diminue tandis que la perméabilité à l'hydrogène à travers le diaphragme reste constante, ce qui donne une plus grande concentration

d'hydrogène du côté de l'anode, créant des conditions dangereuses et moins efficaces [46]. contrairement à l'électrolyseur alcalin, les couvertures d'électrolyse PEM s'effectuent pratiquement sous toutes les gammes de densité de puissance nominale (10 - 100%) [46].

- Le fonctionnement haute pression d'un électrolyseur apporte l'avantage de livrer l'hydrogène à haute pression (parfois appelé compression électrochimique) pour l'utilisateur final, nécessitant donc moins d'énergie pour comprimer et stocker d'avantage l'hydrogène [47-49].

- Les électrolyseurs PEM sont moins acoustiques, peuvent être des dispositifs réversibles et sont capables de fonctionner avec des cellules de tension faible, des densités de courant plus élevées, des températures et pressions plus élevées conduisant à des efficacités (80 - 90 %) [50].

#### ❖ Les limites de l'électrolyseur PEM.

Les principales limites des électrolyseurs PEM sont [51]:

- Le coût élevé des matériaux
- La perméation des phénomènes croisés qui augmente avec la pression et la présence de vapeur d'eau ainsi que le produit de l'hydrogène, nécessitant une déshumidification.

Les figures 32 et 33 présentent respectivement la constitution d'un électrolyseur la structure des éléments constitutifs d'un électrolyseur PEM.

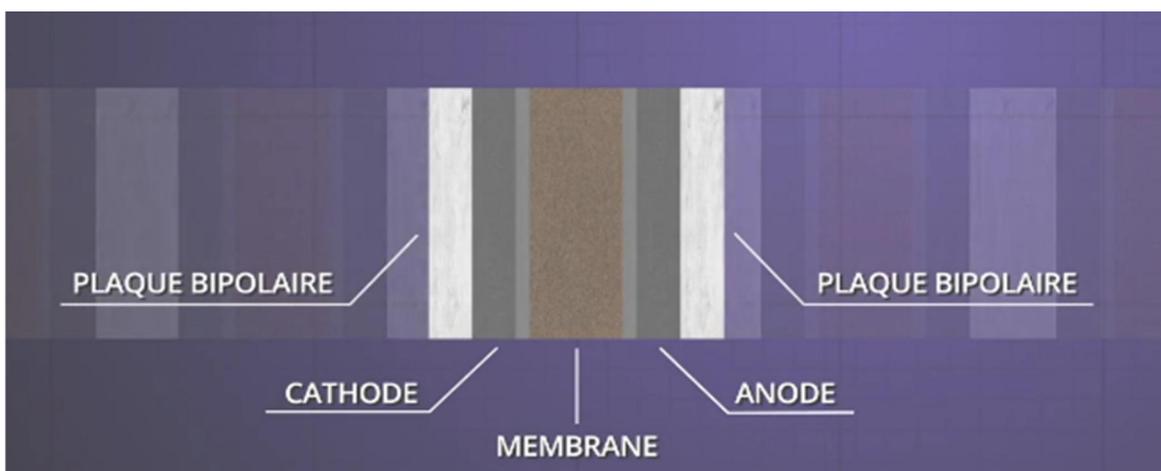


Figure 32: constitution d'un électrolyseur [52]

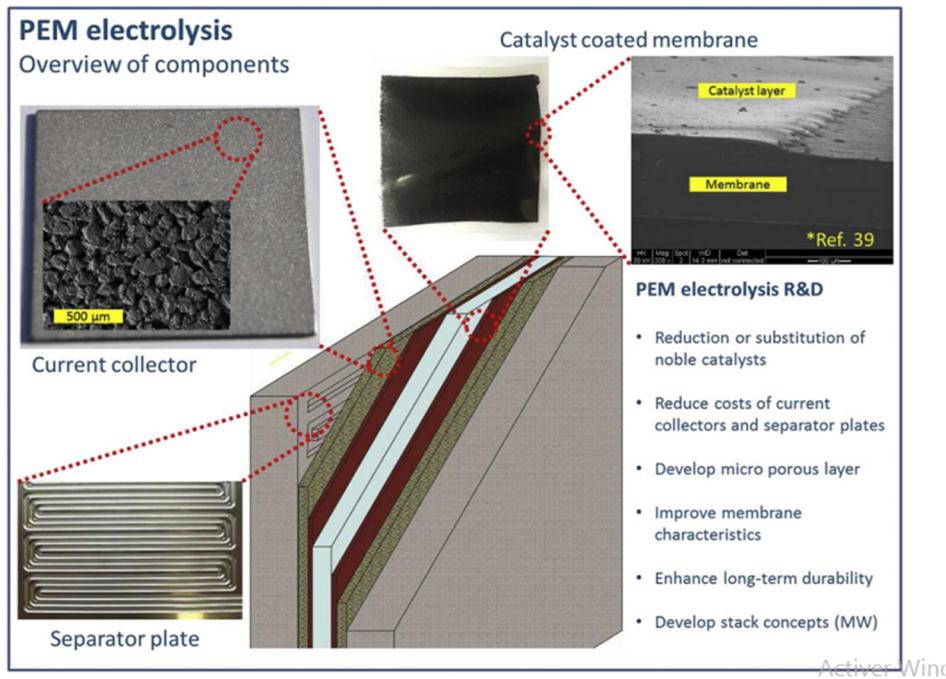


Figure 33 : Eléments constitutifs de l'électrolyseur PEM [53]

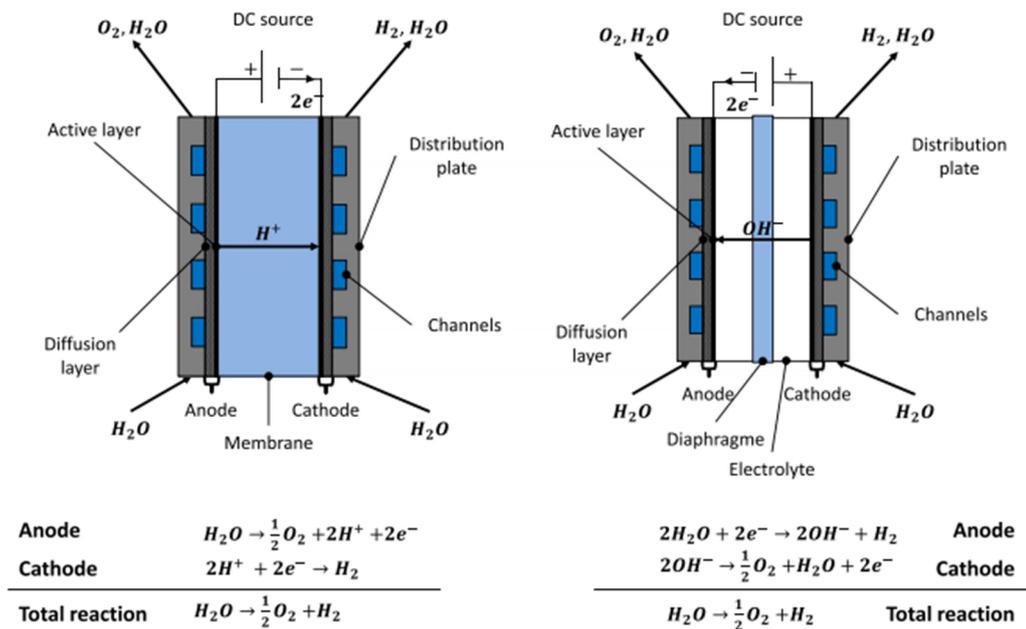


Figure 34: Schéma du principe de fonctionnement d'une cellule d'électrolyse de l'eau alcaline et PEM [51]

### ❖ Justification du choix du type d'électrolyseur

Pour cette étude, nous avons choisi l'électrolyseur à membrane polymère échangeuse de protons (PEM) car est très prometteur pour la production d'oxygène : ils sont compacts, performants électriquement (1 à 4 A cm<sup>-2</sup>), produisent de l'hydrogène très pur (pas ou peu de pollution par l'électrolyte), nécessitent peu de maintenance et peuvent être bien adaptés aux sources provenant des énergies renouvelables [44].

#### 2.1.1.3. Sous système pile à combustible

### ❖ Définition et types de piles à combustibles

Une pile à combustible (PAC) est un dispositif électrochimique dans lequel l'énergie chimique de combustion (oxydoréduction) est directement convertie en énergie électrique, en chaleur et en eau [54 ; 55]. Cette conversion se produit dans une cellule unitaire qui constitue le cœur de la pile à combustible. La pile à combustibles a été conçue en 1838 par le chimiste germano-suisse Christian Friedrich Schonbein [56]. Il existe plusieurs types de piles à combustibles, la plus courante est la pile à combustible à membrane échangeuse de protons (ou PEMFC). Les piles à combustible se différencient d'abord par la nature de l'électrolyte utilisé, soit acide conduisant les ions positifs (protons H<sup>+</sup>) de l'anode à la cathode, soit basique (anions OH<sup>-</sup>, O<sup>2-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) en sens contraire. Puis par leur température de fonctionnement.

Le cœur d'une PAC est constitué de trois éléments, dont deux électrodes : une anode oxydante (émettrice d'électrons); une cathode réductrice (collectrice d'électrons) séparées par un électrolyte. L'alimentation d'une PAC se fait par injection continue de combustible à l'anode, généralement de l'hydrogène, et à la cathode, généralement le dioxygène (oxygène dans le langage courant) de l'air ou l'air lui-même. Une énergie électrique continue est alors disponible aux bornes de la pile. Dans le langage courant, les piles à combustible utilisant généralement l'hydrogène ou un combustible hydrogéné sont appelées « piles à hydrogène ». L'électrolyte a la propriété de conduire directement d'une électrode à l'autre des molécules ionisées et de faire barrage aux électrons en les obligeant à passer par le circuit extérieur de la pile ou leur énergie électromotrice peut être exploitée. En fait, c'est le principe inverse de l'électrolyse de l'eau. Ce flux d'électrons crée le courant électrique. Pendant ce temps, les protons traversent la membrane. Ces protons et l'oxygène se regroupent tous et se recombinent ensemble pour former les molécules d'eau. Ce phénomène est illustré à la figure 35.

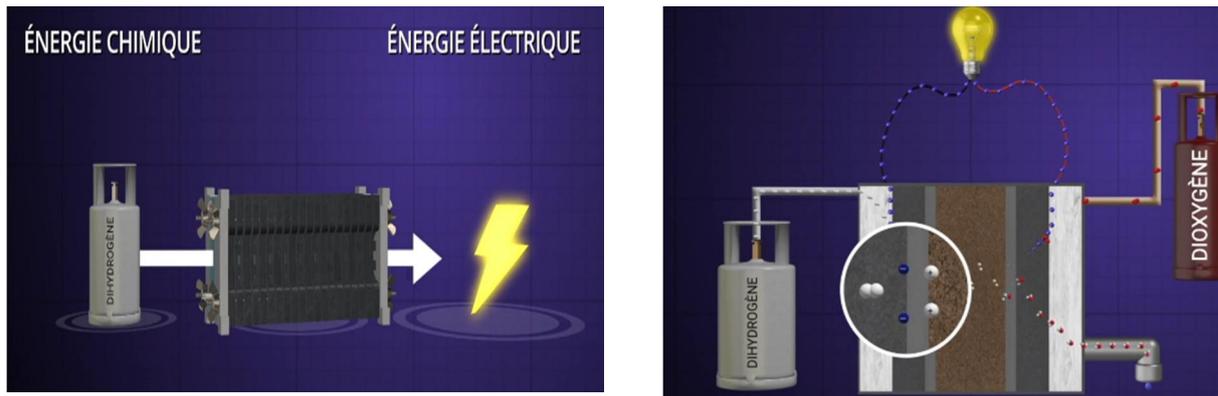


Figure 35: Processus de de fonctionnement de la pile à combustible [52]

On distingue six types de piles à combustible répartis en deux groupes à savoir [57 ; 58]:

- **Trois à électrolytes acides** (ions  $H^+$  migrant de l'anode vers la cathode):
  - les piles à membrane échangeuse de protons PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell). L'électrolyte est constitué d'une membrane solide polymère fonctionnant à basse température. (20-100°C). Celle-ci transmet sélectivement vers la cathode les ions  $H^+$  formés par oxydation catalytique de l'hydrogène injectée directement sur l'anode. Le combustible utilisé est le gaz naturel reformé et l'hydrogène pur. Son utilisation est sous température inférieure à 100° C.
  - les piles à combustible à méthanol direct DMFC (Direct Methanol Fuel Cell). Au lieu d'hydrogène, ces piles utilisent comme combustible le méthanol ( $CH_3OH$ ). Injecté directement sur l'anode avec de l'eau, son oxydation catalytique produit des ions  $H^+$  et du gaz carbonique. Comme sur les PEMFC, une membrane solide polymère transmet sélectivement les  $H^+$  vers la cathode ;
  - les piles à combustible à acide phosphorique PAFC (Phosphorique Acid Fuel Cell) utilisent à la place de membranes solides de l'acide phosphorique liquide occlus dans une matrice solide poreuse. Elles peuvent fonctionner jusqu'à 200°C.

**Trois à électrolytes basiques** (ions négatifs migrant de la cathode vers l'anode)

- les piles à combustible à alcalin AFC à potasse liquide (Alkaline Fuel Cell). Elles utilisent l'ion  $\text{OH}^-$  libéré par réduction catalytique de cette base sur la cathode ; Cette pile est alimentée avec de l'hydrogène pur et de l'oxygène. Elle utilise l'électrolyte alcalin.
- Les piles à combustible à carbonate fondu MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell). utilisent des carbonates de lithium et de potassium fondus pour faire migrer des ions  $\text{CO}_3^{2-}$ . comme combustible, cette pile utilise le gaz dérivé du charbon ou encore le gaz naturel. Elle fonctionne à des températures avoisinant  $650^\circ\text{C}$ .
- les piles à combustible à oxyde solide SOFC (Solid Oxyde Fuel Cell) exploitent un électrolyte à céramique solide pour produire des ions  $\text{O}^{2-}$ .

Les piles à combustible se différencient aussi par leurs domaines d'application.

\* Dans la gamme 1 W–10 kW : la pile à combustible est utilisée pour les équipements électriques personnels tels que : les téléphones portables, les ordinateurs personnels.

\* Dans la gamme 1 W–100 KW : elles sont utilisées dans les véhicules électriques personnels et transport public.

\* Dans la gamme 1 W–10 MW pour les systèmes électriques énergétiques.

## 2.2. Modélisation et dimensionnement du système

### 2.2.1. Sous- système champ solaire PV

Le sous-système PV est dimensionné à l'aide de l'équation (2.1), en tenant compte de la puissance de l'électrolyseur prioritaire ( $P_{ELZ1}$ ), de la puissance de la charge prioritaire ( $P_{load}$ ), du temps de fonctionnement de l'électrolyseur et de la charge prioritaire ( $\Delta t$ ), du rayonnement solaire ( $E_S$ ) de la zone d'étude et du coefficient de correction  $K_S$ .

$$P_{PV} = \frac{\sum_1^N P_{load}^i \times \Delta t_i + P_{ELZ1} \times \Delta t}{E_S \times K_S} \quad (2.1)$$

Le système PV est conçu pour répondre à la demande de la charge à un niveau de disponibilité. Optimiser le système consiste à limiter les phénomènes de sous-estimation du système, qui entraîne un déficit permanent de l'alimentation de la charge. Par ailleurs un surdimensionnement du système qui contribue à élever les coûts d'installation et d'entretien du système. Pour ce fait, la taille du système photovoltaïque est d'abord estimée à l'aide de l'approche intuitive basée sur la moyenne mensuelle du rayonnement solaire comme indiqué à l'équation (2.1). La probabilité

de perte de charge (LLP) est le critère utilisé pour optimiser la taille des composants, y compris le PV, les électrolyseurs et les piles à combustible. Le LLP définie comme un rapport entre le déficit énergétique total et la demande de la charge totale au cours d'une période donnée peut être exprimée par l'équation 2.2.

$$LLP = \frac{\sum_t^T (P_{PV}(t) - P_{load}(t))}{\sum_t^T P_{load}(t)} \quad (2.2)$$

Sur la base du résultat obtenu de l'équation 2.1, la valeur est fixée dans l'intervalle de recherche pour le nombre de modules PV sont définis. Pour chaque valeur du nombre de modules PV, la taille correspondante de l'électrolyseur et de la pile à combustible est estimée, et le LLP est calculé pour trouver la taille la plus appropriée de l'ensemble du système.

La modélisation du champ PV consiste à prédire le comportement électrique d'un générateur PV. Et cette prédiction est primordiale, car elle est à la base de l'évaluation de l'énergie qui sera délivrée. Ceci est une étape cruciale de la conception de n'importe quel système PV. Les données disponibles généralement pour faire cette prédiction sont les informations données par le fabricant du module PV, l'emplacement géographique et le climat local. Cette prédiction du comportement du générateur PV se fait à travers des modèles. Plusieurs modèles sont mis en évidence dans la littérature [59-63]. On peut les classer en deux catégories :

- les modèles physiques basés sur la représentation du circuit de la cellule et ceux basés sur des données empiriques. La différence entre ces deux groupes de modèles réside au niveau des paramètres utilisés en entrée. Les modèles basés sur les données empiriques sont simples pour les uns, plus complexes et non linéaires utilisant une régression multi variable pour les autres. Certains de ces modèles prennent en compte uniquement les variables météorologiques (température ambiante, irradiation solaire et vitesse du vent). Et d'autres modèles de ce groupe prennent en compte à la fois les caractéristiques du panneau solaire données par le fabricant et les variables météorologiques. Une liste de ces modèles a été établie par skoplaki et al [64].
- Les modèles électriques, aussi appelés circuits équivalents, pour reproduire le comportement de la cellule à l'aide des composants électroniques

Le problème avec les modèles empiriques est que ceux-ci sont adaptés chacun à un climat précis. Dans la littérature, plusieurs études ont été menées pour faire le choix des modèles adaptés à des zones climatiques précises. On peut citer les travaux de Charef Hajjaf et al en 2018 au Maroc portant sur le climat sémi -aride [65], les travaux de Gyu Gwang Kim et al. qui en 2019 ont prédit des modèles empiriques sous climats variables [66]. Ces résultats montrent qu'un modèle peut être adapté pour la prediction PV sous un climat et ne pas l'être sous un autre . Il est donc délicat de les adopter pour le dimensionnement du système PV sous un climat sous lequel l'étude de validation de modèles empiriques n'a pas été effectuée. Par ailleurs, les modèles empiriques ne donnent que la puissance de sortie PV. Par contre, les modèles électriques, en dehors de la puissance, donnent des informations sur la tension et le courant produits à chaque instant par le PV. Parmi ce groupe de modèles, Le modèle à une diode est le plus répandu pour représenter une cellule PV grâce à sa simplicité et sa précision [67]. Tous ces arguments justifient le choix du modèle électrique à une diode utilisé dans ce travail pour modéliser les cellules du champ PV et dont la représentation est illustrée à la figure 36.

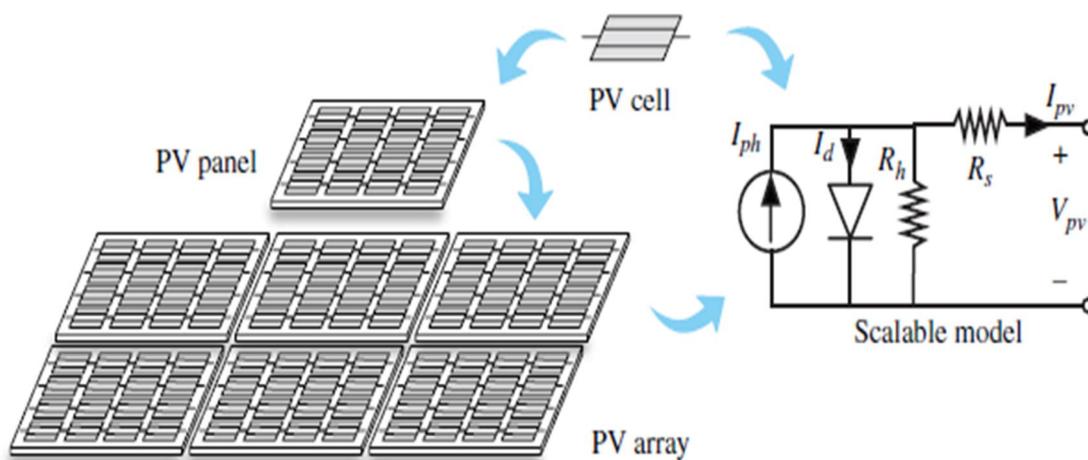


Figure 36: Représentation du champ PV et du modèle à une diode [68]

L'équation transcendente associée au modèle à une diode propose une expression du courant ( $I$ ) en fonction de la tension du module ( $V$ ), comme indiqué dans l'équation 2.3.

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left( \frac{q(V+IR_s)}{AKT} \right) - 1 \right\} - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

Où  $I_{ph}$  est le photo courant,  $I_0$  le courant de saturation de la diode,  $R_s$  la résistance série,  $R_{sh}$  la résistance Shunt,  $q$  la constante de la charge électrique,  $k$  la constante de Boltzmann,  $T$  la température de la cellule PV et  $A$  le coefficient d'ajustement de la diode. Les défis informatiques sur la résolution de ce modèle traduits par l'équation 2.3 reposent sur sa nature implicite car elle est sous la forme  $f(I,V) = 0$ . Pour sa résolution, Jain et al ont proposé pour la première fois en 2005, une fonction dite fonction de Lambert W pour réformer l'équation I-V sous la forme explicite (c'est-à-dire  $I = f(v)$  ou  $V = g(I)$ ) [69]. Ainsi, l'équation 2.3 peut être transformée sous la forme  $y = \chi + b \times \exp \chi$  et une solution peut être trouvée en utilisant la fonction W de Lambert notée  $W(x)$  et définie comme l'inverse de la fonction  $W^{-1} : \chi \rightarrow \chi \times \exp \chi$  [70,71]. Le courant et la tension sont donnés respectivement par les relations 2.4 et 2.5.

$$I = \frac{V_t}{R_s} \left[ \frac{R_s R_{sh}}{R_s + R_{sh}} \frac{(I_{ph} + I_0)}{V_t} - W \left( \frac{I_0}{V_t} \frac{R_s R_{sh}}{R_s + R_{sh}} \exp \left( \frac{R_{sh}}{R_s + R_{sh}} \frac{V}{V_t} \right) \exp \left( \frac{R_s R_{sh}}{R_s + R_{sh}} \frac{(I_{ph} + I_0)}{V_t} \right) \right) \right] - \frac{V}{R_{sh} + R_s} \quad (2.4)$$

$$V = V_t \left[ \frac{R_{sh}}{V_t} (I_{ph} + I_0 - I) - W \left( \frac{R_{sh} I_0}{V_t} \exp \left( \frac{R_{sh} (I_{ph} + I_0 - I)}{V_t} \right) \right) \right] - R_s I \quad (2.5)$$

Cette approche a permis de faciliter le temps de calcul par résolution numérique et les problèmes de convergence [72,73], ce qui facilite donc sa résolution. Plusieurs approches sont utilisées dans la littérature pour obtenir la caractéristique I-V en utilisant la fonction de Lambert pour exprimer explicitement I en fonction de V ou exprimer V en fonction de I [70, 71,74]. On peut citer : la résolution par processus itératif sous MATLAB, la formule de calcul hybride et la formule d'approximation simple.

#### ➤ La fonction de Lambert W dans MATLAB

Avec la fonction de Lambert W disponible dans le logiciel MATLAB. Le processus itératif est évalué numériquement, en utilisant la méthode de Haley dont le schéma itératif est reporté dans les équations 2.6 et 2.7 :

$$X_{k+1} = X_k + \frac{F(X_k)}{G(X_k)} \quad (2.6)$$

$$G(X_k) = F'(X_k) - \frac{F(X_k).F^2(X_k)}{2.F'(X_k)} \quad (2.7)$$

Le processus itératif est arrêté lorsque la différence entre deux valeurs consécutives de  $X_k$  est inférieure à la précision fixée à  $\varepsilon = 10^{-6}$  comme décrit dans l'équation 2.8.

$$|X_{k+1} - X_k| < \varepsilon \quad (2.8)$$

Le calcul de la fonction Lambert  $W(x)$  dans MATLAB est ensuite effectué en utilisant le schéma itératif décrit dans l'équation 2.9.

$$W_{k+1} = W_k - \frac{W_k \exp^{W_k - x}}{\exp^{W_k(W_k+1)} - \frac{(W_{k+2})(W_j \exp^{W_k - x})}{2 \cdot W_{k+2}}} \quad (2.9)$$

Où  $W$  est la fonction de Lambert, l'intervalle de  $x$  à  $k$  indique les étapes d'itération.

