

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix - Travail - Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I
ECOLE NORMALE SUPERIEUR
D'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE
D'EBOLOWA
DEPARTEMENT DE GENIE
ELECTRIQUE



REPUBLIC OF CAMEROUN

Peace - Work - Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I
HIGHER TECHNICAL TEACHER
TRAINING COLLEGE OF
EBOLOWA
DEPARTMENT OF ELECTRICAL
ENGINEERING

**Filière
Electrotechnique (ET)**

**DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME A BASE
D'ELECTROLYSEUR ET
PILE A COMBUSTIBLE POUR L'AMELIORATION DE L'OFFRE
DE
L'ENERGIE ELECTRIQUE ET FLUIDES EN MILIEU
HOSPITALIER**

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de
Professeur d'Enseignement Technique et Professionnel de deuxième
grade (DIPET II)

Par : AMENG Julien Dieudonné

Sous la direction de
Dr. KOUMI NGOH Simon
Chargé de cours, Université de
Douala
TOLOK NELEM Aristide
Assistant, Université de Yaoundé I

Année Académique : 2019 - 2020



Fiche de certification de l'originalité du travail

Je soussigné AMENG Julien Dieudonné, atteste que le présent Memoire de fin d'étude en vue de l'obtention du grade de Professeur des Lycées d'Enseignement Technique et Professionnel (PLETP) en Génie Électrique option Électrotechnique est le fruit de mes propres travaux effectués à l'École Normale Supérieure d'Enseignement Technique (ENSET) d'Ebolowa de l'Université de Yaoundé I, sous la direction du Dr. KOUMI NGOH Simon, Chargé de Cours à l'université *de Douala*, l'encadrement de M. TOLOK NELEM Aristide, *Assistant, Université de Yaoundé I.*

Ce travail est authentique et n'a pas encore fait l'objet d'une présentation pour l'obtention d'un diplôme universitaire.

Visa de l'auteur

AMENG Julien Dieudonné

Visa du directeur de mémoire

Dr. KOUMI NGOH Simon

Dédicace

À
Ma
Famille

Remerciements

Ce travail est le fruit de toutes les grâces dont me comble le bon Dieu, à qui je dois la vie ainsi que toutes mes réalisations sur cette terre ; Tout est grâce, merci Seigneur !

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos remerciements les plus sincères au Docteur KOUMI NGOH Simon chargé de cours à l'université de Yaoundé I, M. TOLOK Aristide, Assistant à l'université de Yaoundé I, M. PESDJOCH Mathieu, professeur des lycées d'enseignement technique, sous la direction, l'encadrement et le Co-encadrement de qui nous avons eu l'honneur et le plaisir de travailler. Leurs compétences, leurs conseils, leurs critiques, leur rigueur scientifique et leur entière disponibilité nous ont permis de mener ce travail à son terme. Merci pour vos échanges scientifique et que Dieu vous bénisse et vous comble de grâces.

Nous tenons aussi à exprimer notre gratitude et nos remerciements sincères à Madame le Directeur de l'ENSET d'Ebolowa et Chef de Département de Génie Electrique, Professeur NDJAKOMO ESSIANE Salomé, pour son suivi, son orientation et sa rigueur au plan académique. Ses conseils, ses critiques, sa rigueur au travail et son entière disponibilité nous ont permis de mener à bien notre cursus académique.

Nous exprimons également, nos remerciements à nos camarades tous futurs enseignants pour les moments chaleureux, conseils et la disponibilité dont-ils ont fait preuve. C'est par ce vivre ensemble que nous avons mené à bien notre cursus jusqu'à la rédaction de ce mémoire ;

Nous remercions toute notre famille, en particulier notre mère MEZE'E EBOUTOU Angeline et à ma fiancé Mme MBPILE MAMIAH Annick, pour le soutien multi forme et encouragements apportés durant notre séjour académique à l'ENSET d'Ebolowa et durant tous notre parcours scolaire ;

C'est avec beaucoup d'émotions que nous exprimons nos remerciements à notre chaleureuse famille d'accueil qui ne cessent de créer un esprit chaleureux afin que nous soyons motivés par l'esprit de travail.

Nos excuses à ceux ou celles dont les noms nous ont échappés, Nous pensons tout de même à eux. Merci !!

Liste des abréviations

P_{AC} : Pile à combustible

PV : Photo Voltaïque

EL : électrolyseur

P_{CPV} : Puissance du champ photovoltaïque [kW]

P_{PAC}: Puissance de la pile à combustible [kW]

GE : Groupe Electrogène

PEM : Proton Exchange Membrane

PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Cell

NTE : Nouvelles Technologies Energétiques

CA : Courant Alternatif

CC : Courant Continu

kW : Kilowatt

AME : Assemblages Membrane-Electrode

U_{cel} : Tension Cellule

N_{cel} : Nombre de Cellule

P_{Telec} : Puissance Totale d'Electrolyseur

Résumé

Ce travail a pour but : de développer un micro-réseau hybride pour l'amélioration de la qualité d'énergie électrique et fluide (cas applicable dans l'alimentation d'un hôpital au Cameroun). Il nous a été donné de constater que, les dysfonctionnements ou défaillances des équipements en milieu hospitalier sont généralement causés par l'instabilité de l'alimentation électrique. Aussi, l'insuffisance ou l'instabilité de l'oxygène pour les unités de réanimation ne permettent pas aux personnels soignants de mieux travailler. Ce constat s'est renforcé avec la pandémie de la COVID-19 qui a étalé le déficit absolu des dispositifs et ressources de prise en charge des patients en situation des détresses respiratoire.

Après une définition des systèmes à micro-réseaux hybrides selon la revue de littérature et le développement effectué dans les deux premiers chapitres, l'architecture retenue est un micro-réseau hybride PV- PAC-électrolyseur autonome pouvant être relié ou non au réseau électrique existant.

Après avoir présenté les méthodes de développement du système, nous avons opté pour une modélisation technologique d'une part associée aux différentes équations mathématiques suivie d'une représentation dans MATLAB/SIMULINK ; et d'une autre part une modélisation économique qui a consisté à dimensionner de façon individuelle ses différents éléments.

Mots-clés : Système multi source ; pile à combustible ; générateur photovoltaïque ; électrolyseur ; stockage ; modélisation ; optimisation ; dimensionnement.

Abstract

The aim of this work is to develop a hybrid micro-energy system for improving the quality of electrical and fluid energy (case applicable to the supply of a hospital in Cameroon). Equipment malfunctions or failures in a hospital environment are usually caused by instability of the power supply. Also, oxygen deficiency or instability for resuscitation units does not allow health care personnel to work better. This finding was reinforced by the COVID-19 pandemic, which spread the absolute deficit of devices and resources for managing patients in respiratory distress.

After a definition of hybrid micro-grid systems according to the literature review and the development carried out in the first two chapters, the architecture chosen is a hybrid micro-grid PV- PAC-Stand-alone electrolyzer that can be connected or not to the existing power grid.

After presenting the development methods of the system, we opted for a technological modelling associated with the different mathematical equations followed by a representation in MATLAB/SIMULINK; and on the other hand, an economic modelling which consisted in individually sizing its various elements.

Keywords: Multi Source System; Fuel Cell; Photovoltaic Generator; Electrolyzer; Storage; Modeling; Optimization; Sizing.

Table des matières

| | |
|--|-----------------|
| <i>Dédicace</i> | <i>i</i> |
| <i>Epigraphie</i> | <i>ii</i> |
| <i>Remerciements</i> | <i>iii</i> |
| <i>liste des abréviations</i> | <i>iv</i> |
| <i>Résumé</i> | <i>v</i> |
| <i>Abstract</i> | <i>vi</i> |
| <i>Table des matières</i> | <i>vii</i> |
| <i>Table des figures</i> | <i>viii</i> |
| <i>Liste des tableaux</i> | <i>ix</i> |
| <i>Introduction générale</i> | <i>1</i> |
| <i>Chapitre 1 : Etat de l'art sur les micro-réseaux</i> | <i>2</i> |
| 1. <i>Introduction</i> | <i>2</i> |
| 1.1. <i>Sources d'énergies</i> | <i>2</i> |
| 1.2. <i>Les systèmes d'énergie multi-sources</i> | <i>3</i> |
| 1.2.1. <i>Définition</i> | <i>3</i> |
| 1.2.2. <i>Classification des systèmes hybrides</i> | <i>3</i> |
| 1.2.2.1. <i>Le régime de fonctionnement</i> | <i>4</i> |
| 1.2.2.2. <i>Les structures des systèmes hybrides</i> | <i>5</i> |
| 1.2.2.3. <i>Convertisseurs statiques</i> | <i>5</i> |
| 1.3. <i>Les électrolyseurs</i> | <i>6</i> |
| 1.3.1. <i>Les électrolyseurs alcalins</i> | <i>7</i> |
| 1.3.2. <i>Les électrolyseurs à membrane échangeuses de protons</i> | <i>9</i> |

| | |
|---|-----------|
| 1.3.3. <i>L'électrolyseur haut température</i> | 11 |
| 1.4. <i>La pile à combustible type PEMFC</i> | 12 |
| 1.4.1. <i>principe de fonctionnement de la pile PEMFC</i> | 12 |
| 1.5. <i>Conclusion</i> | 13 |
| Chapitre 2 : Modélisation, architectures et calculs | 15 |
| 2.1. <i>Introduction</i> | 15 |
| 2.2. <i>Schéma descriptif du système</i> | 16 |
| 2.3. <i>Système de contrôle</i> | 17 |
| 2.4. <i>Modélisation et calculs</i> | 18 |
| 2.4.1. <i>Modélisation du système PV</i> | 18 |
| 2.4.2. <i>Modélisation des électrolyseurs PEM</i> | 22 |
| 2.4.3. <i>Aspects thermodynamique, cinétique et énergétique</i> | 25 |
| 2.4.4. <i>Modèle statique du système électrolyseur de référence</i> | 27 |
| 2.5. <i>Dimensionnements</i> | 29 |
| 2.5.1. <i>Dimensionnement de l'électrolyseur</i> | 29 |
| 2.5.2. <i>Dimensionnement de la pile à combustible</i> | 31 |
| 2.5.3. <i>Dimensionnement des panneaux PV</i> | 31 |
| 2.6. <i>Dispositif de commutation</i> | 33 |
| 2.6.1. <i>Description de la séquence de commutation des sources</i> | 33 |
| 2.7. <i>Algorithme de gestion des sources</i> | 34 |
| 2.7.1. <i>Différents modes de fonctionnement du système</i> | 34 |
| 2.7.2. <i>Algorithme de commande</i> | 36 |
| 2.8. <i>Conclusion</i> | 37 |
| Chapitre 3 : Simulation, résultats et analyses | 38 |
| 3.1. <i>Introduction</i> | 38 |