#### ➤ L'approche par formule asymptotique

Corless et al sont les premiers à proposer la formule asymptotiques en 1996 traduite par l'équation 2-10 [75].

$$W\{x\} = L_1 - L_1 + \frac{L_2}{L_1} + \frac{L_2(-2+L_2)}{2L_1^2} + \frac{L_2(6-9L_2+2L_2^2)}{6L_1^2} + \frac{L_2(-12+36L_2-22L_2^2+3L_2^3)}{12L_1^4} + \frac{L_2(60-300L_2+350L_2^2-125L_2^3+12L_2^4)}{60L_1^5} + \left[ \left( \frac{L_2}{L_1} \right)^6 \right] \quad (2.10)$$

Avec

$$L_1 = \ln(x), L_2 = \ln(\ln(x)).$$

Le problème avec cette formule est qu'elle n'est applicable qu'aux grands arguments [76].

#### ➤ L'approche hybride

En utilisant l'approche hybride, la fonction de Lambert  $W(x)$  qui est la racine de l'équation transcendantale  $W(x) \exp(W(x)) = x$ , est calculée au moyen des équations 2.11 - 2.13 [77,78].

$$W\{x\} = \begin{cases} W_1, & \forall x \in [0, 9] \\ W_2, & \forall x \in [9, +\infty) \end{cases} \quad (2.11)$$

$$W_1 = Y + \frac{Y}{1+Y}Z + \frac{Y}{2(1+Y)^3}Z^2 + \frac{Y(6Y^2-8Y+1)}{24(1+Y)^7}Z^4 - \frac{Y(24Y^3-58Y^2+22Y-1)}{120(1+Y)^9}Z^5 \quad (2.12)$$

$$W_2 = L_1 - L_2 + \frac{L_2}{L_1} + \frac{L_2(-2+L_2)}{2L_1^2} + \frac{L_2(6-9L_2+2L_2^2)}{6L_1^3} + J(L_1, L_2) + H(L_1, L_2) \quad (2.13)$$

Où :

$$J(L_1, L_2) = \frac{L_2(-12+36L_2-22L_2^2+3L_2^3)}{12L_1^4} ; \quad H(L_1, L_2) = \frac{L_2(60-300L_2+350L_2^2-125L_2^3+12L_2^4)}{60L_1^5} ;$$

$$Y = x/e, \quad Z = 1 - x/e, \quad L_1 = \ln(x), \quad L_2 = \ln(\ln(x)).$$

Cette formule donne une erreur relative inférieure à 0,1 % pour toute la gamme d'arguments non négatifs [74].

#### ➤ La formule d'approximation simple

Un calcul beaucoup plus simple est proposé au moyen de la fonction de Lambert W pour la résolution de l'équation du modèle à une diode. Il est présenté par l'équation 2.14.

$$W\{x\} = \ln(x) \left[ \frac{1-\ln(\ln(x))}{\ln(x)+1} \right] \quad (2.14)$$

L'utilisation de cette formule donne une erreur de 1.5% pour les valeurs de  $x \geq 2$  et l'erreur de calcul devient de plus en plus grande pour des petits arguments [79].

#### ➤ La formule d'approximation analytique

Cette approximation définie par l'équation 2.15 est également utilisée pour évaluer la fonction de Lambert W. certains auteurs comme Barry et al l'ont introduit en 2000 [80].

$$W\{x\} = (1 + \varepsilon) \ln \left( \frac{\frac{6}{5}x}{\ln \left[ \frac{12}{5}x \right]} \right) - \varepsilon \ln \left[ \frac{2x}{\ln(1+2x)} \right] \quad (2.15)$$

Avec  $\varepsilon$  une constante qui vaut 0.4586887. Cette formule présente une erreur maximale de 0.196 % pour  $x \geq 0$ . [70].

### Justification du choix de méthodes d'implémentation de la fonction de Lambert

Une simulation de la comparaison des précisions et des performances de calcul des différentes implémentations de la fonction de Lambert  $W$  a été faite par Efstratios I et al [70]. Cette évaluation a été appliquée dans deux cas : tout d'abord dans le cas général des arguments positifs et par la suite sur une courbe I-V d'un générateur photovoltaïque. Les tableaux 2.1 et 2.2 présentent les résultats de cette évaluation pour les deux cas :

Tableau 2: Performances des six implémentations de la fonction de Lambert pour le cas des arguments positifs [70]

Method	Range	Max error	Time per evaluation
MATLAB	Entire	—	103 ns
Asymp7	$x \geq 3$	1.32%	35 ns
Asymp4	$x \geq 3$	4.46%	33 ns
Hybrid	Entire	<b>0.06%</b>	36 ns
Simple	$x \geq 2$	1.47%	<b>31 ns</b>
Analyt	$x \geq 3e-5$	0.19%	63 ns

Tableau 3 : Performances des six implémentations de la fonction de Lambert sur une courbe I-V d'un champ PV de 4kW [70]

Method	I-approach			V-approach		
	Range	NRMSE	Time	Range	NRMSE	Time
MATLAB	Entire	—	203 ns	Entire	—	450 ns
Asymp7	>323 V	0.16%	39 ns	>229 V	0.001%	54 ns
Asymp4	>323 V	1.28%	<b>36 ns</b>	>230 V	0.009%	52 ns
Hybrid	Entire	<b>4.7e-5</b>	72 ns	Entire	<b>1.3e-6</b>	71 ns
Simple	>317 V	0.82%	40 ns	>226 V	0.021%	<b>50 ns</b>
Analyt	>153 V	0.03%	65 ns	>76 V	0.178%	96 ns

L'analyse de ces deux tableaux révèle que le résultat de calcul est acceptable pour toutes les méthodes, mais la formule hybride présente l'erreur la plus faible. Le processus itératif défini dans le logiciel MATLAB semble également adéquat; ce qui justifie l'utilisation de ces deux approches pour évaluer les caractéristiques I-V de notre champ solaire.

Le réseau PV est organisé en  $N_p$  modules en parallèles et de  $N_s$  modules en série, les paramètres du réseau sont liés à ceux des cellules comme indiqué dans l'équation 2.16 :

$$\begin{cases} I_{ph} = N_p I_{ph,cell} \\ I_s = N_p I_{s,cell} \\ V_t = N_s V_{t,cell} \\ R_s = \frac{N_s}{N_p} R_{s,cell} \\ R_{sh} = \frac{N_s}{N_p} R_{sh,cell} \end{cases} \quad (2.16)$$

### 2.2.2. Sous- système électrolyseur

Les questions liées à la modélisation de l'électrolyseur ont été abordées dans plusieurs études avec différents degrés de complexité [50, 51, 81]. Les premiers travaux sur la modélisation de l'électrolyseur commencent dans les années 1990 [82]. La modélisation de l'électrolyseur PME quant à elle connaît son essor vers les années 2000 [83,84]. La fonction principale d'un électrolyseur est de convertir l'énergie électrique en énergie chimique (hydrogène). La modélisation de l'électrolyseur permet de mieux comprendre les phénomènes régissant l'électrolyse à savoir l'influence de différents paramètres sur les performances de l'électrolyseur permettant une simulation, une conception et une optimisation efficace du système d'électrolyse.

En parcourant la littérature, on peut souligner trois processus de modélisation : la modélisation électrochimique ; la modélisation électrique et la modélisation thermique.

#### ✚ La modélisation électrochimique d'un électrolyseur

Les modèles électrochimiques sont au cœur de tout travail de modélisation de systèmes d'électrolyse et permettent d'établir une relation entre la puissance électrique d'entrée et Flux d'hydrogène à la sortie. Les bilans de matière appliqués à une cellule d'électrolyse permettent de montrer que le flux d'hydrogène produit par la cellule est proportionnel au courant (I) [85]. Cette équation est communément appelée loi de Faraday et exprime le flux molaire de l'hydrogène ( $\dot{n}_{H_2}$ ) en fonction du nombre stœchiométrique d'hydrogène ( $\nu_{H_2}$ ) et la constante de Faraday (F) suivant l'équation 2.17.

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{I}{\nu_{H_2} \cdot F} = \frac{1}{2 \cdot F} \quad (2.17)$$

En tenant compte du fait que tous les électrons ne sont pas impliqués dans la réaction d'électrolyse (courants de fuite, réactions parasites, etc...), l'équation 2.17 peut être modifiée en ajoutant un paramètre appelé rendement de Faraday noté

$\eta_F$  et l'on obtient l'équation 2.18. En particulier pour l'électrolyseur PEM, ce paramètre est considéré comme égal ou très proche de 1 [86, 87–90]. Dans les autres cas, ce rendement peut être calculé à travers des équations empiriques qui impliquent des conditions de fonctionnement telles que la température (T) ou le courant (Equations 2.18 et 2.19) [91, 93].

$$\eta_{far} = B_1 + B_2 \cdot \exp\left(\frac{B_3 + B_4 \cdot T + B_5 \cdot T^2}{I}\right) \quad (2.18)$$

$$\eta_{far} = \frac{\left(\frac{I}{A}\right)^2}{f_1 + \left(\frac{I}{A}\right)^2} f_2 \quad (2.19)$$

Où A est la surface de la cellule, Bi et fi sont des coefficients empiriques.

Afin de caractériser l'efficacité cellulaire, il est nécessaire de relier la puissance électrique à l'entrée et le flux d'hydrogène en sortie. Ainsi, la loi de Faraday n'est pas suffisante et la réponse électrique de la cellule d'électrolyse doit être décrite. La réponse électrique de la cellule d'électrolyse peut être soit considérée comme statique ou dynamique.

### ➤ Approche statique

La réponse d'une cellule d'électrolyse est relativement rapide. Et pour l'électrolyseur PEM, elle est encore plus rapide, soit de 50 ms [94]. Cet argument rend l'approche statique la plus répandue pour la modélisation électrochimique d'une cellule d'électrolyse. L'équilibre électrique des cellules est supposé être établi instantanément pour chaque pas de temps de la simulation. Donc Cette approche implique la description mathématique des caractéristiques courant-tension de la cellule de l'électrolyseur (et par extension de la pile), c'est-à-dire les courbes de polarisation. Cette caractéristique peut être décrite par les modèles analytiques ou par les modèles empiriques.

### ❖ Les modèles analytiques.

Les modèles analytiques constituent un outil satisfaisant pour évaluer l'effet des principales variables sur l'électrolyseur [70]. Ces modèles fournissent une description de la courbe de polarisation basée sur les lois physiques et impliquent des paramètres qui ont une signification physique. Le potentiel de la cellule est fonction du potentiel réversible (Erev), des surtensions

d'activation à l'anode ( $E_{act,ano}$ ) et à la cathode ( $E_{act,cat}$ ), des surtensions ohmiques ( $E_{ohm}$ ) et des surtensions de diffusion ( $E_{diff}$ ) tel que présentés par l'équation 2.20 [51].

$$E_{cell} = E_{rev} + E_{act,ano} + E_{act,cat} + E_{ohm} + E_{diff} \quad (2.20)$$

- **Le potentiel réversible**

Le potentiel réversible est le potentiel minimal à appliquer entre les deux électrodes d'une cellule d'électrolyse afin de faire produire la réaction de dissociation de l'eau. Il est donné par l'équation 2.21 [51].

$$E_{rev} = E_{rev}^{\circ} + \frac{R.T}{2F} \ln \left( \frac{P_{H_2} \cdot \sqrt{P_{O_2}}}{a_{H_2O}} \right) \quad (2.21)$$

, Le premier terme est le potentiel réversible dans les conditions standard ( $E_{rev}^{\circ}$ ) et le second décrit l'écart par rapport aux conditions standards d'exploitation.

Avec R la constante des gaz ;  $P_i$  la pression de l'espèce i puis  $a_i$  l'activité thermodynamique de l'espèce i. En considérant les gaz humides et que les pressions à l'anode et à la cathode sont égales, l'équation 2.21 peut se récrire suivant l'équation 2.22 [95-96].

$$E_{rev} = E_{rev}^{\circ} + \frac{R.T}{2F} \ln \left( \frac{1,5 \cdot (P - P_{H_2O})}{P_{H_2O}} \right) \quad (2.22)$$

La valeur du potentiel standard réversible à 298K vaut 1.229 V [97] et ce potentiel dépend de la température.

- **La Surtension d'activation**

Les surtensions d'activation proviennent de la cinétique des réactions électroniques de transfert de charge qui se produisent aux sites de réaction des électrodes [97]. En appliquant la théorie du complexe activé aux deux demi-réactions, l'équation de Butler-Volmer peut être établie (Equation 2.23).

$$I = I_{O,k} \left[ \frac{C_{PE}}{C_{PS}} \exp\left(\frac{\alpha_K \cdot Z \cdot F \cdot E_{act,k}}{RT}\right) - \frac{C_{RE}}{C_{RS}} \exp\left(-\frac{(1-\alpha_K) \cdot Z \cdot F \cdot E_{act,k}}{RT}\right) \right] \quad (2.23)$$

Où  $C_{PE}$ ,  $C_{PS}$  et  $C_{RE}$  représentent les différentes concentrations des produits (P) et des réactifs (R) respectivement près de l'électrode (E) et dans la solution (S).  $\alpha_K$  et  $I_{O,k}$ , représentent respectivement le coefficient de transfert de charge et la densité d'échange de courant de la demi-réaction se produisant à l'électrode K. Z est le nombre d'électrons impliqués dans la demi-réaction.

A partir de l'équation 2.23, la surtension d'activation peut s'exprimer en fonction d'autres paramètres en faisant certaines approximations : Tout d'abord, si l'on considère une symétrie dans les processus des transferts d'électrons où les charges seraient également distribuées, alors l'on considère le coefficient de transfert égal à 0.5 ; et l'on obtient l'équation 2.24.

$$E_{act,k} = \frac{RT}{F} \sin^{-1}\left(\frac{I}{2 \cdot I_{O,k}}\right) \quad (2.24)$$

### • La Surtension ohmique

La surtension ohmique est due à la conductivité infinie des cellules d'électrolyse. Les différentes sources de surtensions ohmiques sont : l'électrolyte, les électrodes, les plaques bipolaires, etc. il y a trois façons de considérer ces Surtensions ohmiques :

- La première contribution aux surtensions ohmiques et la plus importante provient de l'électrolyte. La première solution consiste à considérer la surtension ohmique due seulement à l'électrolyte en utilisant des corrélations empiriques pour déterminer sa conductivité selon les équations 2.25 – 2.27 [51].

- La deuxième solution consiste à considérer à la fois l'électrolyte et d'autres Conductivités des matériaux [98-104]. Cette approche est plus complexe car il s'agit de la caractérisation de chaque conductivité du composant en fonction des matériaux et des conditions de fonctionnement. Ainsi, les représentations du circuit électrique de la résistance l'ohmique sont construits afin de représenter avec précision les surtensions l'ohmique [101,105].

- La troisième solution consiste à ne considérer qu'une seule résistance équivalente pour la cellule représentée par un paramètre d'ajustement du modèle [99, 103–105,106]. Une corrélation empirique est utilisée pour déterminer la conductivité de Membrane échangeuse de protons ( $\sigma_{PEM}$ ) en fonction de la température (T) et la teneur en eau de la membrane ( $\lambda$ ) (Eq.(2.27) [51].

$$\sigma_{PEM} = (0.005139.\lambda - 0.0326 \left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right]) \quad (2.25)$$

$$\sigma_{alkalin} = -2.04.m - 0.0028.m^2 + 0.005332.m.T + 207.2.\frac{m}{T} + 0.001043m^3 - 0.000000m^2.T^2 \quad (2.26)$$

$$\sigma_{alkalin} = -2.96396 - 0.02371.T + 0.12269w + (5.7e - 5)T^2 + 0.02371.T + (4.7e - 4) - (3.6e - 8)T^2 + (2.7e - 6)w^2 - (8.9e - 6)T.w^2 + (2.4e - 7)T^2.w \quad (2.27)$$

- **Surtension de diffusion**

Le phénomène de surtension de diffusion intervient pour les densités de courant élevées, dans ce cas, La réaction n'est plus contrôlée par transfert électronique mais plutôt par le transfert de matière. Le potentiel de diffusion peut être estimé à l'aide de l'équation de Nernst comme indiqué dans **Marangio, Santerelli et al (2009)** suivant l'équation 2.28

$$E_{Diff} = \frac{RT}{nF} \ln \frac{C}{C_0} \quad (2.28)$$

Où  $C_i$  est la concentration d'oxygène ou d'hydrogène à l'interface membrane-électrode,  $C_0$  est leur concentration de référence. Cette équation peut s'appliquer à la cathode comme à l'anode.

- ❖ **Modèles empiriques et semi-empiriques**

En dehors de l'approche analytique de la modélisation statique de la réponse électrochimique d'une cellule d'électrolyse, il existe aussi des modèles empiriques et sémi-

empiriques pour cette modélisation. Ces modèles permettent de prédire le comportement de l'électrolyseur en fonction des conditions de fonctionnement (comme la pression, la température) et fournissent une description mathématique de la courbe de polarisation avec des paramètres empiriquement ajustés qui n'ont nécessairement une signification physique [107-109]. Il est vrai que leurs structures sont presque identiques à celle des modèles analytiques, le non-sens de leurs paramètres fait d'eux des modèles empiriques. Le plus connu de ces modèles est celui développé par Ulleberg [106,110]. Il permet de prendre en compte les impacts de la température sur les caractéristiques courant-tension de la cellule en ajustant plusieurs paramètres suivant l'équation 2.29.

$$E_{cell} = E + (r_1 + r_1 \cdot T) \cdot J + S \cdot \log \left[ \left( t_1 + \frac{t_2}{T} + \frac{t_3}{T^2} \right) \cdot T + 1 \right] \quad (2.29)$$

Avec  $J$  la densité de courant,  $E$ ,  $r_1$ ,  $t_1$  et  $s$  les paramètres d'ajustement. Plusieurs modèles dans le même sens sont développés et diffèrent d'un type d'électrolyseur à un autre (électrolyseur PEM ou de type alcalin).

Le principal inconvénient de ces modèles est que, généralement, leur application est limitée à la forme de conditions de fonctionnement étudiés et pour une conception d'électrolyseur spécifique [70].

### ➤ Approche dynamique

Il est vrai que la réponse électrique d'une cellule d'électrolyse est très rapide mais elle n'est pas instantanée à cause des phénomènes de stockage interne tels que : la limitation et l'accumulation de la diffusion des espèces et la capacité à double couche [111, 112, 113].

Le principe de cette approche de modélisation consiste à décrire les cellules d'électrolyse à travers un circuit électrique équivalent et à ajuster les paramètres d'impédance afin de reproduire le comportement électrique de la cellule. Ces modèles sont utiles pour l'étude de l'impédance globale de la cellule et pour permettre le lien entre phénomènes internes et irréversibles (diffusion des espèces, double capacitance de couche, etc...) à leur impact sur la réponse électrique. En outre ce type de modèles permet d'étudier le couplage des piles d'électrolyse avec des convertisseurs.

### ✚ Modélisation électrique

Le système d'électrolyse utilise des équipements électriques comme le convertisseur qui doit être modélisé. Chaque système d'électrolyse est équipé de convertisseurs afin d'adapter le courant d'entrée aux caractéristiques U-I de la ou des cheminées et autres équipements électriques. Une modélisation statique ou dynamique peut être appliquée à ces modèles électriques.

L'approche statique consiste à évaluer le rendement du convertisseur, permettant de décrire avec précision la consommation électrique du système d'électrolyse. Certains modèles utilisés dans certaines études [114, 115] permettent d'évaluer cette efficacité sur toute la plage de fonctionnement suivant l'équation 2.30.

$$\eta = \frac{P_S/P_{nom}}{\frac{P_S}{P_{nom}} + \eta_0 + m \cdot (P_S/P_{nom})^2} \quad (2.30)$$

Tel que :

$$\eta_0 = \frac{\frac{10}{\eta_{10}} + \frac{1}{\eta_{100}} - 9}{99}$$

$$m = \frac{1}{\eta_{10}} - \eta_0 - 1$$

Avec  $P_S$ , la puissance de sortie du convertisseur modélisé,  $P_{nom}$  la valeur de sa puissance nominale,  $\eta_{100}$  son rendement à la puissance nominale,  $\eta_{10}$  son rendement à 10% de sa puissance nominale.

L'approche dynamique de la modélisation électrique du convertisseur quant à elle permet de décrire le comportement dynamique des convertisseurs afin d'étudier leur couplage avec les empilements d'électrolyse qui jouent le rôle important dans le pilotage des systèmes d'électrolyse.

### ✚ Modélisation thermique

La prise en compte des effets thermiques dans le développement des modèles d'électrolyse est indispensable car il permet de décrire la répartition de la température dans la cellule et son impact.

L'activation, la diffusion ionique et électronique puis le transfert de masse sont activés thermiquement. Par ailleurs, la température a un impact bénéfique sur le potentiel réversible et donc sur la tension globale de la cellule [106, 107]. L'importance de la température sur la cellule est mise en évidence dans la plupart des modèles électrochimiques cités ci-dessus.

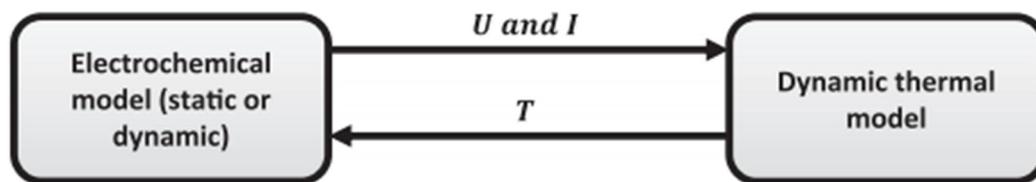


Figure 37: Couplage de modèles thermiques et électrochimiques [51]

Une brève revue de la littérature sur la modélisation de l'électrolyseur nous a permis de modéliser à juste titre le sous-système électrolyseur de notre système.

La représentation schématique d'un électrolyseur à membrane échangeuse de protons (PEM) illustrée à la figure 38 [108] où les moles d'eau, d'hydrogène et d'oxygène circulant dans la membrane sont symbolisées par  $N_{H_2O,m}$ ,  $N_{H_2,m}$  et  $N_{O_2,m}$ , a permis d'évaluer l'équilibre molaire respectivement à l'anode et à la cathode.

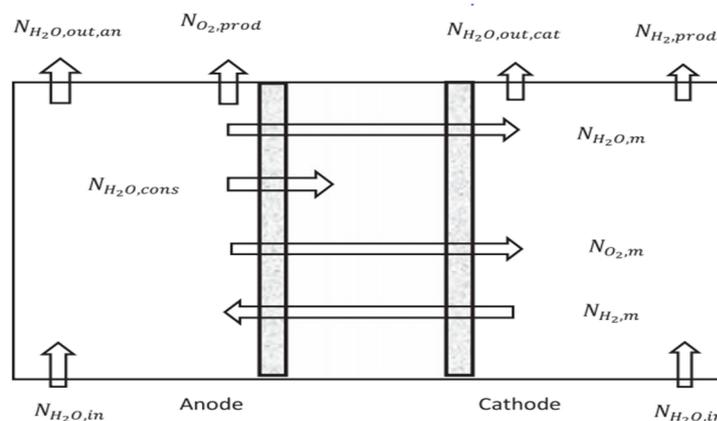


Figure 38: Représentation schématique d'un électrolyseur PEM [108]

Dans un milieu acide, cette réaction se produit par deux réactions (équations 2.31 et 2.32) :



Le bilan molaire donné par l'équation 2.34 est déduit de l'équation 2.33.

$$\frac{dN_{H_2}}{dt} = \frac{dN_{H_2O}}{dt} = 2 \frac{dN_{O_2}}{dt} \quad (2.34)$$

L'équilibre molaire respectivement à l'anode et à la cathode est donc évalué par les équations 2.35 et 2.36.