| | |
|--|----|
| 3.2. <i>Présentation des résultats en simulation</i> | 38 |
| 3.3. <i>Base métrologique</i> | 39 |
| 3.4. <i>Simulation du générateur PV</i> | 39 |
| 3.4.1. <i>Simulation des caractéristiques I-V et P-V du panneau</i> | 40 |
| 3.5. <i>Résultats et analyses</i> | 42 |
| 3.5.1. <i>Caractéristique de la puissance du panneau PV en fonction de l'éclairement</i> | 43 |
| 3.5.2. <i>Production d'hydrogène en fonction de la puissance des panneaux PV</i> | 43 |
| 3.5.3. <i>Production d'oxygène en fonction de la puissance des panneaux PV</i> | 44 |
| 3.5.4. <i>L'énergie électrique en sortie de PAC en fonction de la puissance des PV</i> | 44 |
| 3.6. <i>Analyse des alimentations électriques</i> | 45 |
| 3.7. <i>Conclusion</i> | 47 |
| <i>Conclusion générale</i> | 48 |
| <i>BIBLIOGRAPHIE</i> | 49 |
| <i>ANNEXE</i> | 52 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| <i>Figure 1.1 : système hybride avec électrolyseur et PAC.....</i> | 3 |
| <i>Figure 1.2 : vue générale d'un système multi-source.....</i> | 4 |
| <i>Figure 1.3 : synoptique des interactions multi-physique dans l'environnement d'électrolyse...</i> | 7 |
| <i>Figure 1.4 : procédé électrolyse alcaline</i> | 8 |
| <i>Figure 1.5 : schéma de principe de la cellule d'un électrolyseur PEM.....</i> | 10 |
| <i>Figure 1.6 : principe d'une cellule d'EVHT.....</i> | 11 |
| <i>Figure 1.7 : principe de fonctionnement d'une pile PEMFC.....</i> | 13 |
| <i>Figure 2.1 : schéma descriptif du système hybride</i> | 16 |
| <i>Figure 2.2 : schéma algorithmique de la demande</i> | 17 |
| <i>Figure 2.3 : schéma équivalent du modèle à une diode</i> | 18 |
| <i>Figure 2.4 : Configuration générale du système électrolyseur PEM.....</i> | 22 |
| <i>Figure 2.5 : représentation du circuit électrique équivalent d'un stack électrolyseur PEM</i> | 23 |
| <i>Figure 2.6 : modèle Bond Graph d'une pile à combustible réversible PEM.....</i> | 24 |
| <i>Figure 2.7 : flux entrant/sortant et traversant la membrane du stack PEM.....</i> | 27 |
| <i>Figure 2.10 : circuit d'interface de commutation.....</i> | 33 |
| <i>Figure 2.11 : Algorithme de commande.....</i> | 36 |
| <i>Figure 3.1 : schéma de simulation sous Matlab Simulink</i> | 39 |
| <i>Figure 3.2 : schéma du générateur PV.....</i> | 40 |
| <i>Figure 3.3 : évolution des caractéristiques I-V du panneau PV.....</i> | 40 |
| <i>Figure 3.4 : puissance maximale extraite par le panneau PV</i> | 41 |
| <i>Evolution des caractéristiques P-V do panneau PV</i> | 41 |
| <i>Figure 3.5 : évolution de l'éclairement en fonction de la puissance max des panneaux PV.....</i> | 43 |
| <i>Figure 2.6 : Evolution journalière de la puissance maxi au cours de la journée</i> | 43 |
| <i>Figure 3.7 : production d'oxygène en fonction de la puissance maximale des panneaux PV.....</i> | 44 |
| <i>Figure 3.8 : puissance de la pile à combustible en fonction de la puissance du PV</i> | 44 |
| <i>Figure 3.9 : Production d'oxygène au cours d'une journée.....</i> | 45 |
| <i>Figure 3.10 : Evolution de la de l'énergie en sortie de la pile à combustible en fonction de la puissance maximale des panneaux PV.....</i> | 45 |
| <i>Figure 3.11 : caractéristique de la puissance de la pile en fonction de la consommation...</i> | 45 |
| <i>Figure 3.12 : analyse comparative.....</i> | 46 |

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Classification des systèmes par gamme de puissance

Tableau 1.2: technologies d'électrolyseur [19]

Tableau 2.1 : tableau récapitulatif des caractéristiques de l'électrolyseur

Tableau 2.2 : tableau récapitulatif des caractéristiques de la pile

Tableau 2.3 : tableau récapitulatif des caractéristiques du champ PV

Tableau 2.4 : Etat de chaque composant constituant du système

Tableau 2.5 : Différents scénarios de fonctionnement du système

Introduction générale

La situation énergétique du monde est caractérisée par une pénurie ou crise énergétique qui affecte l'ensemble des secteurs de la société. Le contexte est donc celui de l'urgence et de la contrainte. L'urgence, c'est de s'engager rapidement dans des réductions sévères de nos émissions de gaz à effet de serre afin de tenir les objectifs fixés pour 2050. La contrainte, c'est la réorganisation en profondeur de nos sociétés pour s'affranchir des énergies fossiles, en faisant appel à des sources d'énergies alternatives et à des modes de production et de consommation énergétiquement beaucoup plus sobres. Les nouvelles technologies énergétiques (NTE) requises pour sous-tendre un tel système énergétique propre et durable s'inscrivent dans un réseau de contraintes extrêmement sévères, tant techniques que socioéconomiques.

Dans le cas particulier du Cameroun, malgré un bouquet énergétique primaire diversifié, l'offre de l'énergie a stagné dans la décennie 90 et depuis 2001, est devenue structurellement déficitaire, plongeant ainsi le pays dans une importante crise énergétique. Ce déficit énergétique marqué par la rationalisation (délestage) de l'énergie constitue l'un des principaux freins au développement du tissu industriel et social du pays. En ce qui concerne particulièrement des hôpitaux, le déficit énergétique est accompagné d'une insuffisance et même d'une absence totale des fluides médicaux comme l'oxygène (indispensable pour les patients en détresse respiratoire). Des solutions initiatives multiples sont entreprises par les pouvoirs publics, les universitaires et centres de recherches dans le but d'apporter des solutions conjoncturelles et structurelles aux déficits sus évoqué. En nous alignant sur cette dynamique de groupe qui oriente la recherche scientifique vers la résolution du problème de l'humain, le mémoire de DIPET II présenté et articulé autour de la thématique: « **développement d'un système à base d'électrolyseurs et de pile à combustible pour l'amélioration de l'offre de l'énergie électrique et fluide en milieu hospitalier** ».

Pour adresser les différentes questions qui découlent de la thématique, nous présentons au chapitre 1 l'état de l'art des micro-réseaux. Cette connaissance de l'état de l'art sera suivie par la description au chapitre 2 de l'architecture et des modèles représentatifs des différents composants du micro-réseau. En fin au chapitre 3 nous présentons une synthèse des simulations et principaux résultats issus du mémoire.

Etat de l'art

1. Introduction

Face au tarissement des énergies fossiles et au réchauffement climatique, le développement de sources d'énergies propres semble de plus en plus nécessaire en particulier les énergies renouvelables qui sont une alternative intéressante pour l'électrification des sites isolés ou difficiles d'accès qui ne permettant pas le raccordement à un réseau électrique. Cependant, les énergies photovoltaïques ont pour défaut de dépendre des conditions météorologiques et présentent un caractère intermittent qui les rend difficiles à prévoir avec précision. Avec la dualité des PV et PAC un système multi source pourra palier aux différentes intermittences créées par les conditions météorologiques. Afin de faire un choix argumenté d'architecture, de dimensionnement, et de stratégie de contrôle du système, nous présentons dans ce premier chapitre l'état de l'art des architectures des micro-réseaux hybride, des convertisseurs et des différents types de sources. Nous verrons à la suite des types de commandes utilisés pour mettre en œuvre un tel système. Après avoir confronté les différentes solutions de contrôle, nous définirons ainsi en détails le système à étudier et les solutions à mettre en œuvre, afin de remplir les objectifs de maximisation de la production et de la durée de vie du système.

1.1 Sources d'énergie

Une source d'énergie est issue d'un élément naturel, l'eau, le vent, le soleil, la chaleur du sous-sol, ou d'un phénomène naturel, la combustion, la fission nucléaire, l'activité musculaire. Elle permet de produire de l'énergie mécanique, thermique ou électrique [1]. Les sources d'énergie se répartissent en deux grands segments : les matières premières (sources primaires) et les phénomènes naturels (énergies renouvelables). De manière générale, les premières fournissent les énergies dites fossiles alors que les secondes fournissent les énergies dites renouvelables [2].

1.2 Les systèmes d'énergie multi sources [5]

1.2.1 Définition

Un système d'énergie multi-sources encore appelé « système d'énergie hybride » est un système combinant différentes sources d'énergie d'origines renouvelables ou bien couplé avec des sources d'énergies conventionnelles (GE, etc...), différents éléments de stockages et différentes charges. Ces systèmes disposants de plusieurs sources, permettent la disponibilité en tout temps de l'énergie et ainsi la compensation en mauvais temps du caractère intermittent des sources renouvelables et offrent un rendement énergétique global plus élevé que les systèmes constitués d'une seule source d'énergie. Les systèmes multi-sources sont capables d'un fonctionnement autonome et parfois connecté au réseau électrique conventionnel.

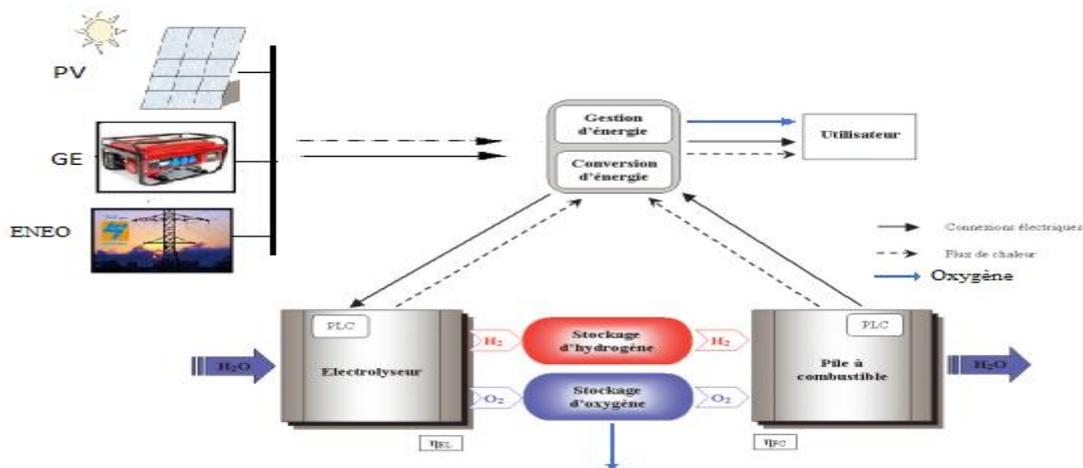


Figure 1.1 : système hybride avec électrolyseur et PAC

Néanmoins, dans certains systèmes produisant une faible puissance et connectés à un réseau électrique, la puissance délivrée par les systèmes hybrides peut varier de quelques watts pour les applications domestiques à quelques mégawatts pour les systèmes utilisés dans l'électrification de petites îles. Ainsi, pour les systèmes hybrides ayant une puissance en dessous de 100 kW, la connexion mixte, bus à CA et bus à CC avec des batteries de stockage est très répandue et ces unités de stockage sont introduites pour renforcer le réseau en cas de défaillance. Dans ce cas, ils sont dimensionnés de manière à assurer un fonctionnement, éventuellement en mode dégradé, pour la durée de la coupure.