A l'anode on a :

$$\begin{cases} \frac{dN_{O_2}}{dt} = N_{O_2,in} - N_{O_2,out} + N_{O_2,Prod} \\ \frac{dN_{H_2O}}{dt} = N_{H_2O,in} - N_{H_2O,out} - N_{H_2O,m} \end{cases} \quad (2.35)$$

Et à la Cathode on a :

$$\begin{cases} \frac{dN_{H_2}}{dt} = N_{H_2,in} - N_{H_2,out} + N_{H_2,Prod} \\ \frac{dN_{H_2O}}{dt} = N_{H_2O,in} - N_{H_2O,out} + N_{H_2O,m} \end{cases} \quad (2.36)$$

Thomas Springer et al simplifient l'équation 2.20 présentée dans la littérature en prenant nul le potentiel de diffusion et en nommant Erev comme potentiel de Nernst. Ceci permet d'évaluer facilement la tension appliquée aux bornes de chaque cellule de l'électrolyseur à travers l'équation 2.37 [119].

$$U_{elz} = U_{Nernst} + U_{\eta_{act}} + U_{\eta_{ohm}} \quad (3.37)$$

La tension en circuit ouvert  $U_{Nernst}$  est déterminée au moyen de l'équation de Nernst (equation 2.38). Cette équation prend en compte la corrélation empirique du potentiel standard  $E_{rev}^{\circ}$  utilisée dans plusieurs travaux [113, 120].

$$U_{Nernst} = 1.229 - 8.46 \times 10^{-4}(T_{cell} - 298) + \frac{RT_{cell}}{2F} \ln(p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}) \quad (2.38)$$

$$U_{\eta_{act}} \eta_{act} = \frac{RT_{an}}{\alpha_{an} F} \ln\left(\frac{i}{i_{0,an}}\right) + \frac{RT_{ca}}{\alpha_{ca} F} \ln\left(\frac{i}{i_{0,ca}}\right) \quad (2.39)$$

La tension appliquée à chaque cellule d'électrolyseur est modélisée à l'aide du modèle I-U dépendant de la température proposée par Ulleberg et donnée dans l'équation 2.40 [129]:

$$U_{elz} = U_{rev} + r(T) \cdot I_{elz} + s \log(t(T) I_{elz} + 1) \quad (2.40)$$

Avec :

$$r(T) = \frac{r_1 + r_2 T}{a} I_{elz}$$

$$t(T) = \frac{t_1 + t_2/T + t_3/T^2}{a} I_{elz} + 1$$

$$U_{rev} = \frac{\Delta H - T \Delta S}{2F} \quad (2.41)$$

Avec  $\Delta H$  l'énergie totale requise par la réaction d'électrolyse, et  $T \Delta S$  est l'irréversibilité thermique.

$$U_{\eta_{ohm}} = \left( \frac{\delta_m}{(0.00514\lambda - 0.00326) \exp\left(1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{cell}}\right)\right)} + R_{ele} \right) i \quad (2.42)$$

Dans les équations ci-dessus,  $i$  est la densité de courant,  $F$  est la constante de Faraday,  $T_{cell}$  est la température de l'électrolyseur,  $\lambda$  est la teneur en eau de la membrane et  $\delta m$  l'épaisseur du matériau utilisé [122].

Le premier électrolyseur (ELZ1) est dimensionné pour répondre à la demande d'oxygène médical. La loi de Faraday est utilisée pour relier le débit d'oxygène, d'hydrogène et le courant d'électrolyse comme indiqué dans les équations 2.43 et 2.44.

$$\frac{dV_{O_2}}{dt} = \frac{N_{elz} I_{elz} \eta F}{N_{stO_2} F} V_{m_{O_2}} \quad (2.43)$$

$$\frac{dV_{H_2}}{dt} = \frac{N_{elz} I_{elz} \eta F}{N_{stH_2} F} V_{m_{H_2}} \quad (2.44)$$

Connaissant le nombre de cellules de l'électrolyseur  $N_{elz}$ , la puissance du premier électrolyseur est calculée au moyen de l'équation 2.45.

$$P_{ELZ1} = U_{elz} \times N_{elz} \times I_{elz} \quad (2.45)$$

Le deuxième électrolyseur (ELZ2) est dimensionné pour gérer autant que possible l'excès de puissance de sortie du système PV. La puissance du deuxième électrolyseur est calculée à partir de la puissance excédentaire maximale théorique possible définie comme la différence entre la puissance installée du PV ( $P_{PV}$ ), la puissance du premier électrolyseur ( $P_{ELZ1}$ ) et la charge électrique minimale  $P_{PL}^{min}$  suivant l'équation 2.46.

$$P_{elz2} = \eta (P_{PV} - P_{PL}^{min} - P_{ELZ1}) = U_{cell} \times N_{elz2} \times I_{elz2} \quad (2.46)$$

Où  $\eta$  est un paramètre variant de 0,5 à 1,  $I_{elz}$  est le courant de l'électrolyseur.

### 2.2.3. Sous système pile à combustible

La pile à combustible PEM est décrite à l'aide du modèle inverse de l'électrolyseur [106]. La tension de la pile à combustible est calculée sur la base des chutes de tension associées à toutes les pertes comme suit :

$$U_{fc} = U_{OC} - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{con} \quad (2.47)$$

La pile à combustible est dimensionnée avec l'objectif de répondre à la demande de charge de pointe ( $(P_{PL}^{max})$ ) dans les cas critiques correspondant à l'absence de rayonnement solaire. La puissance de la pile à combustible est calculée comme dans l'équation 2.48.

$$P_{fc} = P_{PL}^{max} + P_{ELZ1} \quad (2.48)$$

Le courant de la pile à combustible est lié à la consommation nominale d'hydrogène et d'oxygène en utilisant la loi de Faraday telle que rapportée dans les équations 2.49 et 2.50.

$$\frac{dV_{O_2,cons}}{dt} = \frac{N_{fc} I_{fc} \eta_F}{N_{stO_2} F} V_{m_{O_2}} \quad (2.49)$$

$$\frac{dV_{H_2,cons}}{dt} = \frac{N_{fc} I_{fc} \eta_F}{N_{stH_2} F} V_{m_{H_2}} \quad (2.50)$$

### 2.3 Stockage de l'hydrogène et de l'oxygène

La variation du niveau d'hydrogène et d'oxygène dans le récipient de stockage est modélisée à l'aide des équations 2.51 et 2.52 :

$$Stock_{H_2}(t) = Stock_{H_2}(t-1) + \int_0^t (V_{H_2,ELZ,tank}(\tau) - V_{H_2,tank,FC}(\tau)) d\tau \quad (2.51)$$

$$Stock_{O_2}(t) = Stock_{O_2}(t-1) + \int_0^t (V_{O_2,ELZ,tank}(\tau) - V_{O_2,tank,FC}(\tau)) d\tau \quad (2.52)$$

### 2.4 Approche de gestion de l'énergie

L'utilisation d'éléments de stockage et de stratégies de gestion permet de garantir l'équilibre entre la production et la demande. On suppose que l'électrolyseur ne peut fonctionner qu'à un niveau de puissance minimal. La puissance nette disponible à tout moment est indiquée à l'équation 2.53.

$$P_{net} = P_{PV} - P_{PL} - P_{ELZ1} \quad (2.53)$$

$P_{net}$  serait positif, négatif ou nul au cours de la journée en fonction des conditions météorologiques et de la demande de la charge. Le système fonctionnera selon trois régimes nécessitant l'activation ou la désactivation des électrolyseurs et de la pile à combustible.

**Cas 1 :** la puissance de sortie du système photovoltaïque correspond à la demande de la charge prioritaire et à la demande d'énergie du premier électrolyseur telle que représentée à l'équation 2.54.

$$if (P_{net} = 0) \text{ then } (P_{FC} = 0, P_{ELZ2} = 0, P_{ELZ} = 1, P_{PL} = 1) \quad (2.54)$$

**Cas 2 :** la puissance de sortie du système PV est supérieure à la puissance requise par la charge prioritaire et la charge du premier électrolyseur. Si la puissance nette disponible est supérieure à la puissance nominale du deuxième électrolyseur, deux sous-cas sont possibles :

**Sous-cas 1 :** le volume d'hydrogène dans le réservoir est inférieur au niveau maximal.

$$if (P_{net} > P_{RatELZ2}) \text{ and } (V_{H2_{tank}} < V_{H2_{max}}) \text{ then} \quad (2.55) \\ (P_{FC}=0, P_{ELZ_2}=1, P_{ELZ_1}=1, P_{PL}=1)$$

Le deuxième électrolyseur est ensuite activé pour convertir l'excès de puissance en hydrogène et en oxygène.

**Sous-cas 2 :** le volume d'hydrogène dans le réservoir est supérieur ou égal au niveau maximal.

$$if (P_{net} > P_{RatELZ2}) \text{ and } (V_{H2_{tank}} = V_{H2_{max}}) \text{ and } (V_{O2_{tank}} = V_{O2_{max}}) \text{ then} \quad (2.56) \\ (P_{FC}=0, P_{ELZ_2}=0, P_{ELZ_1}=0, P_{PL}=1)$$

Dans ce cas, le champ PV reste utile seulement à la charge de l'hôpital.

**Cas 3 :** la puissance de sortie du système PV n'est pas suffisante pour satisfaire à l'exigence de charge prioritaire de l'électrolyseur 1, comme indiqué à l'équation 2.57.

$$if (P_{net} < 0) \text{ and } (V_{H2_{min}} < V_{H2_{tank}} < V_{H2_{max}}) \text{ then} \quad (2.57) \\ (P_{FC}=1, P_{ELZ_2}=0, P_{ELZ_1}=1, P_{PL}=1)$$

Dans ce cas, la pile à combustible est actionnée pour alimenter le buss qui va par la suite alimenter à nouveau le premier électrolyseur et la charge de l'hôpital.

## 2.5 Analyse économique

En tenant compte de la taille appropriée de chaque composant, la valeur actualisée nette (NPV) est calculée pour faire une évaluation économique du système proposé. Le rôle principal de cette mesure financière est de confirmer la rentabilité financière d'un investissement sur une période de vie, en examinant les entrées de fonds nettes actualisées et les sorties de fonds actualisées qu'un projet génère au cours de son cycle de vie et en les convertissant en une seule NPV. Suite aux études menées par Squadrito et al [123] et par Kuckshinrichs et al [124], les expressions de cette métrique économique peuvent être formulées mathématiquement à travers les équations 2.58 et 2.59.

Les revenus potentiels du système peuvent d'abord provenir des dépenses liées à l'indépendance énergétique qu'apporte ce système du fait de l'évitement du paiement des factures d'électricité. Les charges hospitalières sont alimentées par l'électricité directement fournie par la centrale photovoltaïque ou produite par la pile à combustible par la combustion de l'hydrogène stocké. Les deuxièmes revenus du système proviennent des dépenses évitées associées à la commande ou à l'importation d'oxygène médical. Avec le système proposé, l'électricité et l'oxygène requis par l'hôpital sont produits sur le site par le PV, les électrolyseurs et le composant de secours associé. Par conséquent, l'expression de la NPV rapportée par Squadrito et al [123] a été légèrement adaptée en tenant compte des résultats du système proposé.

$$NPV = -CAPEX_S + (1 - TR) \sum_{n=1}^N \frac{REV_n - OPEX_n^S}{(1 + r)^n} \quad (2.58)$$

$$\sum_{n=1}^N \frac{REV_n}{(1 + r)^n} = \sum_{n=1}^N \frac{M_{O_2}(1 - SDR)^n}{(1 + r)^n} C_{ost}^{O_2} + \sum_{n=1}^N \frac{E_{kWh}(1 - SDR)^n}{(1 + r)^n} C_{ost}^{kWh} \quad (2.59)$$

Les coûts  $CAPEX_S$  et  $OPEX_n^S$  pour tous les composants du système sont donnés par les relations 2.60 et 2.61.

$$CAPEX_S = CAPEX_{PV} + CAPEX_{elz} + CAPEX_{FC} + CAPEX_{TK} + CAPEX_{CP} \quad (2.60)$$

$$OPEX_n^S = OPEX_n^{PV} + OPEX_n^{elz} + OPEX_n^{FC} + OPEX_n^{TK} + OPEX_n^{CP} \quad (2.61)$$

Où  $r$  est le taux d'actualisation,  $M_{O_2}$  est la quantité d'oxygène en termes de masse obtenue par an,  $SRD$  est le taux de dégradation,  $C_{ost}^{kWh}$  est le coût de l'électricité sur le marché,  $C_{ost}^{O_2}$  est le

coût de l'oxygène sur marché,  $REV_n$  sont les revenus liés à la vente d'oxygène et d'électricité, CAPEX est le coût de dépense en capital, Les dépenses d'exploitation sont les dépenses opérationnelles.

La figure 39 présente l'organigramme de gestion optimale du système PV/électrolyseur/pile à combustible dans le cas de cette étude.

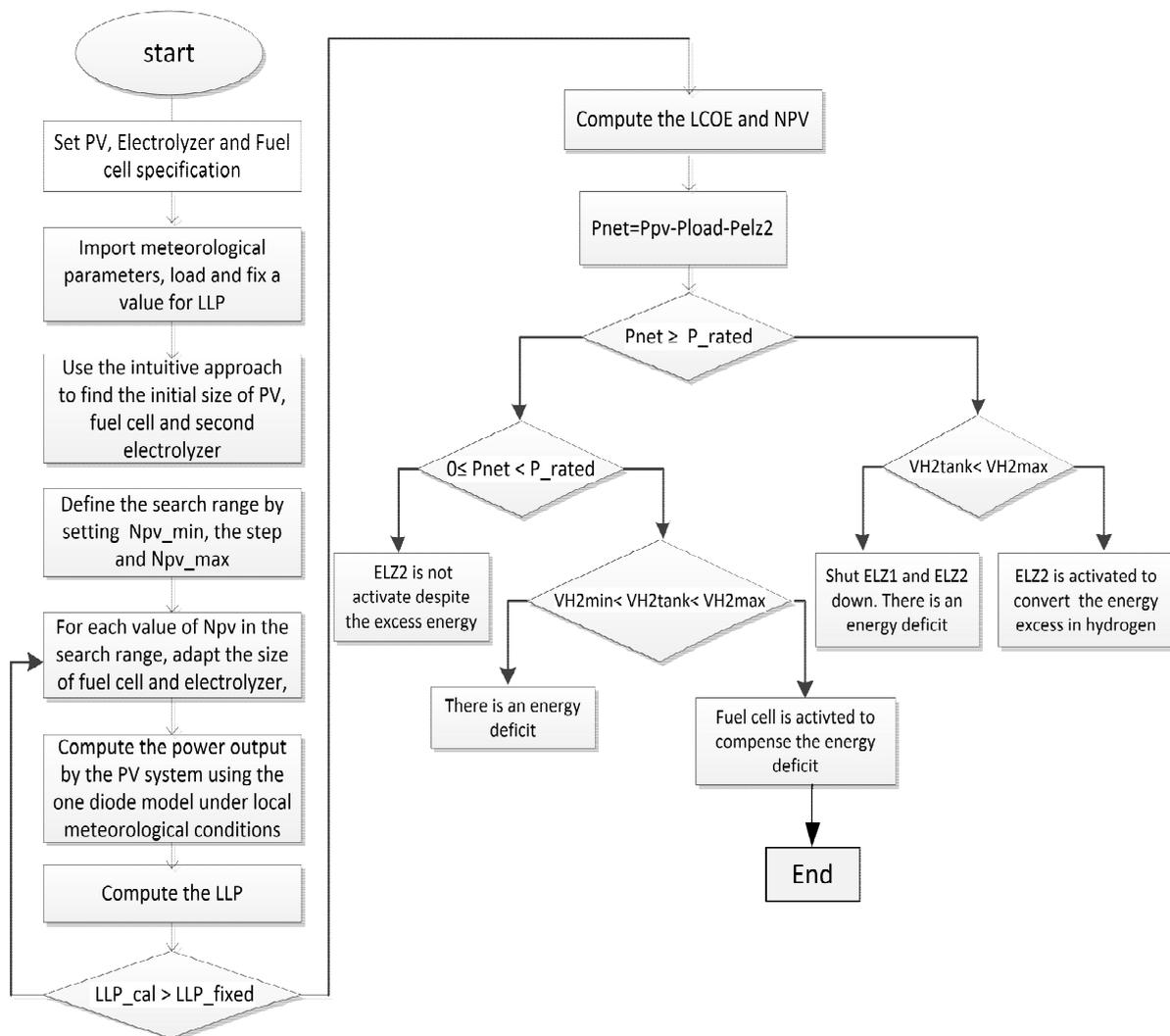


Figure 39: Organigramme de gestion optimale du système PV/électrolyseur/pile à combustible

## Conclusion

Dans ce chapitre, il était question de dimensionner et de modéliser le système de production d'électricité solaire et d'oxygène médical sur site dédié à un hôpital non raccordé au réseau. Après une brève revue sur la modélisation du système PV, de l'électrolyseur et de la pile à combustible, le modèle à une diode est celui que nous avons choisi pour modéliser le champ solaire PV de notre système. Les approches hybride et la simulation MATLAB de la fonction de Lambert ont été utilisées pour la résolution de l'équation qui régit ce modèle. Le bilan molaire dans l'électrolyseur a été évalué à partir des équations aux électrodes de l'électrolyseur. La tension appliquée à chaque cellule de l'électrolyseur a été déterminée et la loi de Faraday a permis d'évaluer le débit d'oxygène et d'hydrogène en fonction du courant de l'électrolyseur permettant par la suite de calculer la puissance de l'électrolyseur à utiliser et de déduire celle de la pile à combustible. Les débits d'oxygène et d'hydrogène consommés ont été évalués et une approche de gestion de l'énergie du système a été proposée. Une analyse économique du système au moyen du NPV a été faite afin de vérifier la soutenabilité de l'investissement du projet sur sa période de vie. Les différentes simulations et les résultats obtenus sont présentés au chapitre suivant.

## CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

### Introduction

Après avoir présenté dans le chapitre précédent, le matériel et la méthode utilisés pour répondre à la question de notre recherche, Le présent chapitre simule, analyse et interprète les résultats obtenus. Ces résultats présentent dans un premier temps les variables météorologiques de la zone d'étude pour vérifier si cette zone permet l'exploitation des ressources solaires pour la réalisation de notre système. Ces résultats porteront dans un deuxième temps sur la production de l'électricité et d'oxygène médical. L'analyse de cette productivité permettra d'évaluer l'efficacité du système. En fin, nous présenterons les résultats de l'étude économique du système à travers le NPV qui permettra d'évaluer la rentabilité du système sur sa période de vie.

### 3.1 Ressources et variables météorologiques d'entrée

Les données des variables météorologiques (irradiation solaire et température) utilisées pour les simulations sont fournies par le Système d'Information Géographique Photovoltaïque (PV-GIS). Les coordonnées géographiques du site choisi pour simuler la faisabilité du système proposé sont les suivantes : 9\_200N; 13\_230E; altitude 241 m. Le site situé dans une région tropicale est bien doté en rayonnement solaire pour une grande partie de l'année et l'irradiation quotidienne moyenne enregistrée est d'environ 5,8kWh/m<sup>2</sup>/jour. Les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel MATLAB et pour six cas différents à savoir : Une simulation horaire basée sur le pat temporel d'une seconde est d'abord effectuée pour des périodes ensoleillée et nuageuse de la journée. Deuxièmement une simulation journalière basée sur le pat horaire est réalisée pour les jours le plus ensoleillé et le moins ensoleillé de l'année. Troisièmement, une simulation mensuelle est effectuée pour les mois le plus ensoleillé et le moins ensoleillé de l'année. Les résultats de ces simulations sont représentés par les figures 40 ; 41 ; 42 ; 43.

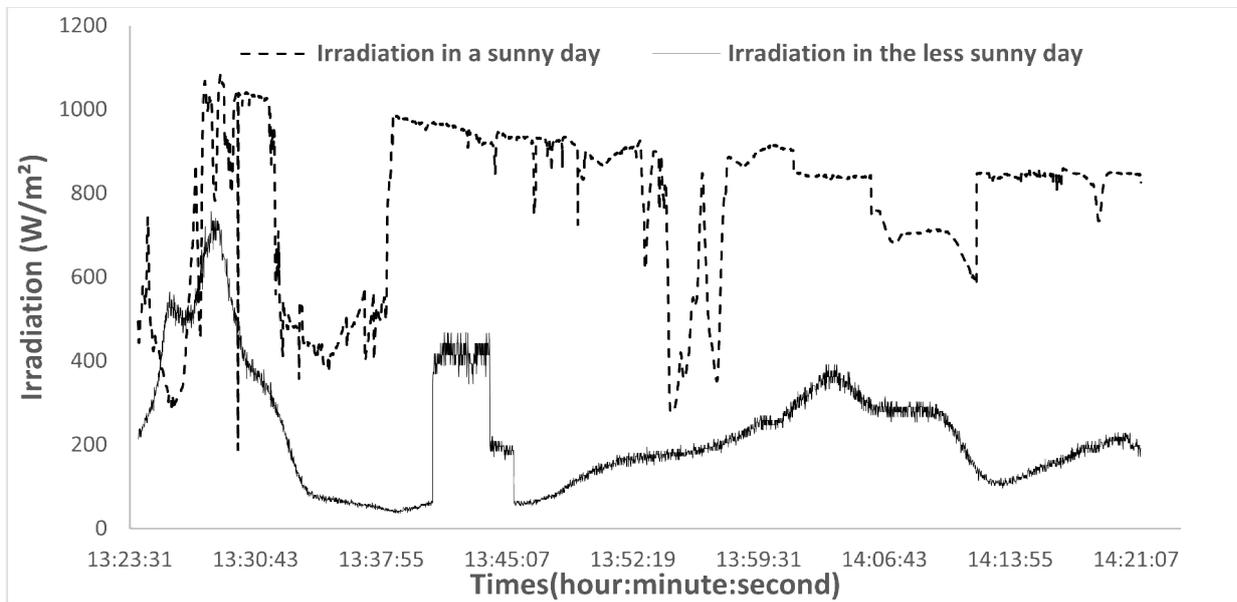


Figure 40: Evolution par seconde de l'irradiation dans la zone d'étude.

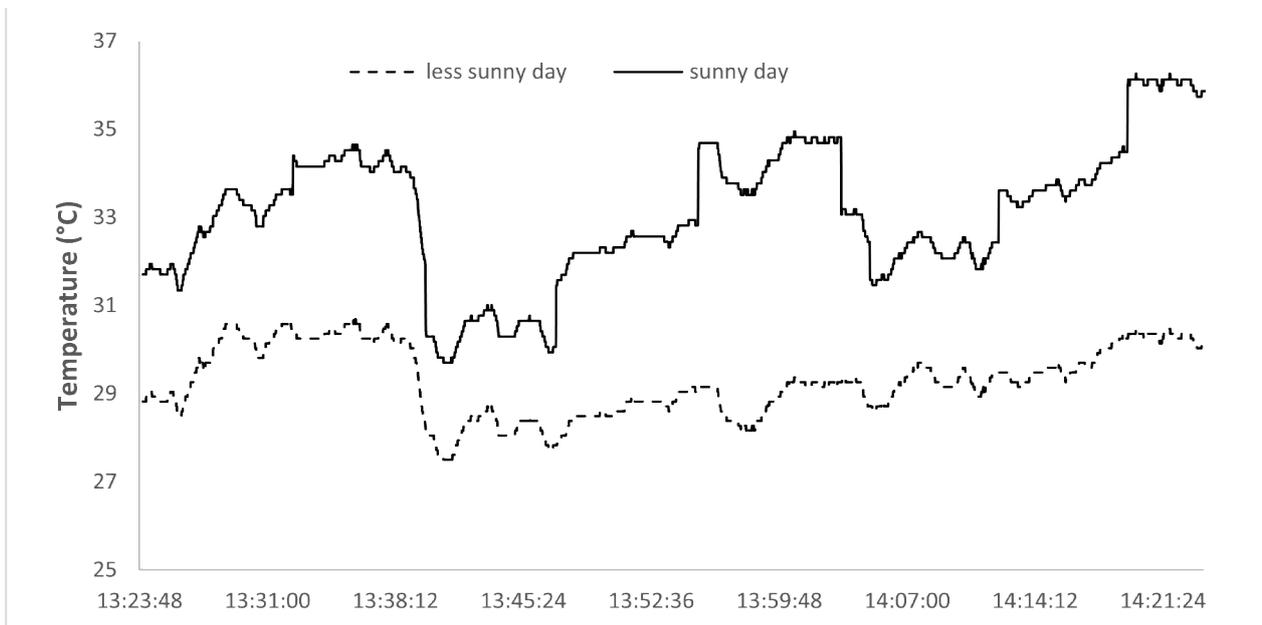


Figure 41: Evolution par seconde de la température dans la zone d'étude.

Les figures 40 et 41 montrent un écart très significatif de l'irradiation solaire et de la température entre les jours le plus ensoleillé et le moins ensoleillé de l'année respectivement. Ces résultats sont simulés sur un pat d'une seconde et pendant une heure de la journée où l'irradiation et la température sont maximales. Cette simulation permet de vérifier l'adaptation de l'électrolyseur à une intermittence à pat séré de l'énergie solaire. Durant cette heure, l'irradiation solaire et la température atteignent les valeurs de  $1200\text{W/m}^2$  et de  $35^\circ\text{C}$  respectivement pour le jour le plus ensoleillé.