1.2.2 Classification des systèmes hybrides ou multi sources [3]

Le champ d'application des systèmes hybrides est très large et par conséquent, il est difficile de classer ces systèmes. On peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance (Tableau suivant).

Tableau 1.1: Classification des systèmes par gamme de puissance

| Puissance du SEH (kW) | Application |
|-----------------------|---|
| Faible : <5 | Systèmes autonome : Station de télécommunications, pompages de l'eau et autres applications isolées |
| Moyenne : 10-205 | Micro réseaux isolés : alimentation d'un village isolé, des zones rurales... |
| Grande : >500 | Grands réseaux isolés (ex : réseaux insulaires) |

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi. Dans la suite, nous présentons les classifications les plus répandues: le régime de fonctionnement, la structure du système hybride.

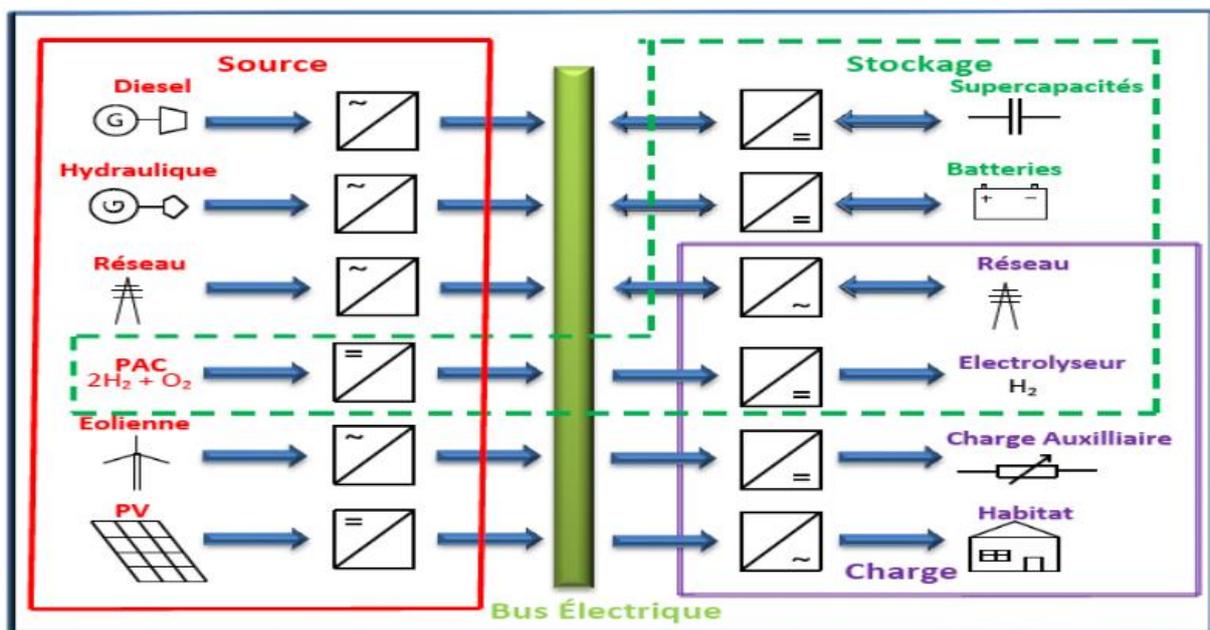


Figure 1.2: Vue générale d'un système Multi-Source

1.2.2.1 Le régime du fonctionnement

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes :

- Dans le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectés réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays.
- Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique : refuges de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière, etc.

1.2.2.2 La structure du système hybride

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système :

- Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet, une centrale tout entière.
- Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, etc. ...
- La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées.

La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimenté. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle, etc. [4]

1.2.2.3 Convertisseurs statiques ou électroniques de puissance

Dans les micros réseaux autonomes (isolés), il est possible d'utiliser des convertisseurs statiques (ou interfaces de puissance) pour la connexion de micro générateurs. Dans ce cas, ces dispositifs d'électronique de puissance sont responsables de maintenir le niveau de tension et de fréquence acceptables pendant le fonctionnement en mode autonome.

La conception des convertisseurs statiques est alors un aspect important à considérer pour la mise en œuvre des micros réseaux. Ces systèmes de conversion doivent être conçus en fonction de la source primaire à adapter, du système de stockage et du mode d'opération du micro réseau. D'une part, les systèmes qui produisent du courant alternatif et qui souvent

présentent des fréquences variables, comme certains types d'éoliennes, les micros-turbines, ou les volants d'inertie ont besoin d'un convertisseur C.A. - C.C. D'autre part, dans les systèmes de production et moyens de stockage à courant continu comme les systèmes photovoltaïques, les piles à combustible, ou les batteries, des convertisseurs C.C.- C.C. sont typiquement utilisés pour ajuster le niveau de tension C.C. Les onduleurs ou convertisseurs C.C. - C.A. sont utilisés pour convertir la tension C.C. au courant alternatif compatible avec le réseau conventionnel [6].

1.3. Les électrolyseurs

En dehors de la réformation des gaz, l'électrolyse de l'eau est le procédé le plus développé et le plus utilisé dans l'industrie de production d'hydrogène. L'électrolyse de l'eau est un procédé électrochimique permettant, grâce à de l'énergie électrique, de décomposer de l'eau en hydrogène et oxygène.

Les électrodes sont séparées par un électrolyte conducteur d'ions qui permet des transferts ioniques entre elles. Au cours de ce procédé, l'énergie électrique apportée au système est transformée en énergie chimique sous forme d'hydrogène. Depuis de nombreuses années, elle fait l'objet de plusieurs travaux et projets à petite et à large échelle [34,35].

Pour que se réalise ce processus réactionnel, des phénomènes multi physiques se produisent simultanément. Ce sont des phénomènes thermodynamique, chimique, électrochimique, fluide, thermique, et électrique. Etant donné que ces phénomènes couvrent plusieurs domaines physiques, la nécessité de les découpler par moment favorise une clarté de la description fonctionnelle du dispositif (électrolyseur). Le schéma ci-après met en évidence ces interactions multi domaines (Figure 1.11).

L'électrolyse de l'eau est une réaction exigeant à la fois de la chaleur et de l'électricité. Pour que les réactions se produisent, l'électrolyseur utilise une part de l'énergie électrique reçue pour vaincre la barrière de potentielle due à l'énergie libre de Gibbs (G) associée à ladite réaction. L'énergie électrique est fournie en appliquant aux bornes de l'électrolyseur une tension continue. Le caractère endothermique de la réaction en condition standard exige une énergie calorifique TS (où T représente la température et S , l'entropie) provenant de l'environnement d'électrolyse.

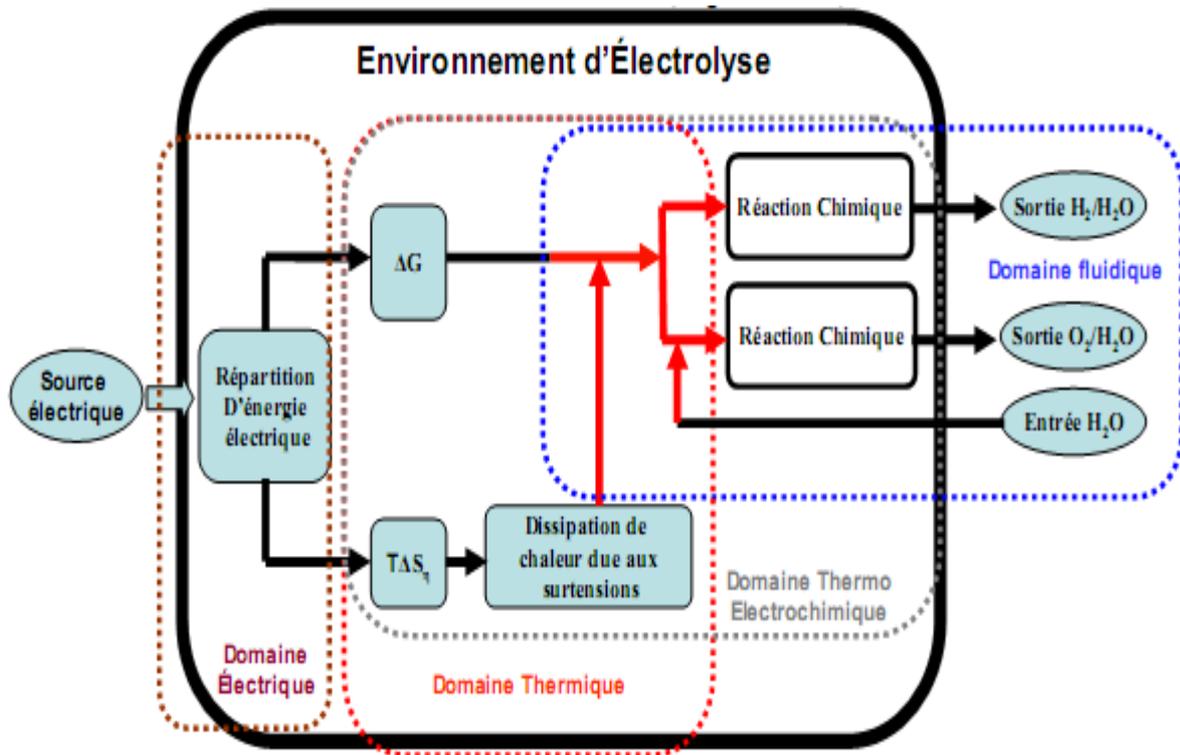


Figure 1.3 : Synoptique des interactions multi physiques dans l'environnement d'électrolyse

Les technologies électrolytiques de production d'hydrogène sont généralement de type alcalin, Proton Exchange Membrane (PEM), ou haute température.

1.3.1. Les électrolyseurs alcalins

Ils reposent sur l'utilisation d'une solution électrolytique (généralement de l'hydroxyde de potassium) pour la conductivité des ions.

L'électrolyse alcaline est la technologie la plus répandue pour la production d'hydrogène électrolytique, mais également pour la production de nombreux composés chimiques dont le chlore. Elle bénéficie ainsi d'une très grande maturité industrielle.

Dans un électrolyseur à technologie alcaline, l'électrolyte est une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH). La conduction ionique est alors assurée par les ions hydroxyde (OH^-) et potassium (K^+). Les réactions anodiques et cathodiques sont décrites ci-dessous :



La figure 1.4 ci-après illustre de manière schématique l'électrolyse alcaline.