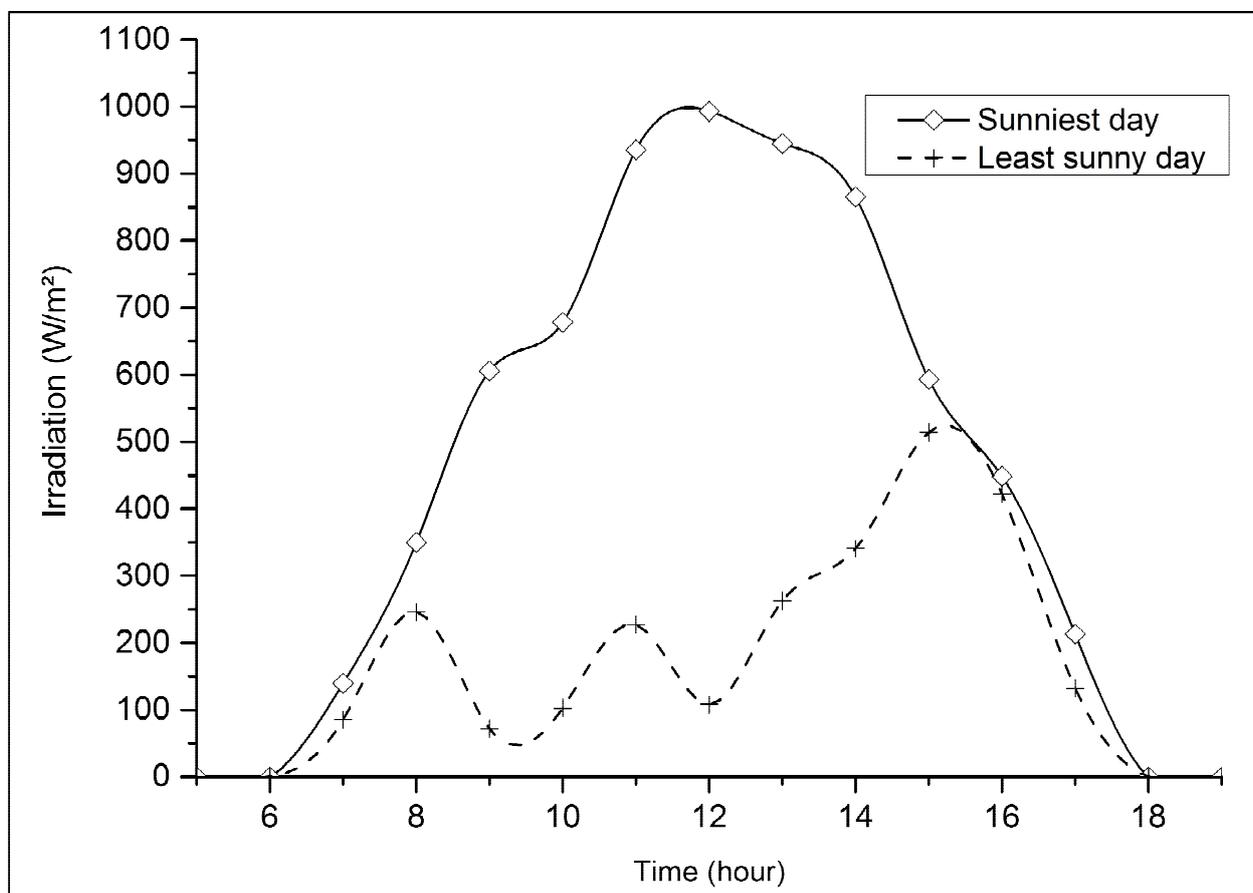


Figure 42: Evolution horaire de l'irradiation solaire pendant les jours le plus et moins ensoleillés de l'année.

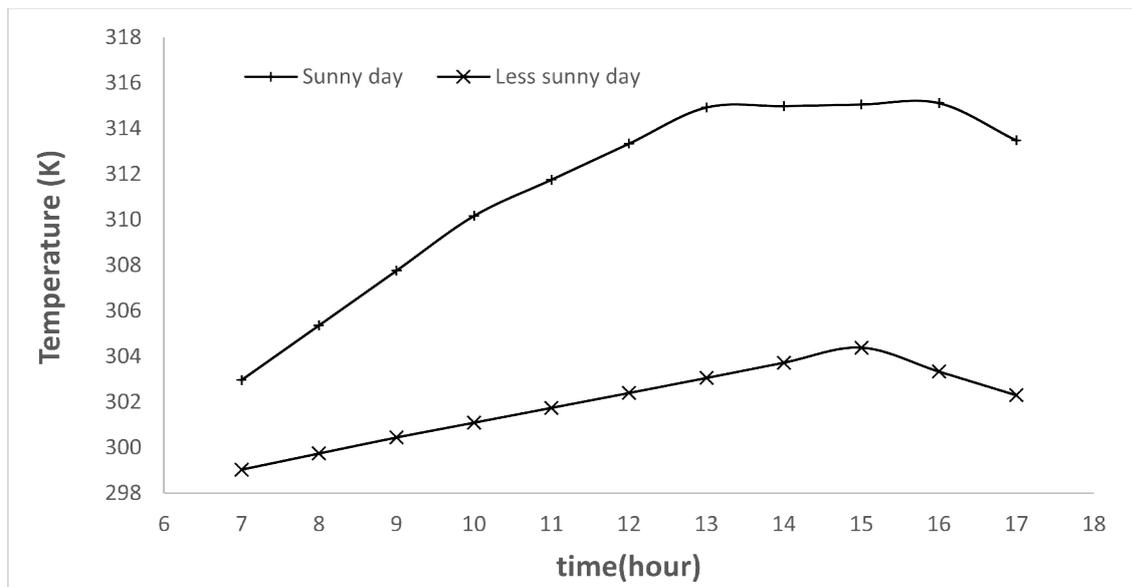


Figure 43: Evolutions horaire de la température pendant les jours le plus et moins ensoleillés de l'année.

Une évolution journalière de l'irradiation et de la température sont données par les figures 42 et 43 respectivement. L'on observe entre 6h et 18h les valeurs de  $G$  et de  $T$  qui atteignent les valeurs maximales de  $1000 \text{ W/m}^2$  et de  $500 \text{ W/m}^2$  respectivement pour l'irradiation pendant les jours le plus favorable et le moins favorable de l'année ; et la température maximale de  $315 \text{ K}$  et de  $303 \text{ K}$  pour les jours le plus ensoleillé et le moins ensoleillé de l'année. Ces valeurs s'obtiennent autour de 12 h pour le jour le plus ensoleillé et 16h pour le jour le moins ensoleillé de l'année.

De l'analyse des résultats de simulation de ces variables météorologiques (irradiation solaire et température), l'on peut dire que la zone d'étude reste attrayante pour les applications photovoltaïques.

La plate-forme MATLAB permet de simuler les modèles du système et de ses composants. Les caractéristiques des composantes du système majeur sont résumées dans le tableau 2.

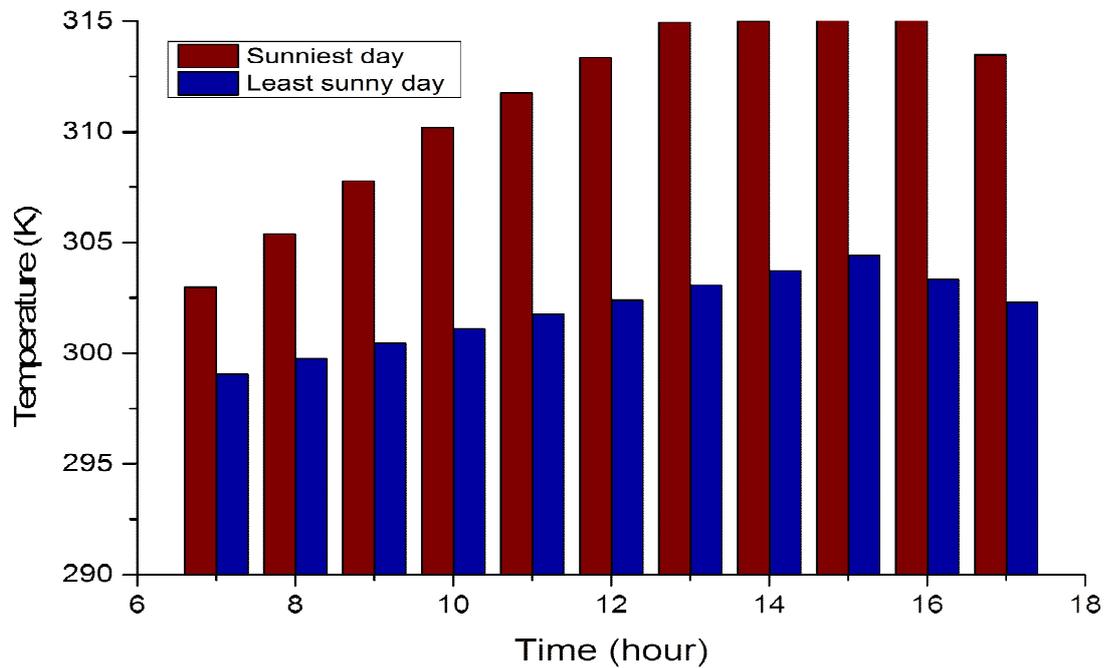


Figure 44: Moyennes horaires de la température pendant les jours le plus et moins ensoleillés de l'année.

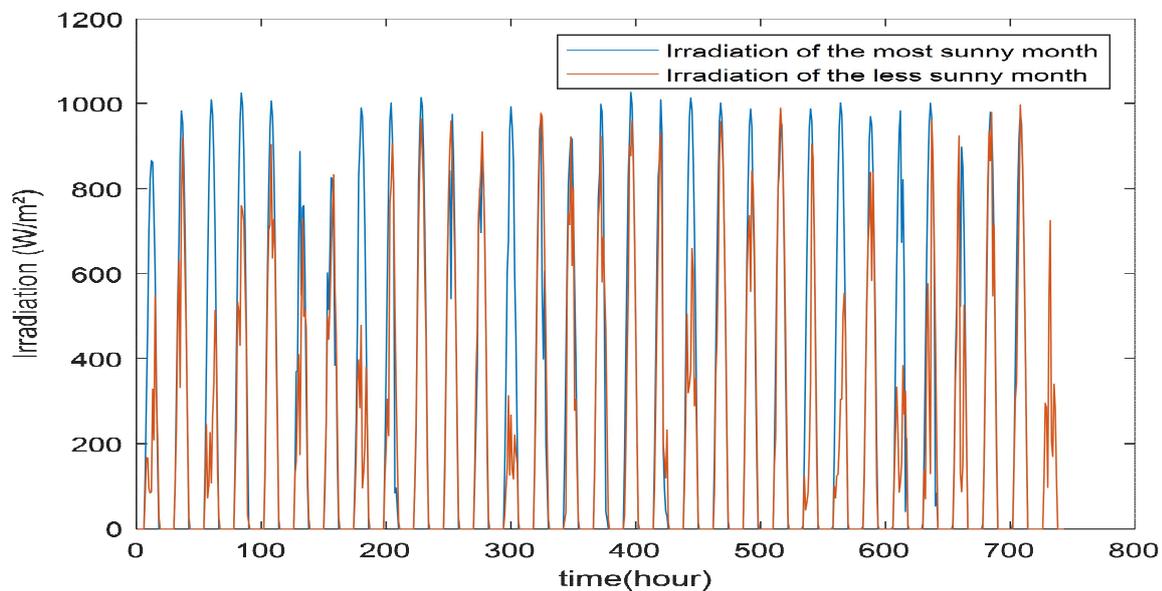


Figure 45: Evolution mensuelle de l'irradiation solaire pendant le mois le plus ensoleillé et le mois le moins ensoleillé de l'année.

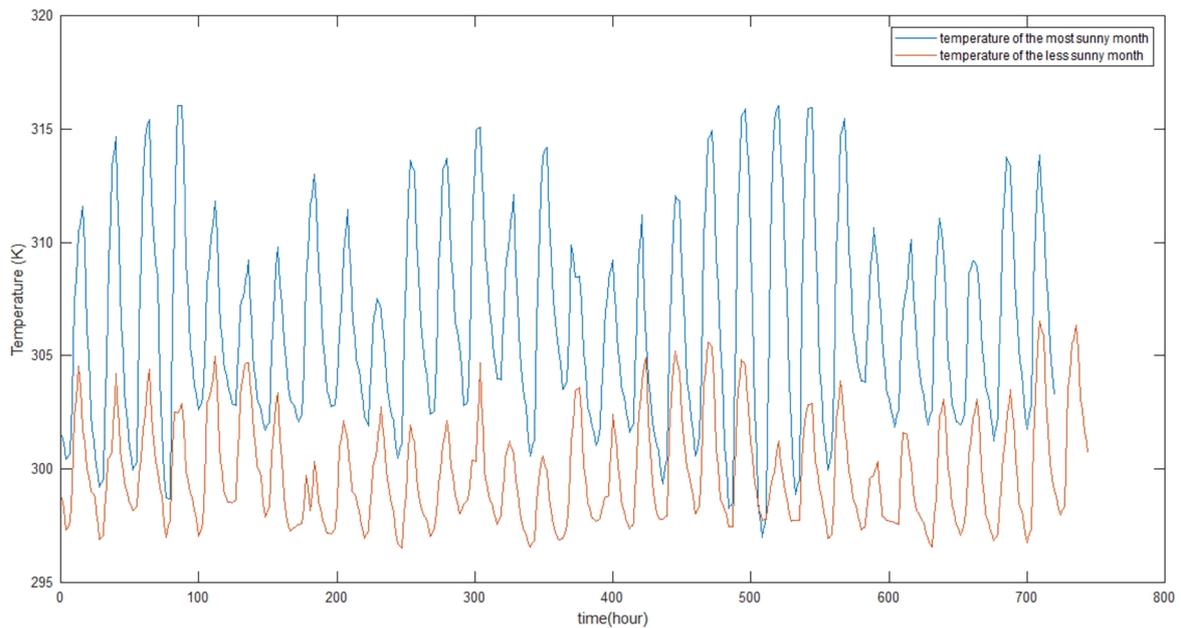


Figure 46: Evolution mensuelle de la température pendant le mois le plus ensoleillé et le mois le moins ensoleillé de l'année.

Tableau 4 : Caractéristiques électriques des composants majeurs du système.

Puissance du champ PV (W)	61236
Puissance du premier électrolyseur (W)	17525
Puissance du deuxième électrolyseur (W)	15000
Puissance de la pile à combustible (W)	36625

La charge électrique totale est composée de la charge hospitalière et de la puissance requise pour les réactions chimiques qui se produisent dans l'électrolyseur dimensionné pour répondre à la demande en oxygène de l'hôpital. L'évolution quotidienne de la puissance requise par chaque système est représentée à la figure 47.

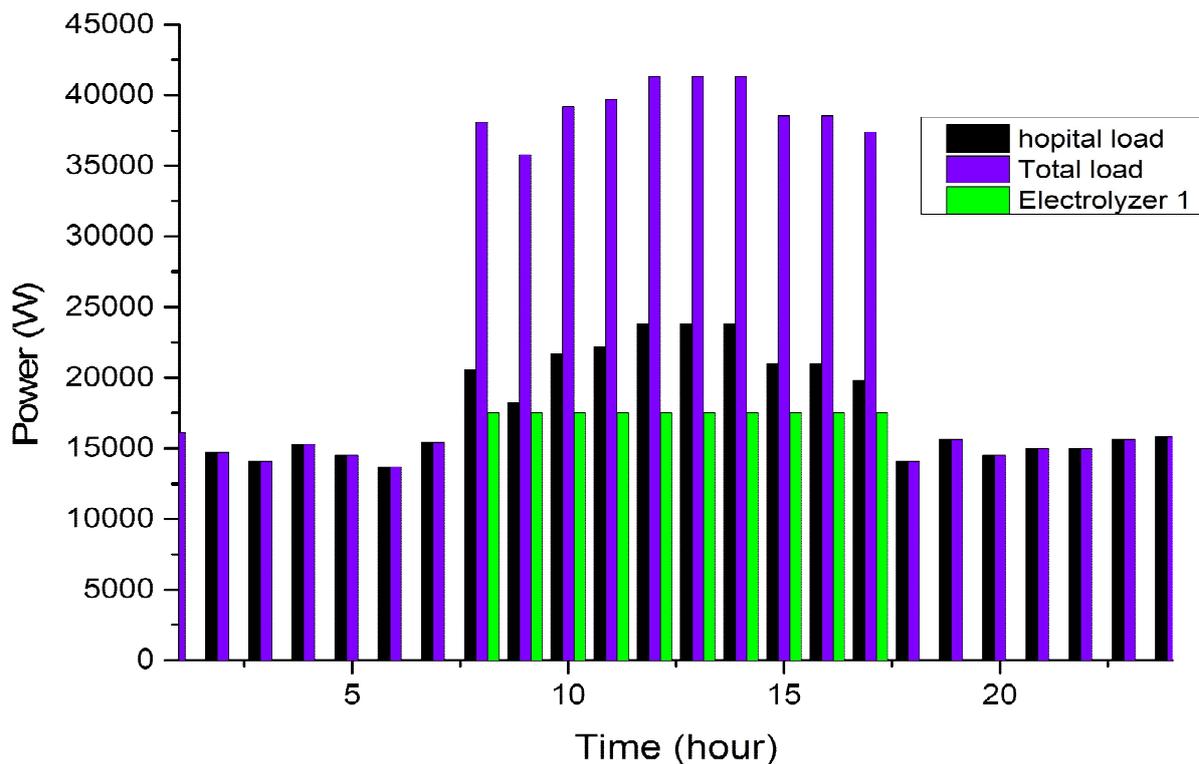


Figure 47: Evolution journalière de la demande en électricité pour l'hôpital et l'électrolyseur 1.

L'on observe que l'hôpital sollicite de l'énergie pendant toute la journée avec forte demande entre 8h et 16h avec un pic de 23KW vers 12h. Ce résultat s'explique par le fait que pendant cette période, les services hospitaliers sont sollicités au maximum par les usagers. L'électrolyseur quant à lui n'est sollicité qu'entre 8h et 16 h pour la production d'oxygène médical.

### 3.2. Les Effets de l'irradiation et de la température sur les caractéristiques du PV

Les caractéristiques du panneau photovoltaïque spécifiées par le constructeur au STC sont indiquées à l'annexe 1. Les figures 48 et 49 présentent une comparaison sur l'évolution des courbes caractéristiques P-V et I-V pour les deux méthodes de résolution de l'équation du modèle à une diode par la fonction de Lambert W tel que présenté dans le chapitre précédent à savoir : L'approche hybride et le processus itératif de W définie dans MATLAB.

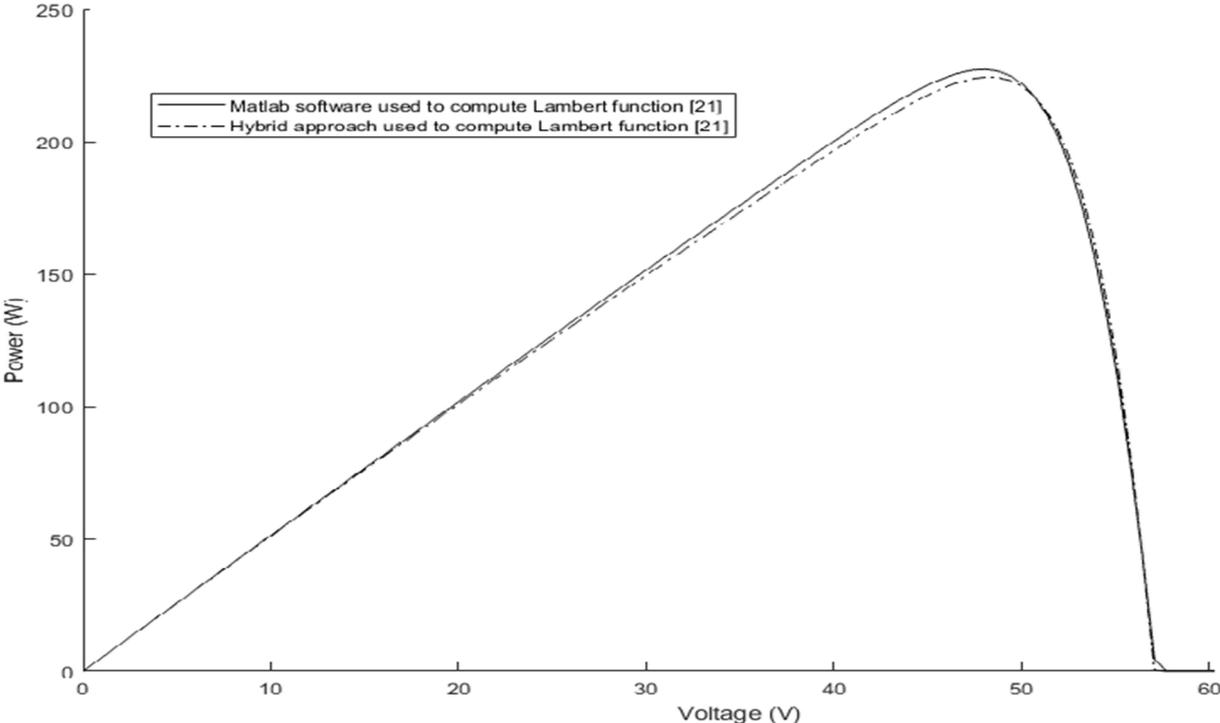


Figure 48: Comparaison des courbes P-V obtenues avec les approches hybrides et par le logiciel MATLAB de la fonction de Lambert.

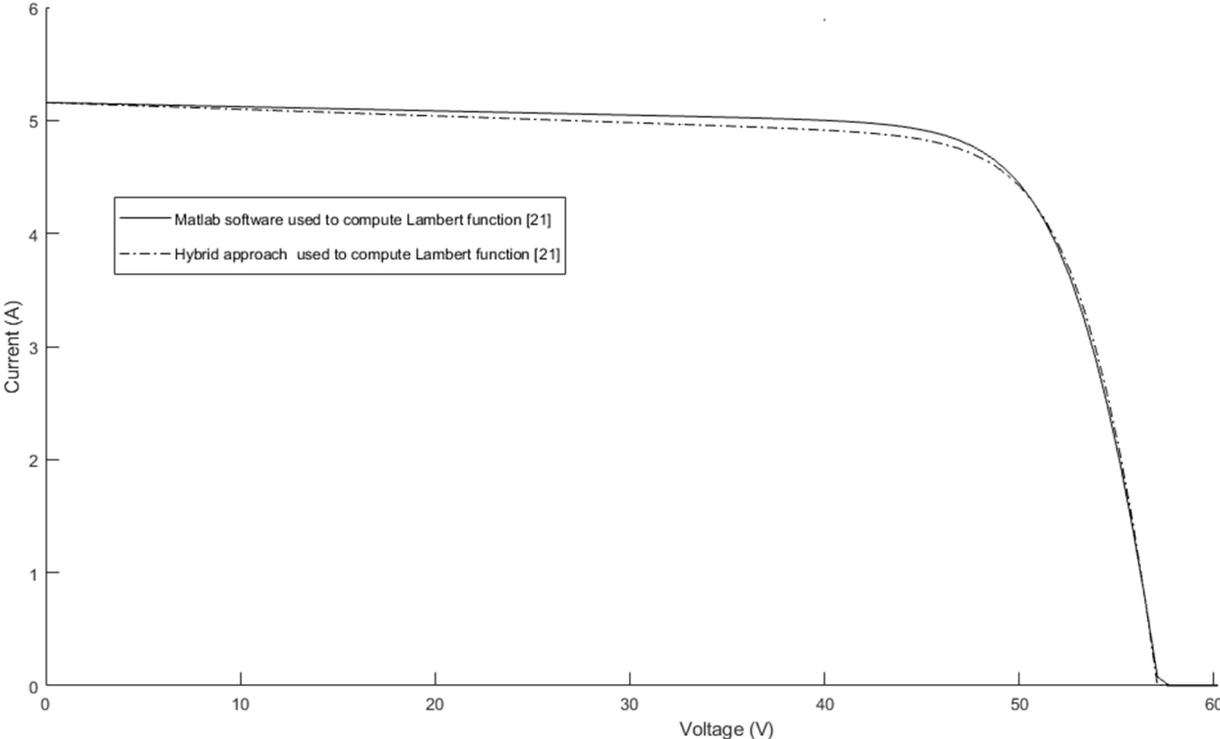


Figure 49: Comparaison des courbes I-V obtenues avec les approches hybrides et par le logiciel MATLAB de la fonction de Lambert

L'analyse des courbes obtenues dans les figures 46 et 47 montrent une grande corrélation entre les deux méthodes utilisées. Ce qui justifie dans la suite le choix d'une seule méthode pour étendre cette étude sur les impacts de la variation de l'irradiation solaire et de la température sur les performances PV. La fonction de Lambert définie dans le logiciel MATLAB est donc utilisée à cet effet. Les courbes obtenues sont présentées dans les figures 50 et 51.

L'analyse des courbes des figures 50 et 51 ressort que les performances PV sont affectées par le rayonnement solaire et l'évolution de la température au cours de la journée. L'augmentation de la température entraîne une baisse significative de la tension et de la puissance produite par le parc photovoltaïque. En ce qui concerne l'évolution du rayonnement solaire, il est évident que son évolution positive affecte favorablement le courant de court-circuit et ensuite la puissance produite par le système PV

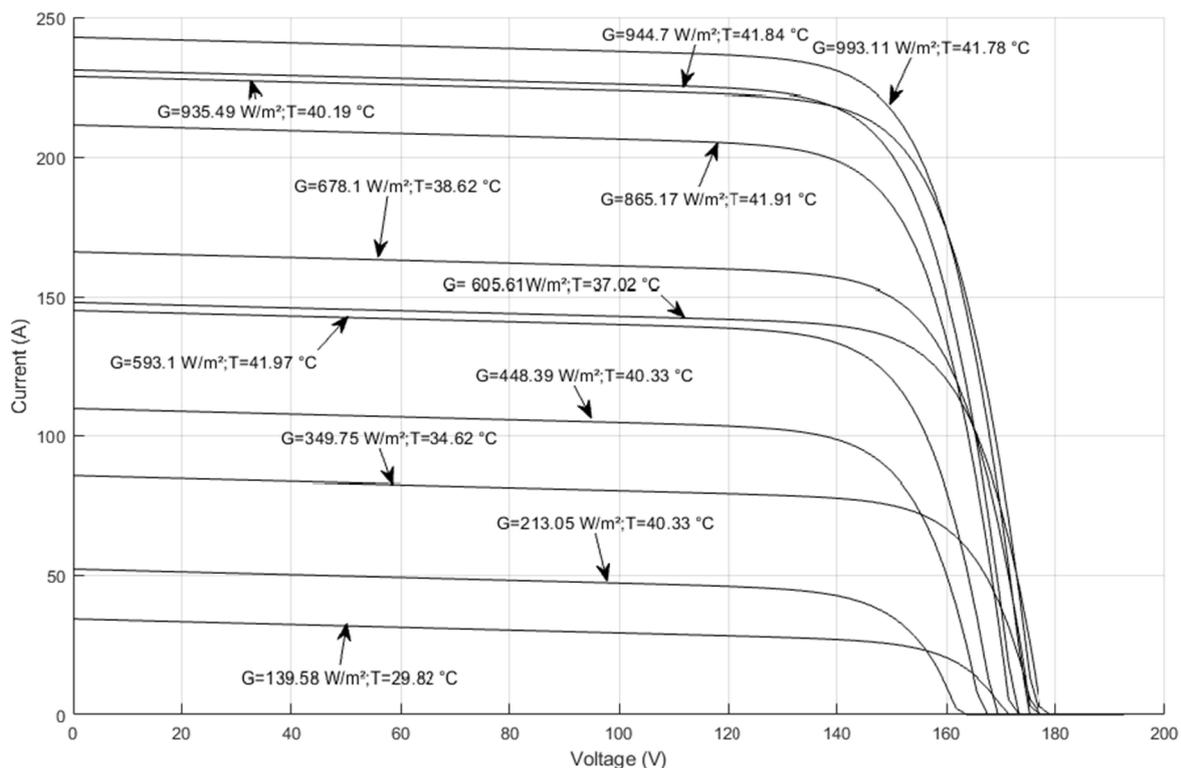


Figure 50: Caractéristiques courant-tension de la cellule PV pour différents rayonnements solaires pendant le jour le plus ensoleillé de l'année.

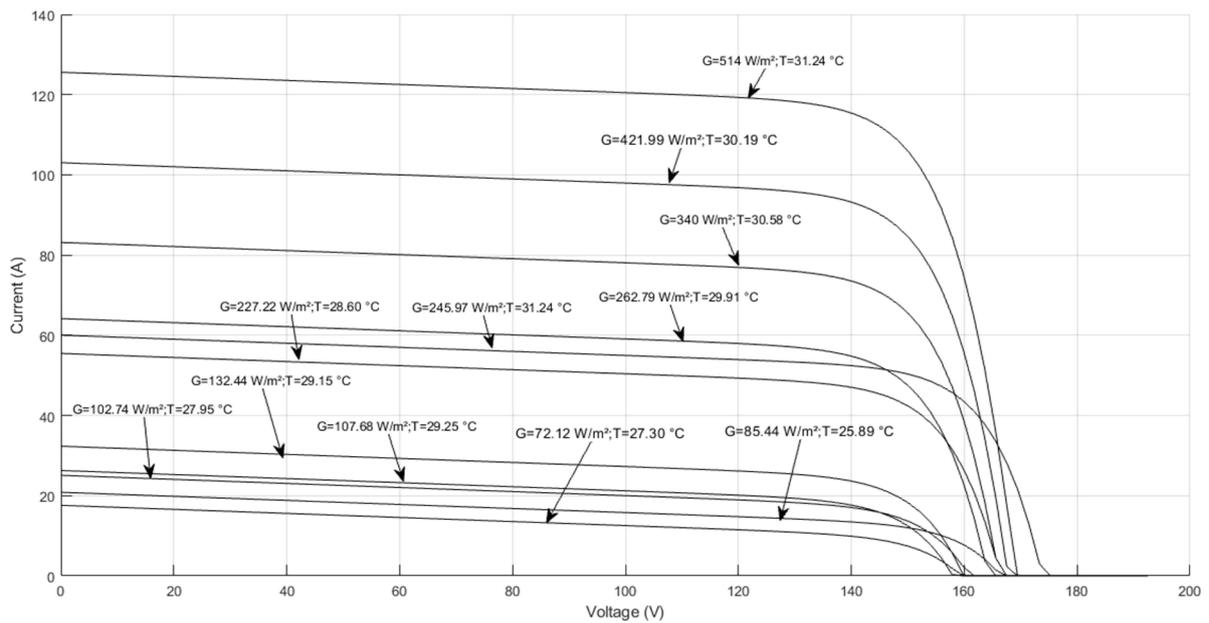


Figure 51: Caractéristiques courant-tension de la cellule PV pour différents rayonnements solaires pendant le jour le moins ensoleillé de l'année.

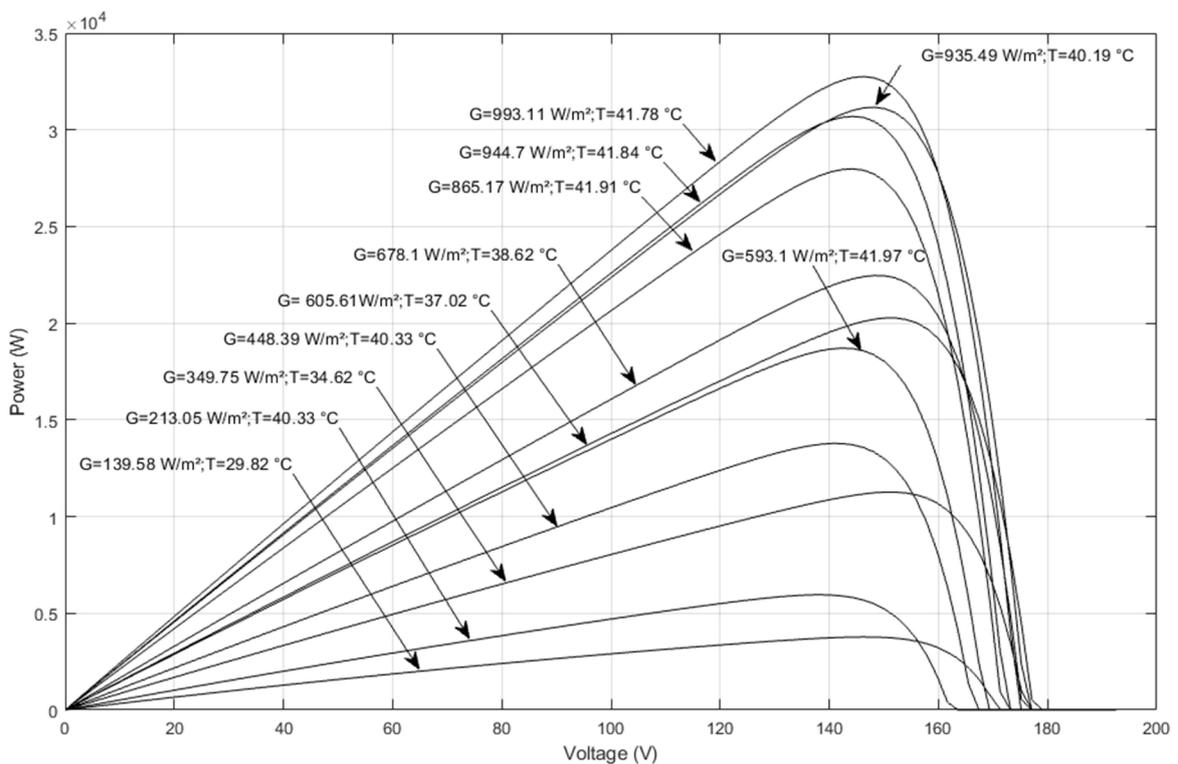


Figure 52: Caractéristiques puissance-tension de la cellule PV pour différents rayonnements solaires pendant le jour le plus ensoleillé de l'année.

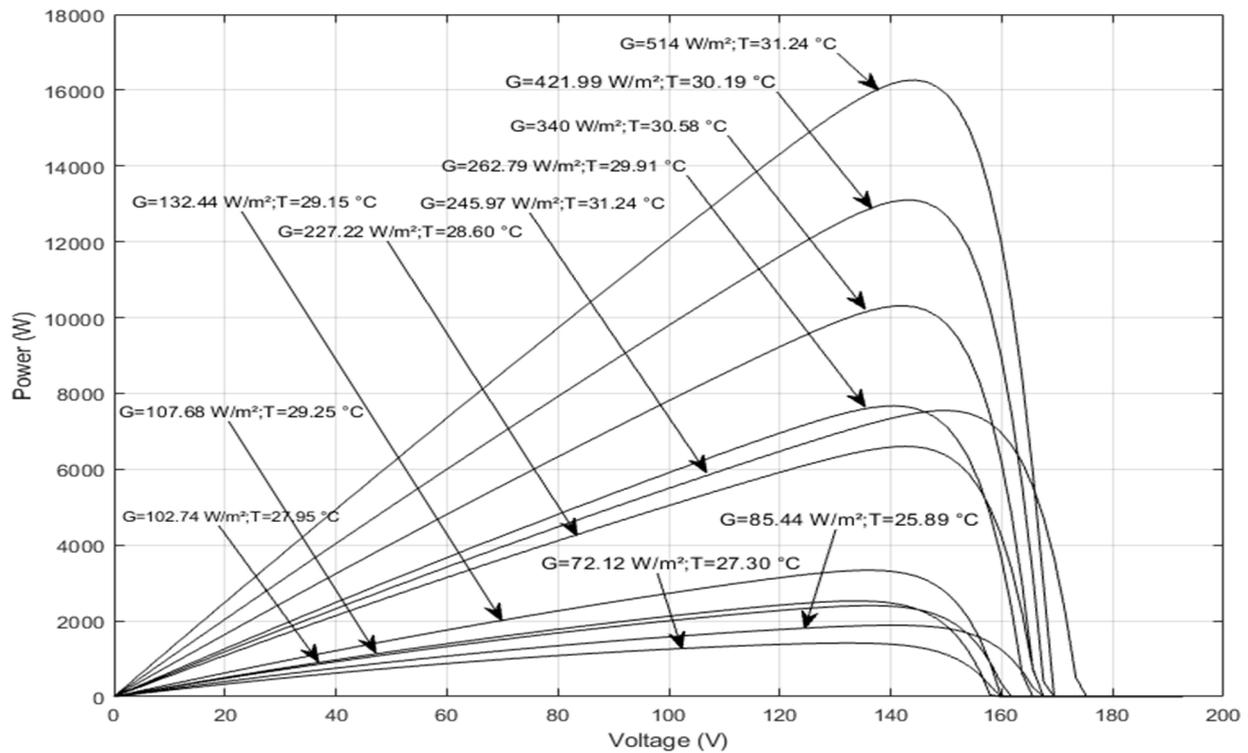


Figure 53: Caractéristiques puissance -tension de la cellule PV pendant le jour le moins ensoleillé de l'année.

Les caractéristiques (P-V) de la cellule photovoltaïque pour les différentes périodes de l'année sont représentées dans les figures 50 et 51.

Des figures 50 et 51, Il est clairement observé une réduction de la puissance extraite du champ PV dans la période nuageuse en raison d'un rayonnement solaire plus faible. La puissance maximale de production n'atteignant que 16.5KW, inférieure à la puissance du principal électrolyseur et de la charge principale de l'hôpital. Or le fonctionnement de l'électrolyseur est fortement lié à la caractéristique de sortie (courant et puissance) du champ photovoltaïque.

### 3.3 Production d'électricité, d'oxygène et d'hydrogène

La productivité du système proposé est évaluée pour le jour le plus favorable (le plus ensoleillé) de l'année et le jour le plus défavorable (le moins ensoleillé) de l'année.

Nous analysons tout d'abord la production pour le dimensionnement non optimal puis nous comparons ces résultats au dimensionnement optimal.

La figure 54 donne la puissance produite par le champ PV pour une heure pendant les jours le plus ensoleillé et le mois ensoleillé de l'année avec une approche d'optimisation non optimale.

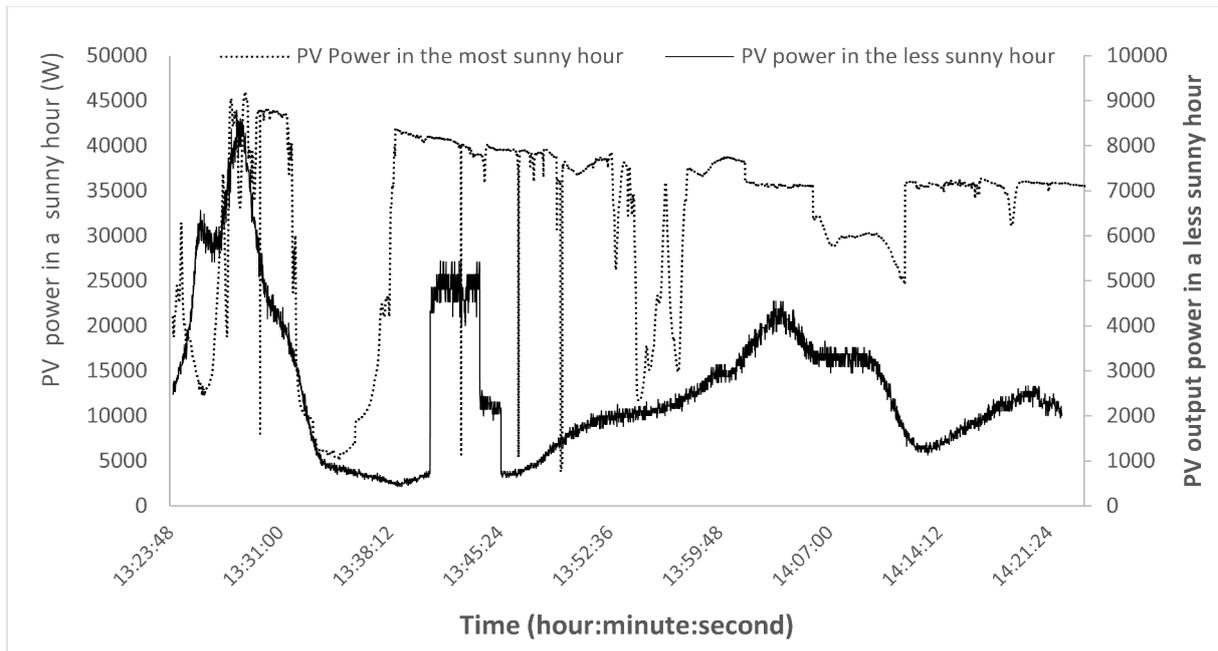


Figure 54: Evolution de la puissance produite par le PV pendant une heure pour les jours le plus ensoleillé et le moins ensoleillé de l'année par dimensionnement non optimal.

La figure 55 présente une évolution de la puissance PV autour de la puissance nominale de l'électrolyseur principal. Ce résultat permet d'évaluer l'alimentation de l'électrolyseur par le champ PV en évaluant l'excès de production par la méthode non optimale.

Les figures 56 et 57 présentent respectivement, la puissance produite par le PV, les

Puissances Consommées par la pile à combustible, l'électrolyseur 1 et l'électrolyseur 2 pendant les jours le plus ensoleillé et le moins ensoleillé de l'année après optimisation du dimensionnement

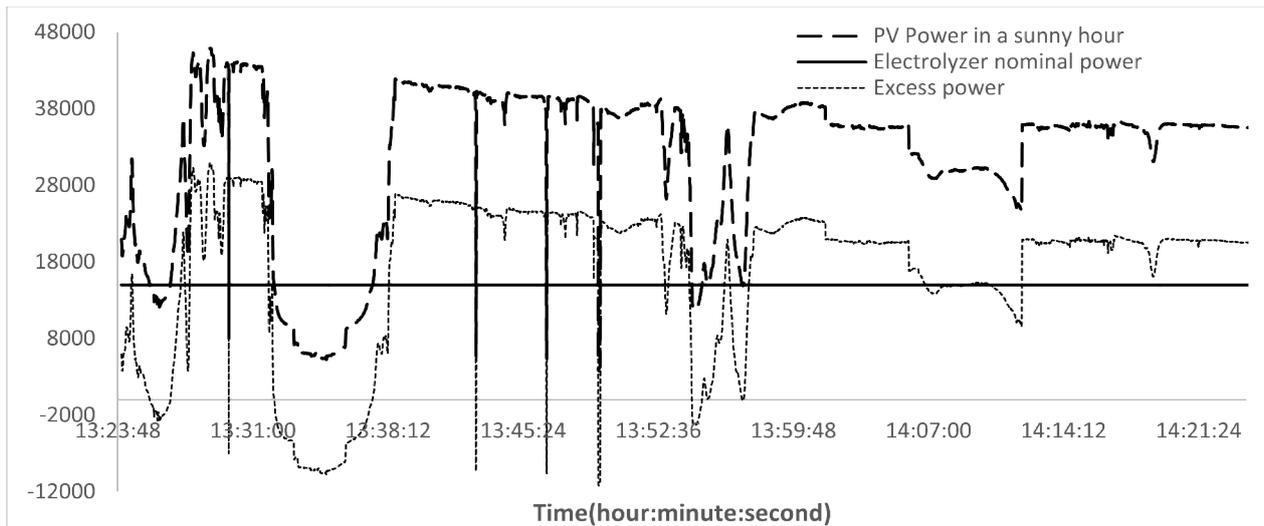


Figure 55: Comparaison entre la puissance PV et de l'électrolyseur pendant l'heure la plus ensoleillée de l'année.

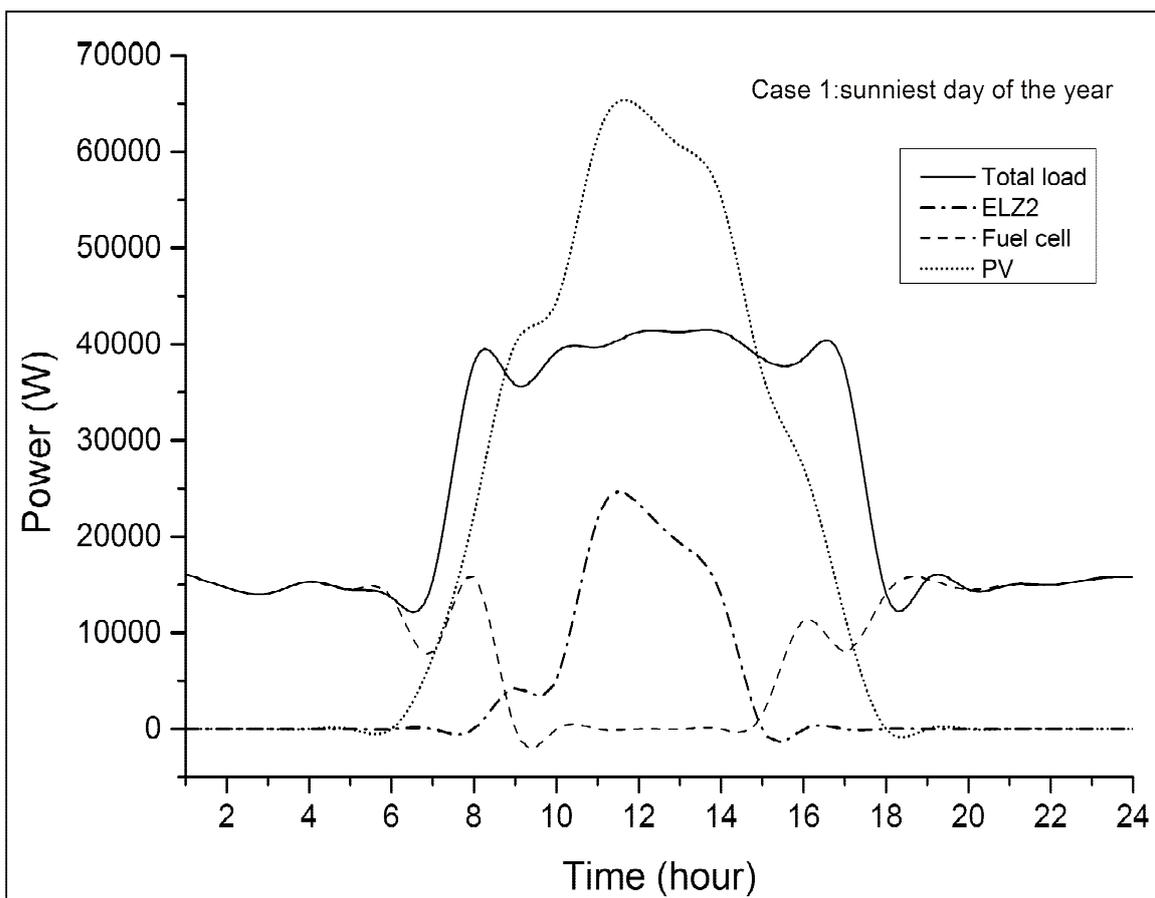


Figure 56: Evolution des puissances produite par le PV et la puissance consommée par les composants du système pendant le jour le plus ensoleillé de l'année.

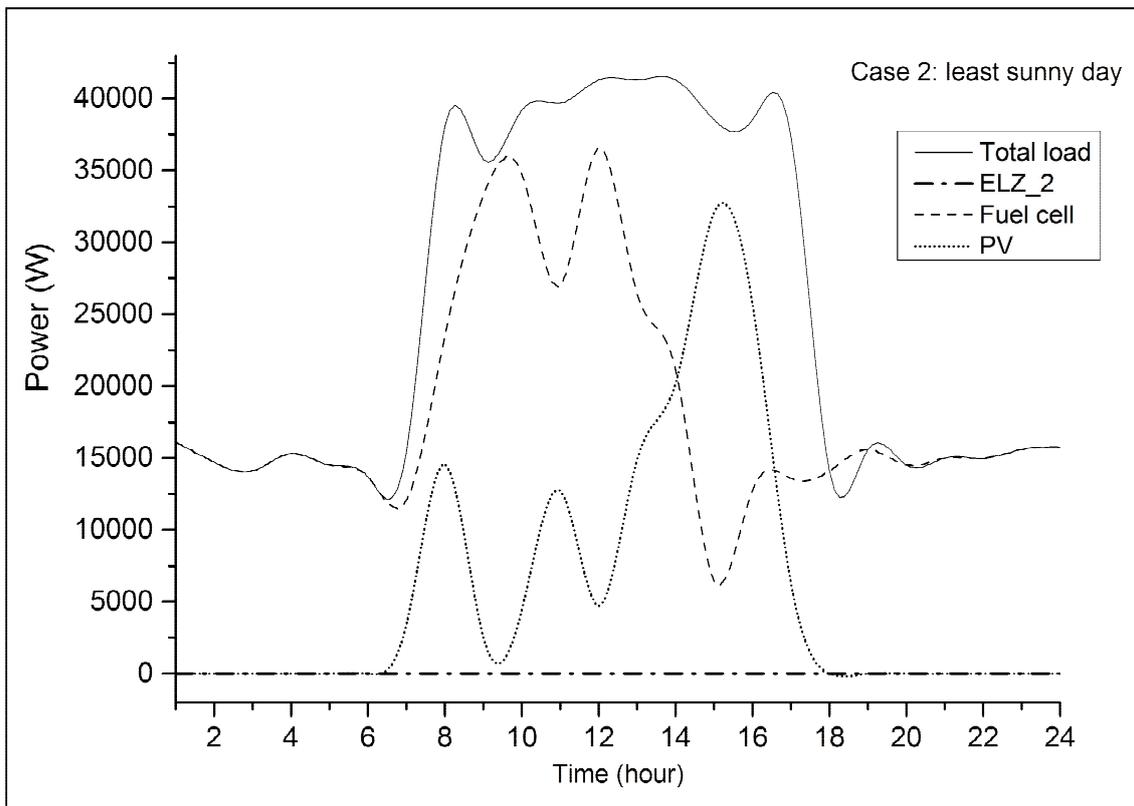


Figure 57: Evolution des puissances produite par le PV et la puissance consommée par les composants du système pendant le jour le moins ensoleillé de l'année.