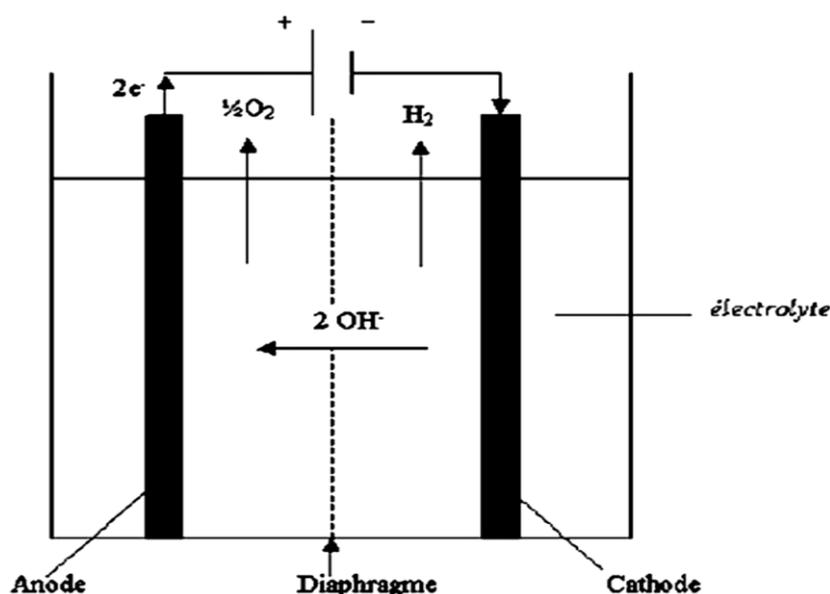


Figure 1.4. Procédé d'électrolyse alcaline.

L'anode est généralement en nickel ou en acier doux. Un dépôt surfacique catalytique est utilisé pour réduire les surtensions cathodiques. Il est constitué d'alliages de Nickel (Nickel-Soufre, Nickel de Raney, Nickel-Zinc) ou d'oxydes métalliques (alliages de Fer, Cobalt et Tungstène). Les alliages associés aux métaux de transition tels que : Al, Zn, Fe, Co, Cr et Mo sont présentés comme prometteurs pour le futurs.

La cathode est en acier nickelé ou en nickel massif. Le dépôt catalytique est un alliage Ni-Co avec une structure spinelle.

Le diaphragme est aussi un élément clé des électrolyseurs alcalins. Jusqu'au milieu des années 90, le matériau le plus utilisé pour constituer le diaphragme est l'amiante. Les problèmes de santé relatifs à l'amiante ont conduit au développement de matériaux de substitution. La Zircone était proposée mais non compatible avec une utilisation industrielle en raison de son coût élevé. Aujourd'hui, le matériau de base des diaphragmes semble être le nickel, sous formes d'oxydes.

On peut également noter l'emploi de membranes alcalines telles que : IMET® (Inorganic Membrane Electrolysis Technology) proposées par "Hydrogen Systems". La pression d'utilisation de tels systèmes est de 4 à 30 bars pour une consommation spécifique de 4,2 kWh/Nm³. Les débits d'hydrogène sont dans la gamme 1 à 60 Nm³/h.

L'électrolyte est généralement constitué d'une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH). Sa concentration massique est déterminée afin que l'électrolyte présente une conductivité maximale à la température de fonctionnement de l'électrolyseur. On peut ainsi

noter les concentrations typiques suivantes ; 25% en masse pour une température de 80 à 90°C ; 30-35% à 120°C ; et 40% à 160°C.

Les solutions de potasse sont préférées aux solutions de soude car elles présentent une meilleure conductivité à une température donnée. L'électrolyte doit présenter des concentrations en chlorures et en sulfates inférieures à 0,01 % en masse car ces composés détruisent la protection par nickelage ou le Nickel massif des anodes.

1.3.2. L'électrolyse à membrane échangeuse de protons

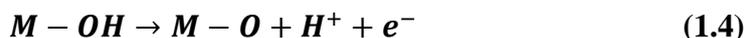
Cette technologie (PEM) dépend d'un précieux métal qui joue le rôle de catalyseur, le platine, et d'un électrolyte solide polymère pour le transfert des protons. Ce sont les mêmes matériaux utilisés que dans les piles à combustible PEMFC. Le processus réactionnel (Figure 1.5) dans la cellule PEM est résumé ci-après [36]:

A l'Anode

En présence de molécule d'eau sur la surface active M ou point de triple contact (catalyseur+membrane+électrode), il y a production de proton et adsorption de l'ion hydroxyde avec libération d'un électron.



La liaison hydroxyle de M-OH se rompt produisant plus d'électrons selon la réaction suivante :



Pendant que les électrons produits passent par le circuit extérieur pour rejoindre la cathode, les protons H^+ traversent la membrane PEM par bonds successifs sur les groupes sulfoniques ($-SO_3^- + H^+$) afin de rejoindre la cathode. Les liaisons M-O de l'anode se rompent pour donner du dioxygène, libérant les sites actifs pour un autre processus d'adsorption/désorption.

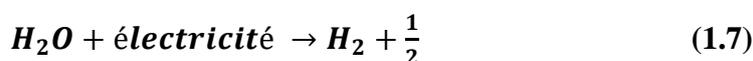


A la Cathode

Tout électron arrivant à la cathode récupère son orbite en présence de l'ion protonique H^+ .