Les résultats de ces deux approches de dimensionnement montrent clairement une grande différence entre la productivité PV. Pendant une heure (14h) de la journée, nous observons une différence sur la production PV entre les deux approches de dimensionnement, ce qui montre qu'il était nécessaire d'optimiser le dimensionnement du système.

### 3.3.1. Évolution de la puissance de chaque composant majeur du système

Nous présentons dans cette partie uniquement les résultats de dimensionnement optimal du champ PV.

En analysant la figure 56, on observe que de 9 h à 15 h, la production d'énergie dépasse les besoins de l'hôpital et de l'électrolyseur. Dans l'intervalle considéré, un excédent d'énergie total de 87,99 kWh est transféré à l'électrolyseur 2 et il est suffisant pour 5 heures de fonctionnement autonome. Lorsque le PV ne reçoit pas suffisamment de rayon lumineux, la pile à combustible est activée de 7 h à 9 h et entre 16 h et 18 h et fonctionne à environ 30 % de sa capacité nominale pour compenser la baisse d'énergie enregistrée au lever et au coucher du

soleil. Le déficit énergétique correspondant à cet intervalle de temps est d'environ 62,26 kWh. Pendant la journée la plus ensoleillée, une quantité excédentaire d'énergie de 25,74 kWh s'ajoute au stockage d'énergie obtenu grâce à l'hydrogène produit par le premier électrolyseur. En outre, pendant la nuit, la pile à combustible est activée à 50 % de sa capacité nominale afin d'assurer la disponibilité de l'électricité pour les appareils hospitaliers. La puissance circulant à travers le PV, la pile à combustible, l'électrolyseur 1 et l'électrolyseur 2 pendant la journée la moins ensoleillée présente une courbe de rayonnement solaire interrompue représentée à la figure 57. L'électrolyseur 2 n'est pas activé en raison du déficit énergétique. La puissance de sortie du sous-système PV est inférieure à l'exigence. La pile à combustible fonctionne avec différents pourcentages pour compenser la part de la demande d'énergie non fournie pendant la journée en raison d'un rayonnement solaire insuffisant. Pendant la nuit et de 14h à 17h, la pile à combustible fonctionne à 50% de sa capacité nominale et entre 7h et 14h, elle fonctionne à 90%. Le déficit énergétique total enregistré le jour le moins ensoleillé est d'environ 265 kWh.

### 3.3.2. Production d'oxygène et d'hydrogène

La production d'oxygène et d'hydrogène suit la courbe du rayonnement solaire pendant la journée. L'évolution des puissances PV, des électrolyseurs présentés par les figures 56 et 57 permettent d'évaluer la production d'oxygène et d'hydrogène. Une quantité d'oxygène d'environ 39,8 m<sup>3</sup>/jour et 15,3 m<sup>3</sup>/jour est produite respectivement pendant la journée la plus ensoleillée et la moins ensoleillée. Le déficit quotidien de production d'oxygène est estimé à environ 20% (5 m<sup>3</sup>) pendant la journée la moins ensoleillée. Cependant, un potentiel de production excédentaire d'oxygène d'environ 65 % (13 m<sup>3</sup>) par une journée plus ensoleillée. Sur la base de la structure du rayonnement solaire dans la région tropicale caractérisée par une certaine régularité du jour avec un rayonnement solaire élevé, une production excédentaire d'oxygène sur une période d'un an est enregistrée. La même observation est faite pour le volume d'hydrogène pour lequel les valeurs de 84,2 m<sup>3</sup>/jour et 30,5 m<sup>3</sup>/jour sont produites par électrolyseur respectivement pendant les journées les plus ensoleillées et les moins ensoleillées. La quantité d'hydrogène stockée est capable de restituer à travers la pile à combustible 252,6 kWh.

Les figures 58 et 59 donnent la production d'oxygène et d'hydrogène pour un dimensionnement non optimal. Ces résultats ont permis de vérifier tout d'abord que l'électrolyseur peut fonctionner normalement malgré l'intermittence de la source solaire même

sur une période très courte. La productivité PV étant déjà différente avec celle obtenue par dimensionnement optimal, il est clair que la production d'oxygène et d'hydrogène le soit aussi.

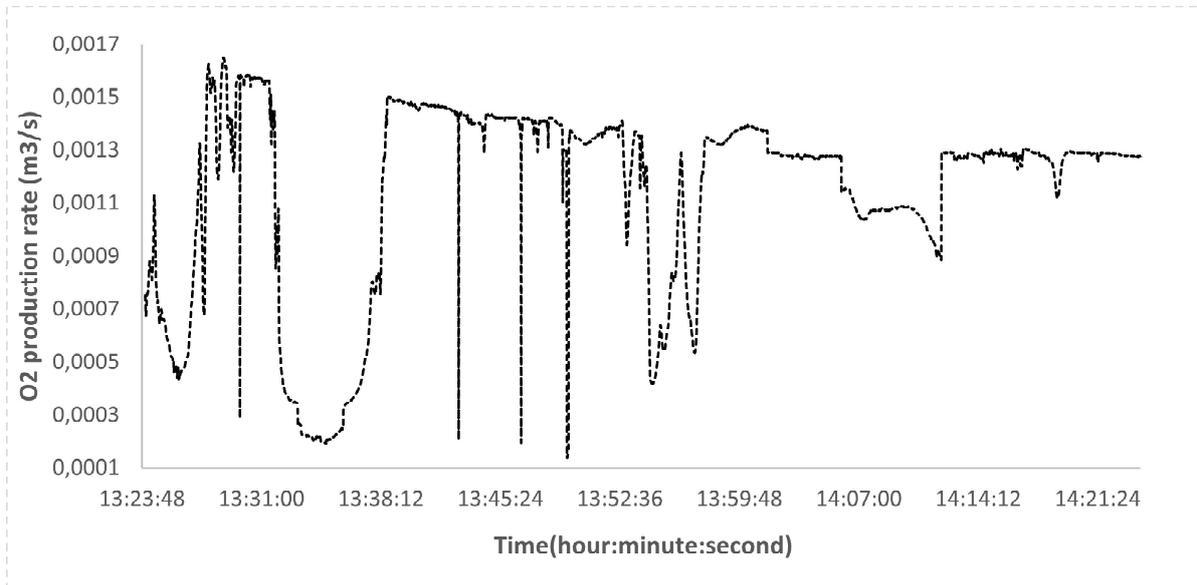


Figure 58: Evolution seconde par seconde de la production d'oxygène pendant une heure la plus ensoleillée de l'année par l'approche non optimale.

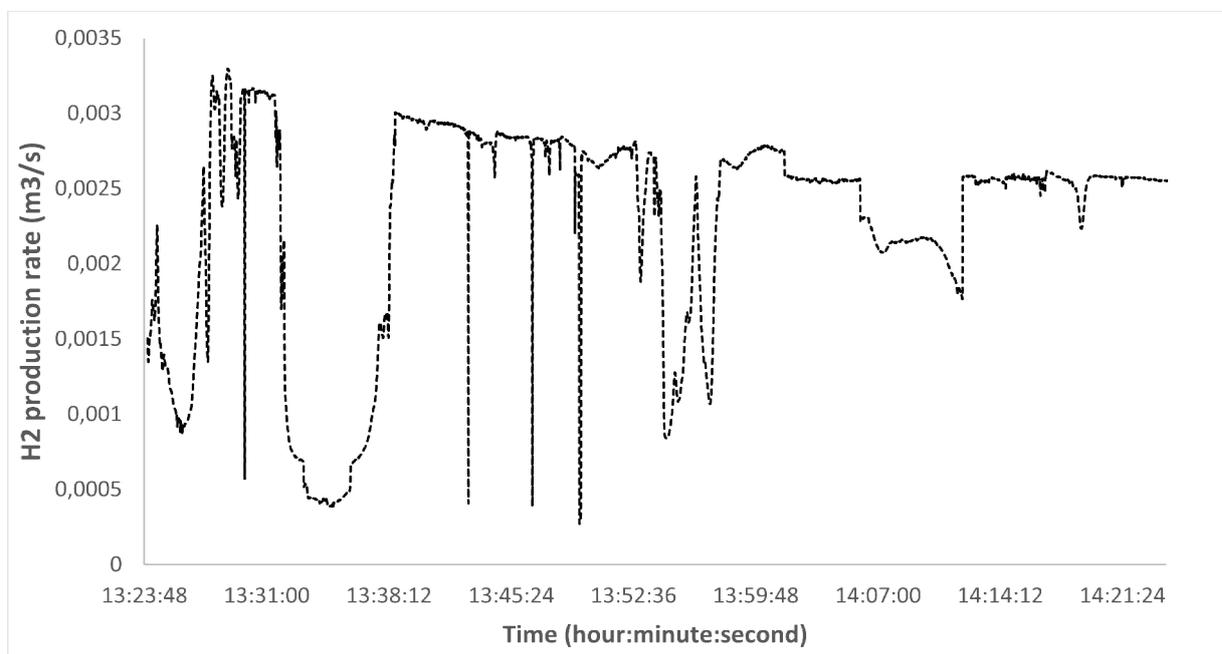


Figure 59 : Evolution seconde par seconde de la production d'hydrogène pendant une heure la plus ensoleillée de l'année par l'approche non optimale.

Les productions journalière et mensuelle du champ PV, de la tension, du courant, d'oxygène et d'hydrogène par approche non optimale sont présentés dans les figures 60 et 61 pendant les jours et mois les plus et moins ensoleillés de l'année.

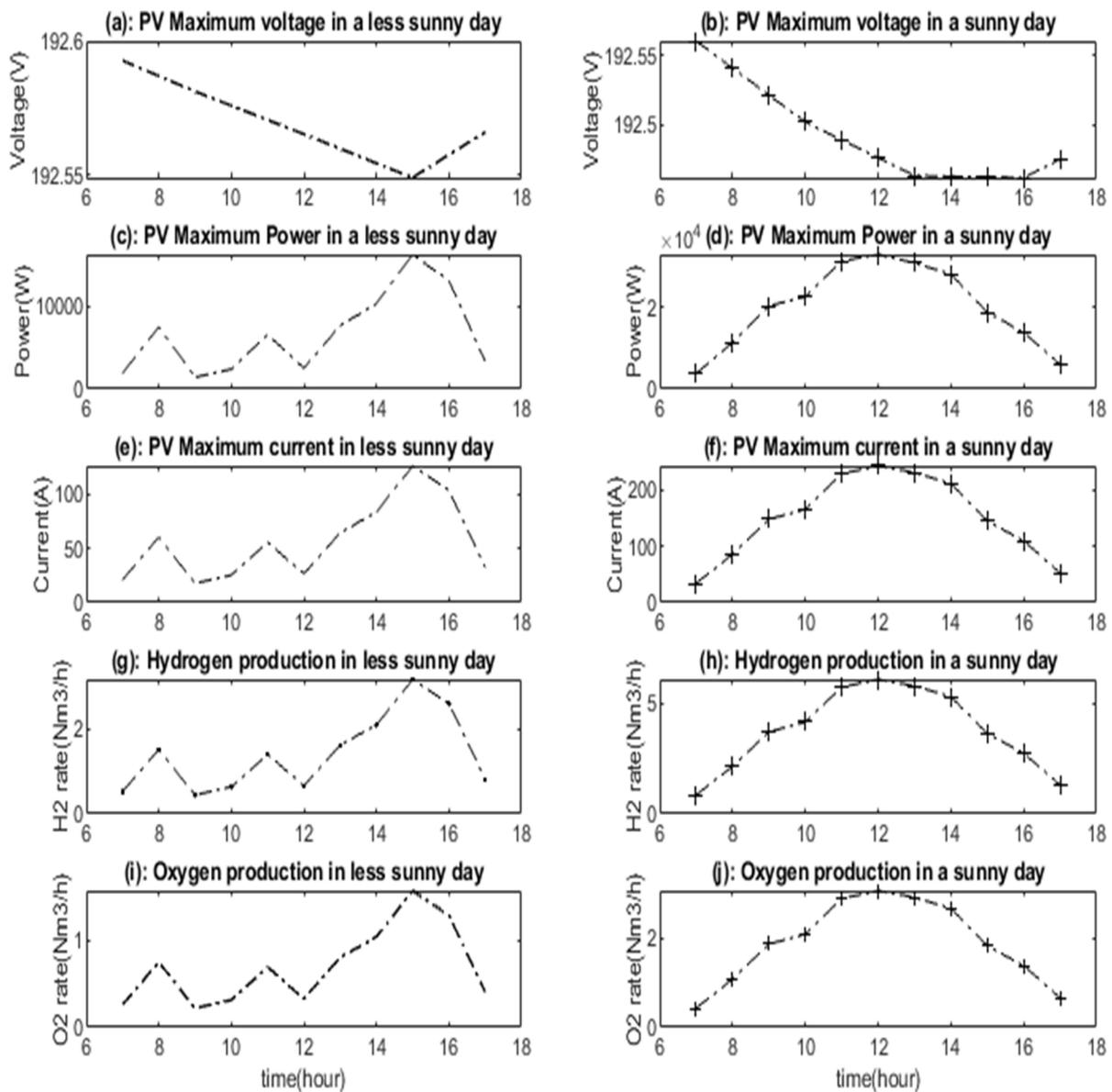


Figure 60: Evolution des paramètres électriques (courant et tension) du champ PV, d'oxygène et d'hydrogène pendant les jours le plus ensoleillé et le jour le moins ensoleillé de l'année

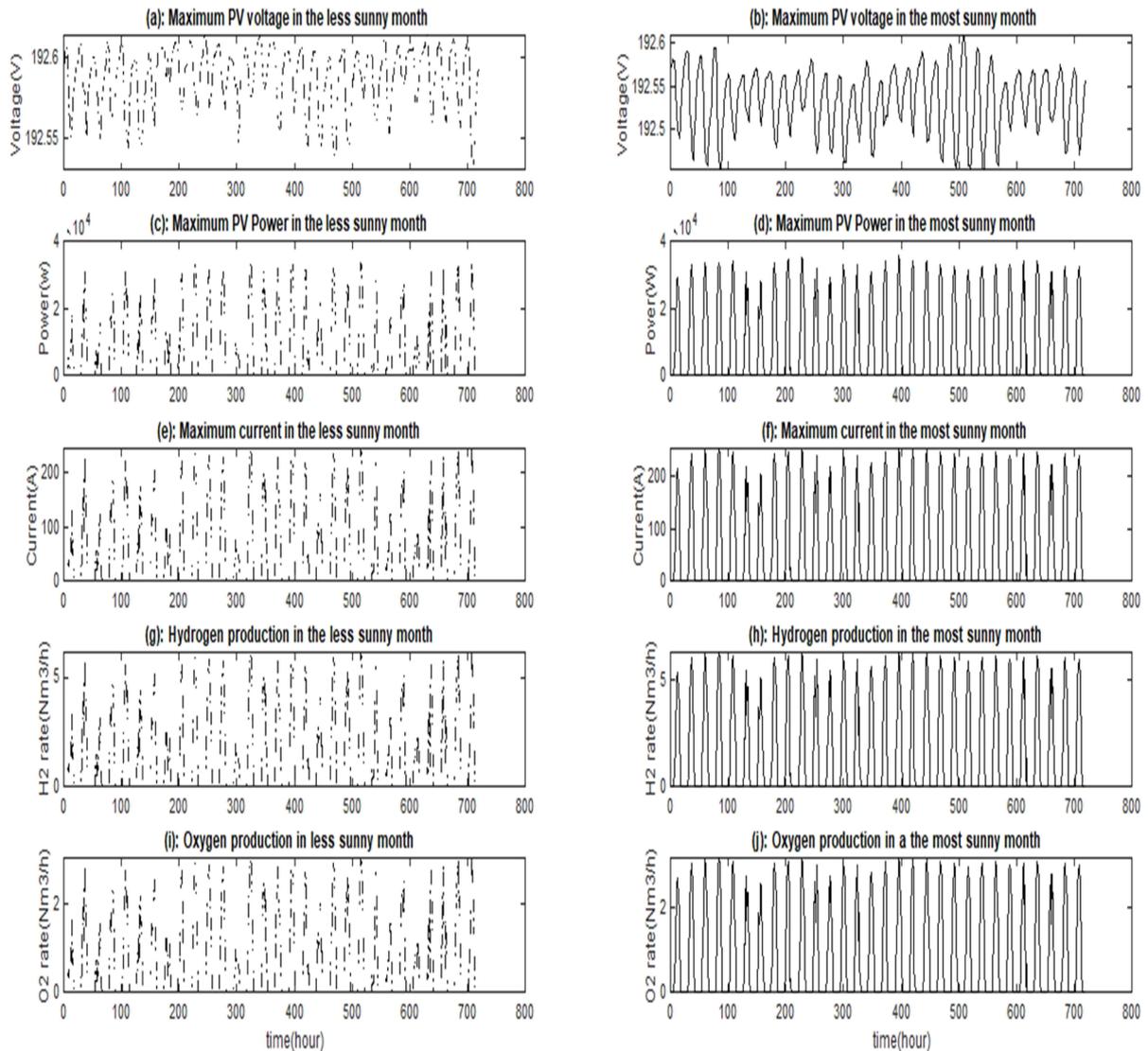


Figure 61: Evolution des paramètres électriques (courant et tension) du champ PV, d'oxygène et d'hydrogène pendant le mois le plus ensoleillé et le mois le moins ensoleillé de l'année

### 3.4 Évaluation des coûts et de la rentabilité

Dans cette étude, l'analyse économique est effectuée pour une projection de prix bas, moyen et élevé pour l'électrolyseur alcalin, les piles à combustible du sous-système PV et les auxiliaires. Cela équivaut au scénario bas, médian et haut des paramètres de coûts rapportés par plusieurs auteurs [125-130]. Cette évaluation sera faite sur la base des résultats optimaux.

Le coût actualisé net (NPV) est d'abord analysé à partir du taux de dégradation, du coût des dépenses d'investissement et des coûts d'exploitation des différentes composantes comme

indiqués dans le tableau 3. Comme l'ont adopté plusieurs auteurs, les coûts d'exploitation de l'électrolyseur et de la pile à combustible sont calculés à partir du coût CAPEX. La valeur couramment rapportée est comprise entre 1 et 3 % du CAPEX de l'électrolyseur [125]. La valeur de 1% est utilisée dans le présent travail. Les paramètres financiers appliqués dans le cas du Cameroun sont indiqués dans le tableau 4.

Tableau 3 : Coûts CAPEX des différents composants du système pour les scénarios bas, médian et haut.

Composants	CAPEX (\$)			SDR
	Bas	Médian	Haut	
Electrolyseur alcalin	571	988	1268	0.5%/an
Pile à combustible PEM	750	1200	1700	
PV	760	1400	1800	
Réservoir de stockage	237.6 \$/kgH <sub>2</sub>	237.6 \$/kgH <sub>2</sub>	237.6 \$/kgH <sub>2</sub>	
Compresseur	3\$/kg	3\$/kg	3\$/kg	

- Le taux de taxation est donné par le code général des impôts au Cameroun
- L'exonération fiscale est contenue dans la loi des finances du Cameroun de 2017
- Le prix de vente d'oxygène est pris sur la base des prix de vente d'oxygène médical chez l'Air liquide, principal fournisseur de gaz médicaux au Cameroun.
- Le coût de vente de l'électricité est pris sur la base des prix de vente Eneo.

Tableau 4 : Les paramètres financiers appliqués au Cameroun

Paramètres	Value
Taux de taxation	30.80 %
Exonération	3.25 %
Prix de vente de l'oxygène au Cameroun	8.31 \$/m <sup>3</sup>
Prix de vente de l'électricité au Cameroun	0.156 \$/kWh
Durée de vie du système	25 ans

Pour évaluer la faisabilité économique du système, la valeur actualisée nette, notée NPV est calculée suivant trois scénarios différents de projection des coûts. Une NPV positive indique que le revenu généré par l'investissement dépasse les coûts du projet. Une NPV négative

indique que les coûts d'investissement du projet sont inférieurs au revenu généré. L'évolution de la NPV en fonction de l'année de vie est illustrée à la figure 62. Il faut souligner que le coût des composants majeurs sur PV chute au cours des années comme le montre le tableau en annexe. Pour ce fait, la rentabilité du système proposé est prévue pour 60 mois après l'implantation du projet pour le scénario de projection des coûts élevés et après 48 mois pour le scénario de projection du coût médian. Compte tenu de l'hypothèse d'une projection à faible coût, la NPV est positive après 20 mois et une valeur de 457 k\$ est enregistrée à la fin de la durée de vie. En raison du coût de remplacement de l'électrolyseur et de la pile à combustible investi à la quinzaine année de la durée de vie, l'augmentation de la NPV est légèrement modifiée comme l'observe la figure 62.

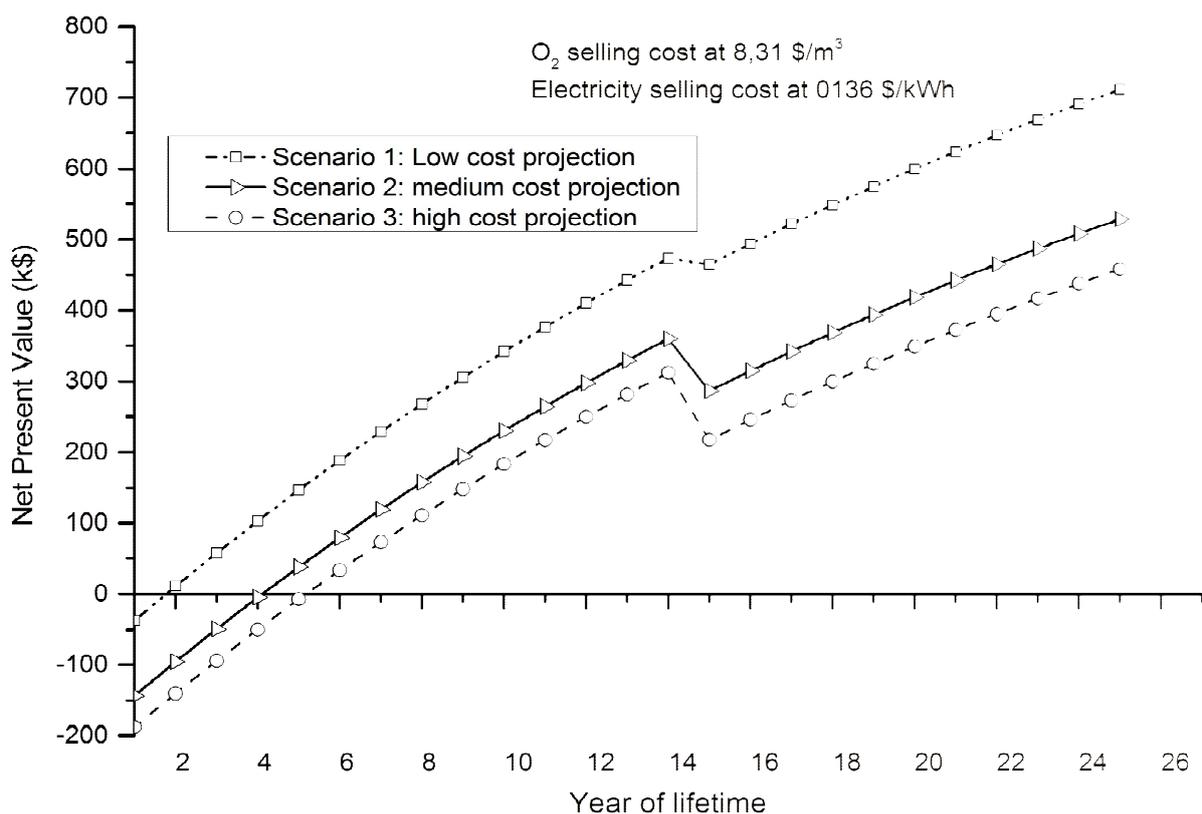


Figure 62: Evolution du NPV sur le cycle de vie de chaque composant pour les projections bas, médian et haut.

Compte tenu de la tendance à la hausse du prix de l'électricité comme un phénomène à long terme, l'impact de l'évolution du coût de vente de l'électricité sur la NPV est étudié dans le

scénario de projection du coût moyen des électrolyseurs et des piles à combustible comme le montre la figure 63. Si le coût de l'électricité passe de 0,156 \$/kWh qui est le coût réel du marché à 0,467 \$/kWh au coût prévu, un investissement dans le système proposé sera rentable après un peu plus de 24 mois au lieu de 50 mois. Avec une projection de coût de vente médian de l'électricité de 0,312 \$/kWh, la NPV est positive après 36 mois.

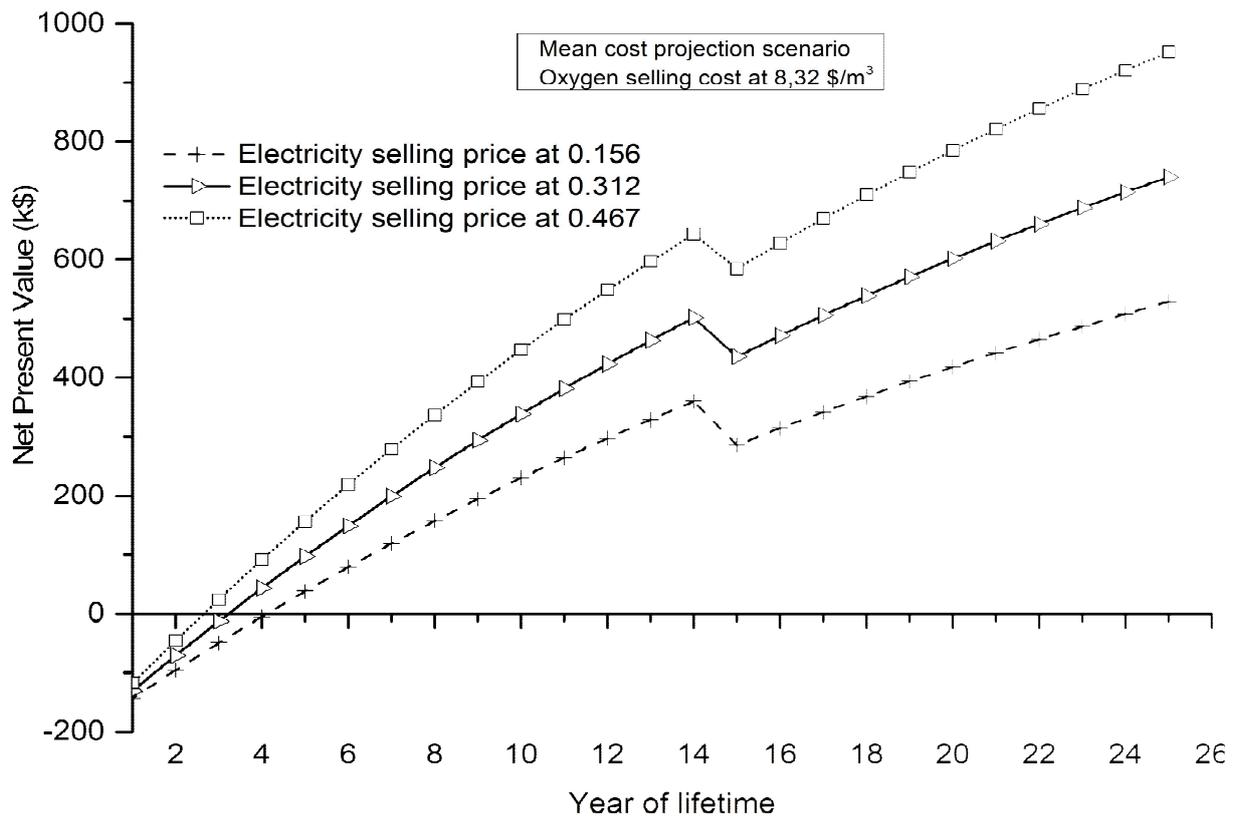


Figure 63: Impact du coût de vente de l'électricité sur la durée de vie du projet en fonction du NPV.

Le troisième cas analysé considère que le projet bénéficiera de l'exonération fiscale et douanière définie par la loi d'incitation à l'investissement privé de 2017. Sur la base de cette loi, il est supposé que les exonérations fiscales de 30,8% sont appliquées. Comme le montre la figure 64, le retour sur investissement peut être attendu après deux ans environ, alors qu'il est de quatre ans sans exonération fiscale.

À la fin de la durée de vie économique estimée du système proposé, une estimation de la valeur actualisée nette cumulée en supposant une exonération fiscale serait d'environ 896 k\$ au lieu de 528 k\$ dans le cas où les taxes applicables sont imposées.

Il est alors clair qu'une aide au développement appropriée autorisée par le gouvernement par le biais de mesures incitatives peut améliorer l'accès au système proposé et catalyser l'investissement privé pour construire plusieurs systèmes autonomes de production d'oxygène et d'électricité sur site.

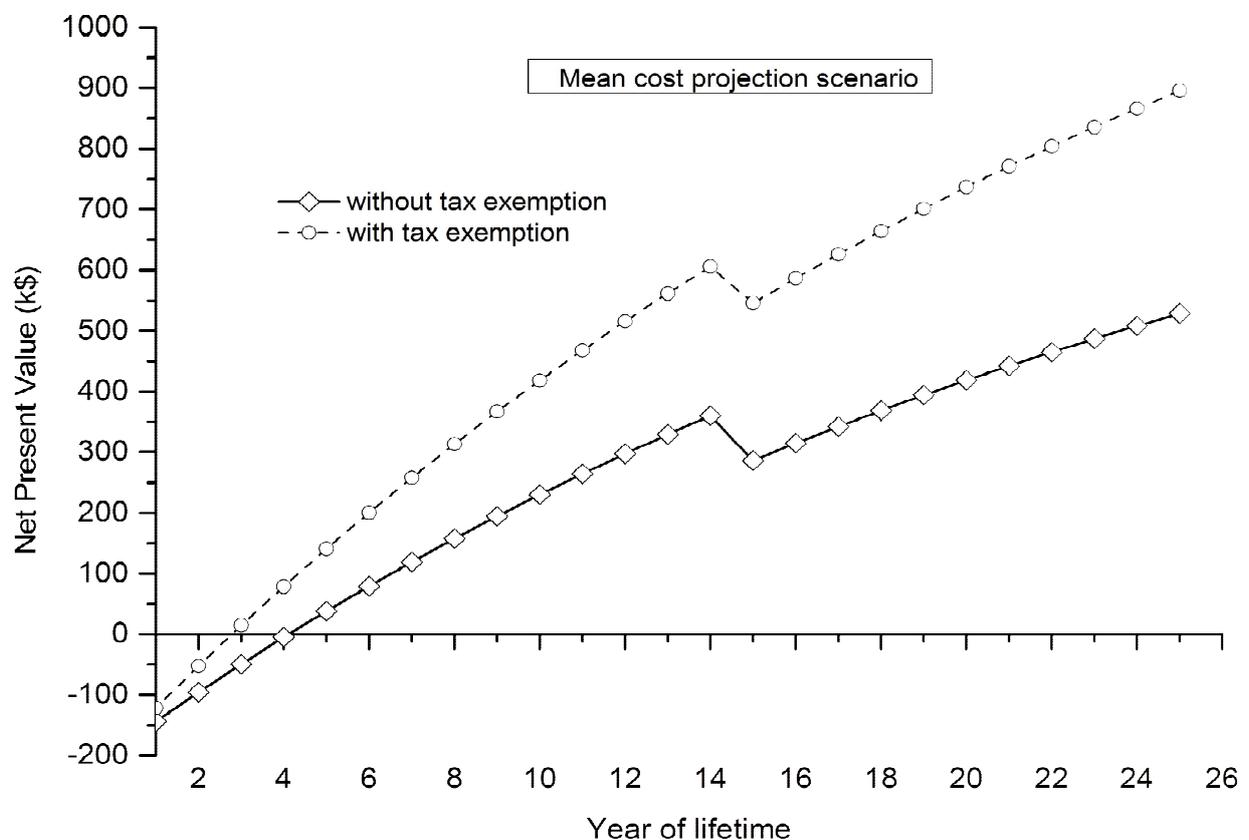


Figure 64 : Effets de l'exonération de taxes sur le NPV durant le cycle de vie du projet.

Dans les figures 65 et 66, on observe que le coût du système est principalement affecté par le coût d'investissement des différents composants, qui représentent environ 89%. En analysant en détail le coût d'investissement de l'ensemble du système, il apparaît clairement, comme le montre la figure 67, que les dépenses d'investissement sont déterminées par le coût

d'investissement de la pile à combustible représentant 41%, le sous-système photovoltaïque qui représente 31% et le composant électrolyseur représentant 26%. Dans la perspective que la durée de vie de l'électrolyseur et de la pile à combustible qui s'étend de 20 à 25 ans, comme indiqué dans certains ouvrages récents, le coût CAPEX associé à ces composants peut être réduit de 50% et le coût total du système diminuera de 22%. Cela est dû au fait que la pile à combustible était surdimensionnée pour servir de sous-système de secours avec la capacité d'alimenter la charge hospitalière et le premier électrolyseur en l'absence de rayonnement direct. D'autre part, la durée de vie de l'électrolyseur et de la pile à combustible a été fixée à 15 ans, induisant un remplacement à la fin de la quinzaine année. Par conséquent, les dépenses d'investissement pour la pile à combustible et l'électrolyseur sont effectuées deux fois au cours de la durée de vie du système.

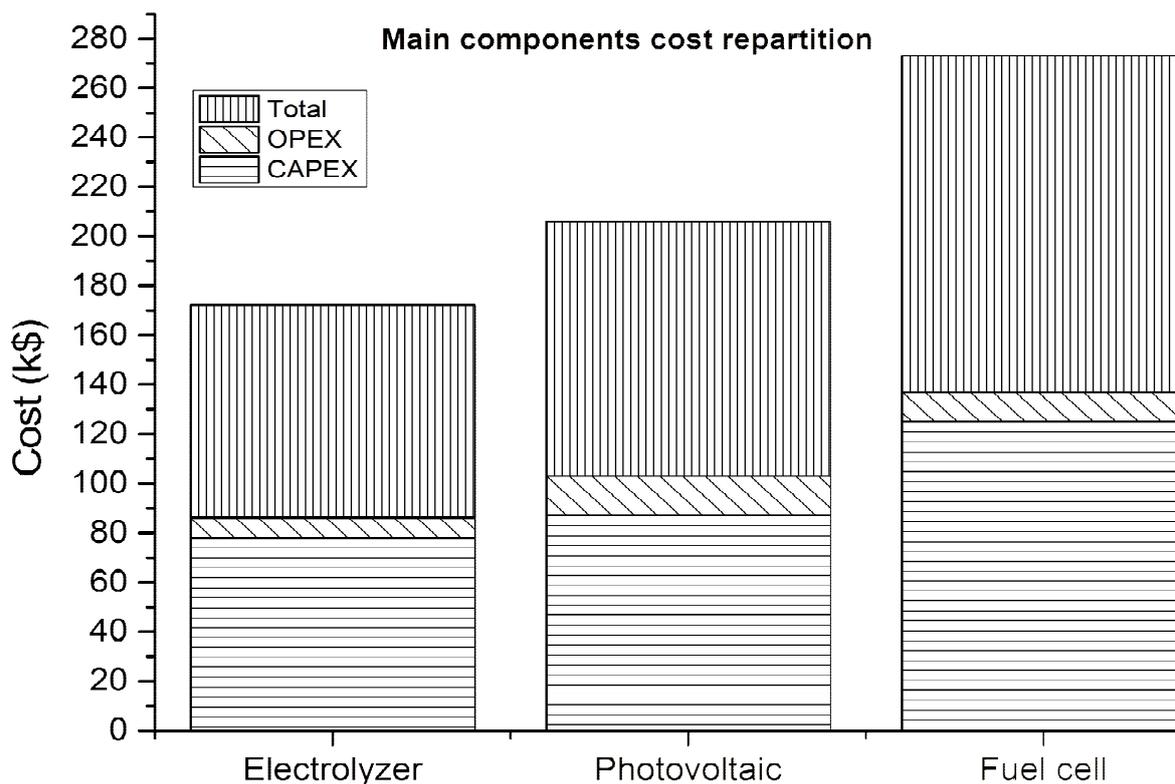


Figure 65: Coûts CAPEX, OPEX et total pour les principaux composants du système.

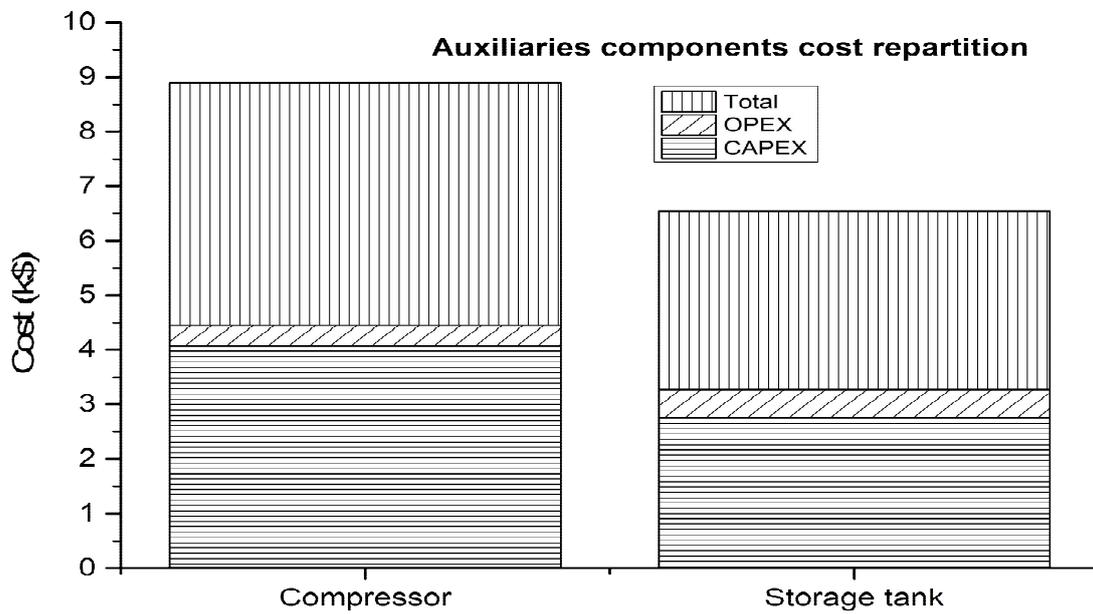


Figure 66: Coûts CAPEX, OPEX et total composants auxiliaires du système.

Capex cost by system major components (k\$, %)

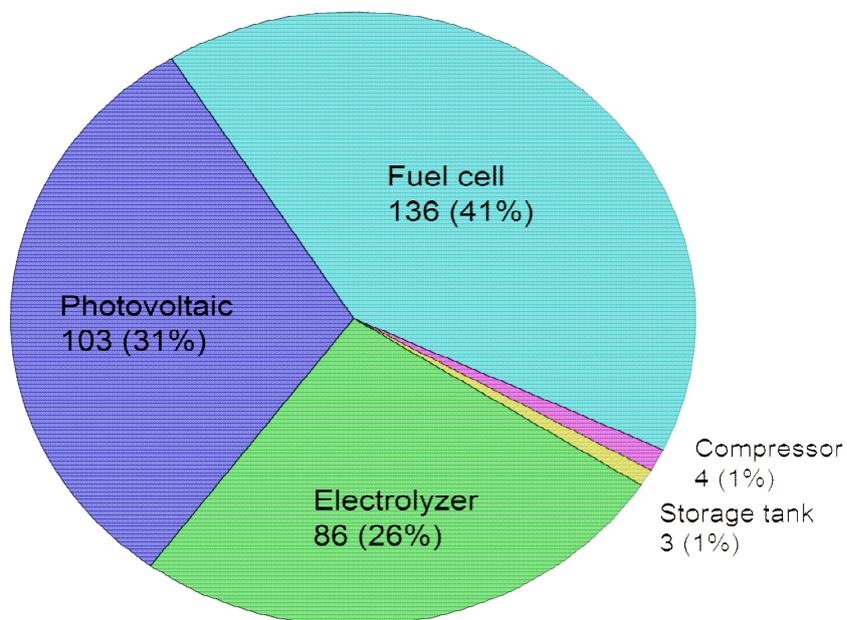


Figure 67: Le poids du coût CAPEX de chaque composant

## Conclusion

Ce chapitre était consacré à l'analyse et à l'interprétation des résultats de la simulation d'un système de production sur site d'oxygène médical et de fourniture de l'électricité solaire dédié à un hôpital non raccordé au réseau. L'analyse des résultats montre que la zone d'étude est favorable à l'exploitation de l'énergie solaire avec une irradiation quotidienne moyenne enregistrée d'environ 5,8kWh/m<sup>2</sup>/jour. L'excès de production de l'électricité pendant la période la plus ensoleillée de l'année permet de stocker suffisamment l'énergie via la pile à combustible pour la restituer au système pendant les périodes moins ensoleillées. Le système permet également de produire en quantité suffisante l'oxygène pour subvenir aux besoins médicaux. Les résultats de l'analyse économique obtenus renseignent de la faisabilité du système parce que rentables sur sa période de vie évaluée pour différents scénarios. Ces résultats offrent à cet effet des perspectives intéressantes pour le développement d'électricité verte et de production d'oxygène médical sur site à l'aide de modules photovoltaïques associés à une pile à combustible et à un électrolyseur.

## CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Les travaux de cette thèse étaient basés sur l'étude technico-économique d'un système de production sur site, d'oxygène médical et d'électricité solaire dédié à un hôpital non raccordé au réseau. Une méthodologie a été adoptée pour réaliser ce système. Elle a consisté à dimensionner chaque sous système à savoir : le sous-système PV, le sous-système électrolyseur et le sous-système pile à combustible en fonction des besoins en électricité et en oxygène de l'hôpital. La valeur actualisée nette est l'indicateur que nous avons utilisé pour cette étude économique. Le modèle électrique à une diode a permis de caractériser le système PV et de prévoir sa productivité tout au long de l'année. La fonction de Lambert à travers sa simulation MATLAB a été utilisée pour résoudre l'équation caractéristique de ce modèle. Pour la production d'oxygène et d'hydrogène, nous avons utilisé l'électrolyseur à membrane polymère échangeuse de protons (PEM) car il produit de l'oxygène très pur (pas ou peu de pollution par l'électrolyte), nécessite peu de maintenance et peut être bien adapté aux sources provenant des énergies renouvelables [44]. L'évaluation de la tension de l'électrolyseur a permis de déduire sa puissance et donc sa production d'oxygène et d'hydrogène en fonction de la puissance PV reçue. La même évaluation a été faite pour la pile à combustible afin d'évaluer sa puissance en fonction de l'oxygène et de l'hydrogène reçue. La fonction principale de la pile à combustible dans ce système étant de stocker l'excédent de production PV pour alimenter le système pendant les périodes de non et faible rayonnement solaire. La production du système a été simulée et les résultats montrent que sur le plan technique, la zone d'étude choisie est propice à l'exploitation de l'énergie solaire et donc dans presque tous les pays de l'Afrique subsaharienne pour lesquels le système énergétique est fragile et pourtant ces pays sont riches en potentiel solaire. La production journalière de l'électricité et d'oxygène permet de couvrir les besoins de l'hôpital. L'excès de production pendant les périodes de fort rayonnement de l'année permet de couvrir les besoins de l'hôpital pendant les périodes nuageuses de faible production. L'étude économique a été évalué suivant trois scénarios: le scénario de coûts élevés de matériaux, de coûts medians et de faibles coûts. Les résultats montrent que sans exonération fiscale, le retour à l'investissement a lieu après 60 mois, 48 mois et 20 mois respectivement pour les trois scénarios ; et avec une exonération fiscale sur l'importation, la rentabilité du système s'observe juste deux ans après

sa mise en place au lieu de quatre, ans lorsque ces composants ne sont pas exonérés des frais de douane.

Au regard des résultats obtenus, nous recommandons aux pouvoirs publics et aux investisseurs privés à opter pour les énergies renouvelables pour une production sur site de l'électricité et d'oxygène médical pour les centres hospitaliers hors réseau. Cette solution permet de régler le problème logistique lié au transport des gaz médicaux sur des longues distances. Par ailleurs, nous conseillons aux pouvoirs publics de maintenir et d'améliorer les lois de finance portant sur les facilités d'importation du matériel médical et solaire; ceci permettra de réaliser à moindre coût de tels systèmes et donc de rendre rentable un tel projet tout au plus à moyen terme.

Le système proposé dans cette étude peut être amélioré. Pour cela, nous nous proposons :

- de maturer l'étude technique par l'analyse des performances à travers l'étude énergétique et empreinte carbone
- de maturer l'étude économique en évaluant le taux de rendement interne et le temps de retour à l'investissement ; on pourra aussi simuler des modèles avec prêts bancaires et le cas où l'investissement est mis sur pied sous financement propre.
- d'étendre cette étude à d'autres sources d'énergie pour vérifier leur faisabilité et proposer leurs installations dans des sites précis en fonction du modèle d'exploitation régional.

## ANNEXE

<b>Annexe 1. Caractéristique du panneau PV utilise pour la simulation</b>	
Coefficient de Température lié au courant (% / °C)	0.061745
Coefficient de Température lié à la tension (% / °C)	0.27269
Courant de court-circuit (A)	5.96
Tension en circuit ouvert (V)	64.2
Tension maximale (V)	54.7
Courant maximal (A)	5.58
Puissance maximale (W)	305.226
Nombre de cellules en série Ns	96
Résistance série (ohm)	0.3752
Résistance parallèle (ohm)	269.5934

	PV CAPEX, €/Wp	PV OPEX, €/kWp/a	Battery CAPEX, €/Wh	Battery OPEX, €/kWh/a
2019	0.462	9.2	0.275	4.1
2020	0.431	8.8	0.251	3.9
2021	0.406	8.4	0.229	3.7
2022	0.384	8.1	0.209	3.6
2023	0.365	7.8	0.192	3.4
2024	0.348	7.6	0.176	3.3
2025	0.333	7.4	0.163	3.2
2026	0.319	7.1	0.151	3.0
2027	0.307	6.9	0.141	2.9
2028	0.296	6.7	0.132	2.9
2029	0.285	6.6	0.124	2.8
2030	0.275	6.4	0.117	2.7
2031	0.266	6.2	0.112	2.6
2032	0.257	6.1	0.106	2.6
2033	0.249	5.9	0.102	2.5
2034	0.242	5.8	0.098	2.5
2035	0.235	5.6	0.094	2.4
2036	0.228	5.5	0.091	2.4
2037	0.221	5.4	0.088	2.3
2038	0.215	5.3	0.085	2.3
2039	0.209	5.1	0.082	2.3
2040	0.204	5.0	0.080	2.2
2041	0.199	4.9	0.078	2.2
2042	0.194	4.8	0.076	2.2
2043	0.189	4.7	0.074	2.2
2044	0.185	4.6	0.073	2.1
2045	0.181	4.6	0.071	2.1
2046	0.177	4.5	0.070	2.1
2047	0.174	4.4	0.069	2.1
2048	0.170	4.3	0.067	2.1
2049	0.167	4.2	0.066	2.0
2050	0.164	4.2	0.065	2.0

Annexe 2 : Valeurs tabulées des coûts CAPEX et OPEX du système solaire PV et de batterie [130]

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **F. H. Abanda**, Renewable energy sources in Cameroon: Potentials, benefits and enabling environment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 16, pp 4557- 4562, (2012).
- [2] Ministère de l'eau et de l'énergie, Plan Directeur d'Electrification Rurale du Cameroun, Rapport final, Avril 2016.
- [3] **A. Essalam**, Bond graph modeling and control strategies in structure optimization of energy supply systems (solar hydrogen / fuel cell) for a hospital, *Leonardo Journal of Sciences*, vol 33, pp 383-400, (2018).
- [4] **T. Duke, F. Wandji, M. Jonathan**, Improved oxygen systems for childhood pneumonia: a multihospital effectiveness study in Papua New Guinea. *Lancet*, vol 372, pp 1328–1333, (2008).
- [5] **A. Rohani, H. Zukor, K. Bonjour, S. Wilburn, S. Kuesel, A. Hebert, R. Fletcher**, Limited electricity access in health facilities of sub-Saharan Africa: a systematic review of data on electricity access, in sources, and reliability. *Global Health: Science and Practice*, vol 2, pp 249-261, (2013).
- [6] **M. Gonin, N. Gachet, B. Klaiber, G. Ngounou. N. Crettenand**, Securing the power supply in Cameroonian district hospital. Cross project 2013. Cross Report. (2014.)
- [7] **H. Turnbull, A. Conroy, R. Opoka, S. Namasopo, K. Kain , M. Hawkes**, Solar-powered oxygen delivery: proof of concept. *Int J Tuberc Lung Dis*, vol 20, pp 696-703, (2016).
- [8] **T. Michael. Hawkes, L. Andrea. Conroy, S. Namasopo, R. Bhargava, C. Kevin. K. Qaasim Mian, O. Robert**, Solar-Powered Oxygen Delivery in Low-Resource Settings: A Randomized Clinical Noninferiority Trial. *JAMA Pediatrics* July Volume 172, (2018).
- [9] **G. Bizzarri, G. Morini**, Greenhouse gas reduction and primary energy savings via adoption of a fuel cell hybrid plant in a hospital, *Applied Thermal Engineering*, (2004).
- [10] **A. Karaghoulis , L. Kazmerski** , Optimization and life-cycle cost of health clinic PV system for a rural area in southern Iraq using HOMER software, *Solar Energy*, vol 84, pp. 710-714, (2010).

- [11] **P. Evrard, M. Borne, B. Huart, P. Hokayem**, Production d'oxygène sur site appliquée aux hôpitaux de campagne. Elsevier Masson SAS, IRBM, vol 28, pp 93-106, (2007).
- [12] **G. Maggio, G. Squadrito, A. Nicita.**, Hydrogen and medical oxygen by renewable energy based electrolysis: A green and economically viable route. Applied Energy, volume 306, Part A, pp 79-93, (2022).
- [13] **A. Nicita, P. Maggio, A. Andaloro, and G. Squadrito**, Green Hydrogen as Feedstock: Financial Analysis of a Photovoltaic-Powered Electrolysis Plant”, International Journal of Hydrogen Energy, vol 5, pp 11395-11408; (2020).
- [14] **G. Squadrito, A. Nicita G. Maggio**, A sized-dependant financial evaluation of green hydrogen oxygen co-production. Renewable energy , vol 163, ppp 2165-2177, (2021).
- [15] **S. Ngoh, J. Bakehe, and P. Edouma Fils**, Green electricity and medical electrolytic oxygen from solar energy-A sustainable solution for rural hospitals. Scientific African , vol 17 ,(2022).
- [16] USAID, Off-grid Solar Market Assessment-Cameroon, Power Africa Off-grid Project, (2019).
- [17] **A. Shahsavari, M. Akbari.**, Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 90, pp 275–291, (2018).
- [18] Sonner energie DG (DGS), Planning and Installing Photovoltaic Systems: a Guide for Installers, Architects and Engineers Planning and Installing. Publisher: Earthscan; p. 384, (2008)
- [19] Solar GIS. Global Horizontal Irradiation (GHI), Available from:(<http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/download/world>) , (2016).
- [20] **A. Dong, H. Wang**, Lateral Photovoltaic Effect and Photo-Induced Resistance Effect in Nanoscale Metal-Semiconductor Systems », ANNALEN DER PHYSIK, vol. 531, p. 180-440, (2019).
- [21] **M. Pawlik**, Etude de la passivation de surface du silicium cristallin type P par dépôt de couches atomiques d'alumine pour application aux cellules solaires à haut rendement, thèse de doctorat à l'école centrale de lile, (2015).

- [22] American Society for Testing and Materials (ASTM) Terrestrial Reference Spectra for Photovoltaic Performance Evaluation, ASTM G173-03 Tables: Extraterrestrial Spectrum, Terrestrial Global 37 deg South Facing Tilt & Direct Normal + Circumsolar. Disponible sur : <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5>.
- [23] **C. Riordan, R. Hulstron**, What is an air mass 1.5 spectrum [solar cell performance calculations], Photovoltaic Specialists Conference, 1990, Conference Record of the Twenty First IEEE; 21-25 Page(s):1085 - 1088 vol.2, (1990).
- [24]. **M. PETIBON Stéphane**, Nouvelles architectures distribuée de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » thèse de Doctorat Université de Toulouse III-Paul Sabatier, (2009).
- [25] **E. Becquerrel** , « Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires »; compte rendu de l'académie des sciences vol 9, pp.561-567.
- [26] **K. Emery, J. Burdick, Caiyem, Y. Dunlavy, D. Field, H. Kroposki, B. Moriarty, T. Ottoson, L. Rummel, S. Strand, T. Wanlass,** , Temperature dependence of photovoltaic cells, modules and systems Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty Fifth IEEE, 13-17 Page(s):1275 – 1278, (1996).
- [27] POWER AFRICA Systèmes d'énergies solaires photovoltaïques autonomes et hybrides, 2020)
- [28] **L. Stoyanov**, Optimisation des systèmes multi-sources de production d'électricité à énergies renouvelables. Revue des Energies renouvelables, vol.10, pp 1-18, (2007).
- [29] Closing the medical oxygen gap in sub-Saharan Africa: A case for a decentralized hub-spoke network of pressure swing adsorption plants," Institute for Transformative Technologies (ITT) and Oxygen Hub, (2021).
- [30] **F. DeJuan , D. Howell , T. Reed , S. Harwood**, Feasibility Study for In-situ Oxygen Separation for Hospitals: Technical Report and Market Analysis O2 n-Site Inc. Capstone Design Project Spring (2006).
- [31] **JL. Rosell, M. Ibáñez**. Modelling power output in photovoltaic modules for outdoor operating conditions. Energy Convers Manage, vol 47: pp 2424–2430, (2006).

- [32] **GA. Gould, W. Scott** , Technical and clinical assessment of oxygen concentrators. Thorax, vol 40 pp 811-816, (1985).
- [33] **A. Sautegau, A. Dautzenberg** , Home controls of a sample of 2414 oxygenconcentrators.Eur RespirJ, vol 4, pp 227-231, (1991).
- [34] **B. Michael** MRCP FC(Anaes) Oxygen concentrators for the smaller hospital-a review. TROPICALDOCTOR, vol 22, pp 56-58, (1992).
- [35] **T. Huld. Muller, R and A. Gambardella**, A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. Solar energy, vol 86, pp 1803-1815, (2012).
- [36] **Carmo**, A comprehensive review on PEM water electrolysis, Volume 38, Pages 4901-4934, (2013).
- [37] **M. Pawlik**, « Etude de la passivation de surface du silicium cristallin type P par dépôt de couches atomiques d'alumine pour application aux cellules solaires à haut rendement », thèse de doctorat, université de Lile, p. 209, (2015).
- [38] Technologie solaire, « GUIDE : le Rendement et la Production d'un Panneau Solaire PV, PVT, TH », DualSun Blog., <https://news.dualsun.com/technologie-solaire/rendement-production-panneau-solaire-2019>, (consulté le 20 Novembre 2022).
- [39] **D. Lincot**, « Où en est la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire ? », Photoniques, no93, p. 37-43, (2018)
- [40]<https://www.cea.fr/multimedia/Pages/videos/culturescientifique/energies/fonctionnement-electrolyseur-pile-a-combustible.aspx>, 11 février 2023.
- [41] **A. Ursua, LM. Gandia, P. Sanchis**, Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends. Proceedings of the IEE 100(2):410e26, (2012).
- [42] **C. Marcelo, L. David, Fritzt, J. Mergel, D. Strolten**. A comprehensive review on PME water electrolysis, international journal of Hydrogen Energy, vol 38, pp 4901-4934, (2013).
- [43] **V.Schroder, B. Emonts, H. Janssen, HP. Schulze**, Explosion limits of hydrogen/oxygen mixtures at initial pressures up to 200 bar. Chemical Engineering & Technology; 27(8):847e51.water electrolysis. International journal of Hydrogen Energy. vol 38, pp 4901-4934, (2004).

- [44] **JH. Russell LJ. Nuttall, AP, Fickett**, Hydrogen generation by solid polymer electrolyte water electrolysis. American Chemical Society Division of Fuel Chemistry Preprints; 18(3):24e40, (1973).
- [45] **S. Slade, SA. Campbell, TR. Ralph, FC. Walsh**. Ionic conductivity of an extruded Nafion 1100 EW series of membranes. Journal of the Electrochemical Society, 149(12):A1556e64.
- [46] **F. Barbir**, PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. Solar Energy, vol 78 (5):661e9, (2002).
- [47] **P. Medina, M. Santarelli**. Analysis of water transport in a high pressure PEM electrolyzer. International Journal of Hydrogen Energy; vol 35 (11):5173e86, (2010).
- [48] **KE. Ayers, EB. Anderson , C. Capuano , B. Carter, L. Dalton , G. Hanlon**, Research advances towards low cost, high efficiency PEM electrolysis. In ECS Transactions; 33:3e15, (2010).
- [49] **SA. Grigoriev, AA. Kalinnikov P. Millet, VI. Poremsky, VN. Fateev**, Mathematical modeling of high-pressure PEM water electrolysis. Journal of Applied Electrochemistry; 40(5):921e32, (2010).
- [50] **D.S, Falcao, A.M, Pinto**, A review on PEM electrolyzer modelling: Guidelines for beginners. Journal of Cleaner Production 261, 121-184, (2020).
- [51] **P. Olivier, Bourasseau, C. Bouamama**, Low-temperature electrolysis system modelling: a review. Renew. Sustain. Energy Rev. vol 78, pp 280-300, (2017).
- [53] **S. J. Parry**, Abundance and distribution of palladium, platinum, iridium and gold in some oxide minerals. Chemical Geology; 3:115e25, (1984).
- [54] **W. Vielstich, H. Gasteiger, A. Lamm**, editors. Handbook of fuel cells—fundamentals, technology, applications. New York: Wiley, (2003).
- [55] **J. Larminie, A. Dicks**, Fuel cell systems explained. Chichester: John Wiley & Sons, (2000).
- [56] **Z. Abdin, CJ. Webb, EM. Gray**, Modelling and simulation of a proton exchange membrane (PEM) electrolyser cell. Int J Hydrog Energy, vol 40, pp 13243–13257, (2015).
- [57] **L. Mond, C. Langer.**, A new form of gas battery, communicated by Lord R.S. Rayleighs. Proceedings of the Royal Society of London, vol 6 : 296–304, (1889).

- [59] **V. Brano, G. Ciulla**, An efficient analytical approach for obtaining a five parameters model of photovoltaic modules using only reference data. *Applied Energy*, vol 111, pp 894–903. (2013).
- [60] **Humada**, Modeling of PV system and parameter extraction based on experimental data: Review and investigation. *Solar. Energy*, vol. 199, pp. 742–760, (2020).
- [61] **L. H. Lim, I. Ye, Z. Ye, J. Yang, D. and Du, H.**, A linear identification of diode models from single I-V characteristics of PV panels. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol 62, pp. 4181-4193, (2015).
- [62] **A. Orioli, and A. Di Gangi**, A procedure to calculate the five-parameter model of crystalline silicon photovoltaic modules on the basis of the tabular performance data. *Applied Energy*, vol 102, pp 1160–1177, (2013).
- [63] **G. Petrone, C.A. Ramos-Paja, G. Spagnuolo**, *Photovoltaic Sources Modeling*, 1st edn. Wiley-IEEE Press, New York, (2017).
- [64] **E Skoplaki, JA. Palyvos**, On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Sol Energy*, vol 83, pp 614–624, (2009).
- [65] **Ch. Hajjaj**, Evaluation, comparaisn and experimental validation of different PV power prediction models under semi-arid climate, vol 173, pp 476- 488, (2018).
- [66] **Gy. Gwang Kim**, Prediction Model for PV performance with correlation analysis of Environmental Variables, vol 99, pp 1-10, (2019).
- [67] **Y.J. Wang and P.-C. Hsu**, An investigation on partial shading of PV modules with different connection configurations of PV cells, *Energy*, vol. 36, pp. 3069–3078, (2011).
- [68] **S.K. Ngoh, S. Bakehe, P. Edouma Fils**, Green electricity and medical electrolytic oxygen from solar energy-a sustainable solution for rural hospitals. *Scientific African*, 17, Article 01389, (2022).
- [69] **A. Jain and A. Kapoor**, A new approach to study organic solar cell using Lambert W-function, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 86, pp. 197–205, (2005).
- [70] **I. Efstratios, Batzelis, G. nagnostou, Ch. Chakraborty, Pal Bikash**, Computation of the Lambert WFunction in Photovoltaic Modeling. *Lecture notes in electrical engineering* 615. Springer, vol 604, (2019).

- [71] **P. Santiago, Elena Roibás-Millán , J. Cubas et al**, Simplified lambert w-function math equations when applied to photovoltaic systems modeling. IEEE transactions on industry applications, (2021).
- [72] **G. Petrone, C. A. Ramos-Paja, and G. Spagnuolo**, Photovoltaic sources modeling, Wiley-IEEE Press, first edition, (2017).
- [73] **E. I. Batzelis, I. A. Routsolias, and S. A. Papathanassiou**, An explicit PV string model based on the Lambert W function and simplified MPP expressions for operation under partial shading, IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 5, pp. 301–312, (2014).
- [74] **E. I. Batzelis, I. A. Routsolias, S.A. Papathanassiou**, An explicit PV string model based on the Lambert W function and simplified MPP expressions for operation under partial shading. IEEE Trans. Sustainable Energy, vol5, 301–312, (2014).
- [75] **R. M. Corless, G. H. Gonnet, D. E. G. Hare, D. J. Jeffrey, and D. E. Knuth**, On the Lambert W function, Adv. Comput. Math., vol. 5, pp. 329–359, (1996).
- [76] **E. I. Batzelis and S. A. Papathanassiou**, A method for the analytical extraction of the single-diode PV model parameter, IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 7, pp. 504–512, (2016).
- [77] **E. I. Batzelis., G. Anagnostou, C. Chakraborty**, Computation of the Lambert W function in photovoltaic modeling. In Lecture notes in electrical engineering, 615. Springer, vol 604, (2019).
- [78] **P. Santiago, Roib´ as-Mill´ , E. Cubas**, Simplified lambert w-function math equations when applied to photovoltaic systems modeling. IEEE Transactions on Industry Applications, vol 57, pp 1779–1788, (2021).
- [79] **E. I. Batzelis and S. A. Papathanassiou**, A method for the analytical extraction of the single-diode PV model parameters, IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 7, pp. 504–512, (2016).
- [80] **D. Barry, J.-Y. Parlange, L. Li, H. Prommer, C. Cunningham, and F. Stagnitti**, Analytical approximations for real values of the Lambert W-function, Math. Comput. Simul, vol. 53, pp. 95–103, (2000).
- [81] **M. Carmo, D. L. Fritz, J. Mergel, and D. Stolten.**, A comprehensive review on PEM water electrolysis. International Journal of Hydrogen Energy, vol 38, pp 4901–4934, (2013).
- [82] **W. Hug, Bussmann H, A. Brinner**, Intermittent operation and operation modeling of an alkaline electrolyzer. Int J Hydrog Energy; vol 18, pp 973–987, (1993).
- [83] **SA. Grigor’ev, MM. Khaliullin, NV. Kuleshov, VN. Fateev**, Electrolysis of water in a System with a solid polymer electrolyte at elevated pressure. Russ J Electrochem;vol 37, pp 819–822, (2001).

- [84] **O. Kazuo, M. Toshio, H. Takeshi, K. Misaki, N. Ryouhei, I. Kohei.** Performance analysis of polymer-electrolyte water electrolysis cell at a small-unit test cell and performance prediction of large stacked cell. *J Electrochem*, vol 149, (2002).
- [85] **P. Baurens, P. Serre-Combe, J-P Poirot-Crouvezier . IN. Fuel cells, JC. Sabonnadière,** editor. Low emission power generation technologies energy management. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, p. 179–262. (2013).
- [86] **F. Barbir,** PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. *Sol Energy*; vol 78, pp 661–669, (2005).
- [87] **H. Görgün,** Dynamic modelling of a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer. *Int J Hydrog Energy*, vol 31, pp 29–38, (2006).
- [88] **L. Bonghwan, Kiwon, K. Hyung-Man,** Dynamic simulation of PEM water electrolysis and comparison with experiments. *Int J Electrochem*, vol 8, pp 235–248, (2012).
- [89] **R. Ga-Valverde, Espinosa, Urbina N,** A. simple PEM water electrolyser model And experimental validation. *Int J Hydrog Energy*, vol 37, pp 1927–38, (2012).
- [90] **KS. Agbli, Péra, MC. Hissel, D. Rallières, O. Turpin, C. Doumbia,** Multiphysics I. simulation of a PEM electrolyser: energetic macroscopic representation approach. *Int J Hydrog Energy*, vol 36, pp 1382–98., (2011).
- [91] **U. Øystein,** Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach. *Int J Hydrog Energy*, vol 28:21–33, (2003).
- [92] **P. Artuso, Rupert Gammon, F. Orecchini, Simon, J. Watson,** Alkaline electrolyzers: model and real data analysis. *Int J Hydrog Energy*, vol 36, pp 7956–62, (2011).
- [93] **M. Maruf-ul-Karim, Iqbal MT,** Dynamic modeling and simulation of alkaline type electrolyzers. In: *Can. Conference Electr. Comput. Eng. CCECE 09*, (2009).
- [94] **C. Rozain,** Développement de nouveaux matériaux d'électrodes pour la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. Orsay, France: Université Paris Sud – Paris XI, (2013).
- [95] **RL. LeRoy, CT. Bowen, DJ. LeRoy.** The thermodynamics of aqueous water electrolysis. *J Electrochem Soc*, vol 127, pp 1954–62, (1980).

- [96] **M. Hammoud, C. Henao, K. Agbossou, Y. Dubé, M. Doumbia**, New multi-physics approach for modelling and design of alkaline electrolyzers. *Int J Hydrog Energy*, vol 37, pp 13895–13913, (2012).
- [97] **P. Baurens, P. Serre-Combe, P.-J. Poirot-Crouvezier**, Fuel cells. In: Sabonnadière JC, editor. *Low emission power generation technologies energy management*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc; p. 179–262. (2013).
- [98] **B. Han, J. Mo, F.-Y. Zhang**, Electrochemical performance modeling of a proton exchange membrane electrolyzer cell for hydrogen energy. *Int J Hydrog Energy*, vol 40, pp 7006–16, (2015).
- [99] **R. García-Valverde, N. Espinosa, N. Urbina**, A simple PEM water electrolyser model and experimental validation. *Int J Hydrog Energy* vol 37, pp 27–38, (2012).
- [100] **M. Hammoudi, C. Henao, K. Agbossou, Y. Dubé, ML. Doumbia**, New multi-physics approach for modelling and design of alkaline electrolyzers. *Int J Hydrog Energy*, vol 37, pp 895–913, (2012).
- [101] **F. Marangio, M. Santarelli, M. Calì**, Theoretical model and experimental analysis of a high pressure PEM water electrolyser for hydrogen production. *Int J Hydrog Energy*, Vol 34, pp 43–58, (2009).
- [102] **H. Christian, K. Agbossou, M. Hammoudi, Y. Dubé, A. Cardenas**, Simulation tool based on a physics model and an electrical analogy for an alkaline electrolyser. *J Power Sources*, pp 58–67, (2014).
- [103] **Ch. Pyoungcho, DG. Bessarabov, R. Datta**, A simple model for solid polymer electrolyte (SPE) water electrolysis. *Solid State Ion*, vol 175, pp 535–900 (2004)
- [104] **K. Huiyong, P. Mikyoung, Lee Kwang Soon**, One-dimensional dynamic modeling of a high-pressure water electrolysis system for hydrogen production. *Int J Hydrog Energy*, vol 38, pp 596–609, (2013).
- [105] **Z. Abdin, CJ. Webb, EM. Gray**, Modelling and simulation of a proton exchange membrane (PEM) electrolyser cell. *Int J Hydrog Energy*, vol 40, pp 43–57, (2015).
- [106] **T. Yigit, Selamet**, Mathematical modeling and dynamic Simulink simulation of high-pressure PEM electrolyzer system. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol 41, 13901–13914, (2016).

- [107] **SA. Grigor'ev, MM Khaliullin, NV. Kuleshov, VN Fateev**, Electrolysis of water in a System with a solid polymer electrolyte at elevated pressure. *Russ J Electrochem*; vol 37 pp 819–822, (2001).
- [108] **SA. Grigoriev, AA. Kalinnikov, P. Millet, VI. Poremsky, VN .Fateev**, Mathematical modeling of high-pressure PEM water electrolysis. *J Appl Electrochem*, vol 40, pp 921–932, (2010).
- [109] **Lee Bonghwan, P. Kiwon, Kim. Hyung-Man**, Dynamic simulation of PEM water electrolysis and comparison with experiments. *Int J Electrochem*, vol 8, pp 235–248, (2012).
- [110] **R. García-Valverde, Espinosa, N. Urbina**. A simple PEM water electrolyser model and experimental validation. *Int J Hydrog Energy*, vol 37, pp1927–1938, (2012).
- [111] **KS. Agbli , Péra , MC. Hissel, Rallières D, O. Turpin , C. Doumbia** , Multiphysics I. simulation of a PEM electrolyser: energetic macroscopic representation approach. *Int J Hydrog Energy*, vol 36, pp 1382–1398, (2011).
- [112] **Sh. Muzhong, N. Bennett, D. Yulong, Scott Keith**. A concise model for evaluating water electrolysis. *Int J Hydrog Energy*, vol 36, pp14335–14341, (2011).
- [113] **U. Alfredo, P. Sanchis**. Static–dynamic modelling of the electrical behaviour of a commercial advanced alkaline water electrolyser. *Int J Hydrog Energy*, vol 37, pp 18598–18614, (2012).
- [114] **L. Julien**. L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés. *École Nationale Supérieure des Mines de Paris*; (2006).
- [115] **C. Darras**, Modélisation de systèmes hybrides photovoltaïque/hydrogène: applications site isolé, micro-réseau et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE (ANR PAN-H). Corte, France: thèse de doctorat Université Pascal Paoli; (2010).
- [116] **O. Selamet, MC. Acar, Mat MD, Y.Kaplan**, Effects of operating parameters on the performance of a high-pressure proton exchange membrane electrolyzer. *Int J Energy Res*, vol 37, pp 457–467, (2013).
- [117] **R. Kothari, D. Buddhi, RL. Sawhney**, Studies on the effect of temperature of the electrolytes on the rate of production of hydrogen. *Int J Hydrog Energy*, vol 30, pp 261–283, (2005).
- [118] **C. Lamy**, From hydrogen production by water electrolysis to its utilisation in a PEM fuel cell or in a SO fuel cell: Some considerations on the energy efficiencies. *International Journal of Hydrogen Energy* 41, vol 34, pp 15415-15425, (2016).
- [119] **T. Springer, TA. Zawodzinski, and S. Gottesfeld**, Polymer electrolyte fuel cell model. *Journal of the Electrochemical Society*, vol 8, pp 2334–2342, (1991)

- [120] **H. Görgün**, Dynamic modelling of a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer. *Int J Hydrog Energy*, vol 31, pp 29–38, (2006).
- [121] **Huld, T. Muller, R and Gambardella**, A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. *Solar energy*, vol 86, pp 1803-1815, (2012).
- [122] **H. Georgün**, Dynamic modelling of a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer, *Int. J. Hydrog. Energy*, vol 3, pp 129–138, (2006).
- [123] **Squadrito, G. Nicita, A, Maggio, G**, A sized-dependant financial evaluation of green hydrogen oxygen co-production. *Renewable Energy*, vol 163, pp 2165–2177, (2021).
- [124] **Kuckshinrichs, W. Ketelaer, T. Koj, J. C**, Economic analysis of improved alkaline water electrolysis. *Frontiers in Energy Research*, vol 5, (2017).
- [125] **G. Gunther, S. Reichelstein**, Economics of converting renewable power to hydrogen, In: *Nature Energy*, vol 4.3, pp. 216–222, (2019).
- [126] **H. Böhm, S. Goers, and A. Zauner**, Estimating future costs of power to-gas a component-based approach for technological learning, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol, pp 44- 59, (2019).
- [127] IRENA, *Renewable Power Generation Costs in 2020*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ISBN 978-92-9260-348-9, (2021).
- [128] **Schmidt, et al**, The future cost of electrical energy storage based on experience rates, *Nature Energy*, Vol. 2/8, (2017).
- [129] **E. Vartiainen, G. Masson, C. Breyer, D. Moser, R Medina**. Impact of weighted average cost of capital, capital expenditure, and other parameters on future utility-scale PV levelized cost of electricity. *Prog Photovolt Res*, vol 28, pp 439–453, (2020).
- [130] **E. Vartiainen, G. Masson, C. Breyer, D. Moser, E. Román Medina**, Impact of weighted average cost of capital, capital expenditure, and other parameters on future utility-scale PV levelised cost of electricity. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol 28, pp 439–453, (2020).

**Liste des publications issues de la thèse.**

1. **Prosper Edouma Fils, Simon Koumi Ngoh , Inoussah MOUNGNUTOU Mfetoum , Jean Luc Nsouandele** . Design and economic analysis of an on-site electrolytic medical oxygen and solar electricity production system in a sunny country. Energy for Sustainable Development. Vol 72, P 314-325. doi.org/10.1016/j.esd.2023.01.002.(2022).
2. **Koumi Ngoh, S., Bakehe, J. F., Prosper Edouma Fils.** Green electricity and medical electrolytic oxygen from solar energy a sustainable solution for rural hospitals. Scientific African, vol 17, doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01389 (2022).