Il en résulte la réaction globale suivante :



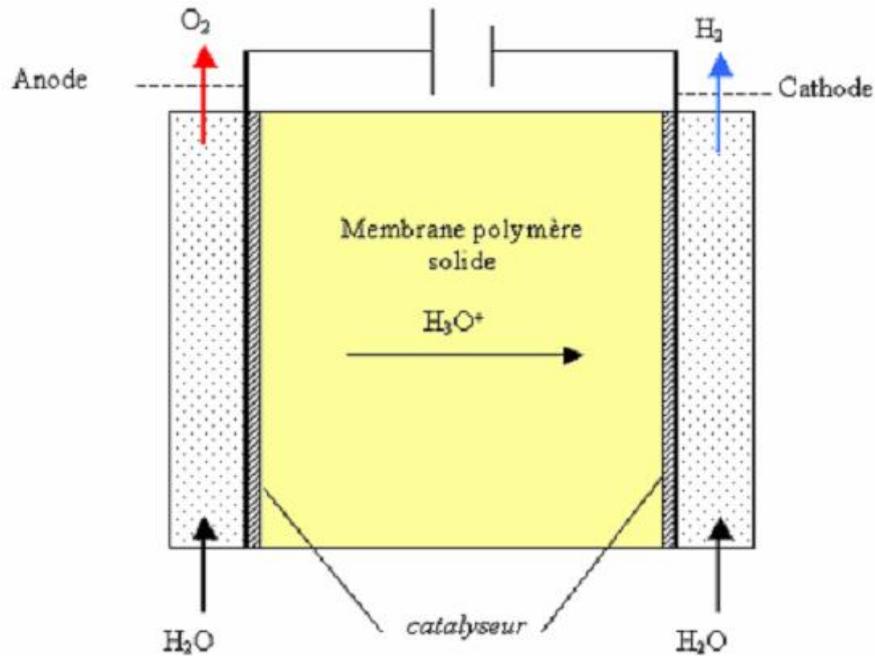
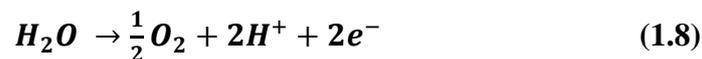


Figure 1.5 : Schéma synoptique de la cellule d'un électrolyseur PEM

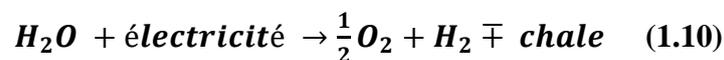
L'électrolyseur PEM nécessite une alimentation en eau à son anode et grâce à une différence de potentiel suffisante appliquée à ses bornes, l'eau est dissociée pour générer de l'oxygène à l'anode et de l'hydrogène à la cathode. Grâce à une tuyauterie inhérente, l'eau est acheminée à l'interface réactionnelle anodique. Les réactions chimiques 1.16 -1.18 synthétisent le processus présenté dans le point précédent. La réaction chimique anodique sera :



Les protons transitant par la membrane en présence d'électrons à l'électrode cathodique subiront la réaction suivante :



La réaction globale sera alors :



On pourrait catégoriser l'électrolyse PEM en deux types : électrolyse basse pression, pression en dessous de 30 bars, et l'électrolyse haute pression qui admet une pression allant de 30 bars à 135 bars [36]. Un électrolyseur PEM basse pression ou haute pression peut fonctionner à une température comprise dans la plage 80-150°C. Il a été relevé que les membranes perfluorosulfonées commencent à perdre leur tenue mécanique au-delà de 100°C, de sorte que leur fonctionnement jusqu'à 120°C est possible mais seulement au détriment de la durée de vie des Assemblages Membrane-Electrode (AME).

1.3.3. L'électrolyse haute température

Le principe de l'électrolyse à haute température repose sur la décomposition des molécules d'eau sous forme vapeur au niveau de la cathode. Cette décomposition dépend alors de la nature de l'électrolyte. Celui-ci peut assurer soit une conduction protonique soit une conduction d'ions superoxydes O^{2-} .

La cellule électrochimique élémentaire est constituée par l'assemblage de la cathode, de l'électrolyte et de l'anode. Elle fonctionne à température élevée dans ce procédé (entre 700 et 1000°C). Le schéma de principe d'une cellule d'électrolyse est présenté sur la Figure 1.14.

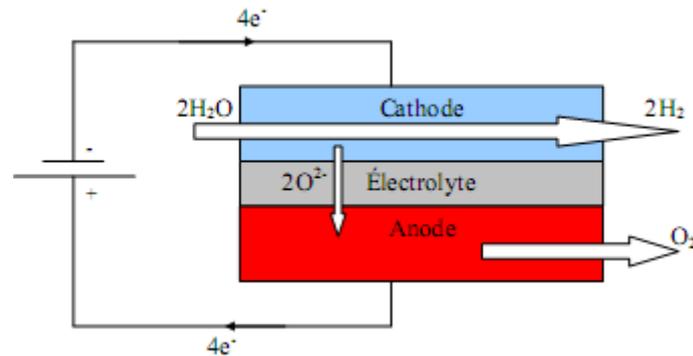
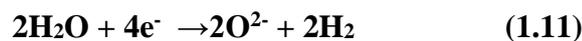


Figure 1.6 : Principe d'une cellule d'électrolyse d'EVHT.

- La vapeur d'eau est introduite à la cathode, et une réaction de réduction électrochimique est générée par le champ électrique dû à la différence de potentiel électrique imposée entre les électrodes de la cellule. Cette réaction conduit à la formation d'ions O^{2-} et d'hydrogène, lequel est évacué en sortie de la cellule avec le surplus de vapeur d'eau non transformée.



- A l'anode, les anions O^{2-} , migrant depuis la cathode à travers la membrane électrolytique sous l'effet du champ électrique, sont oxydés en dioxygène et évacués en sortie de la cellule :



Afin de faciliter l'évacuation de l'oxygène, un gaz de balayage (air, azote ou vapeur d'eau), est parfois ajoutée coté anode.

Tableau 1.2: technologies d'électrolyseur [19]

| Type | Electrolyte | Electrode | Réaction |
|---------------------------------|--|--|--|
| Alcalin KOH | KOH/NiO, IMETTM (Inorganic Membrane Electrolysis) | Anode: Ni, Fer/Ni alloys, metal oxide. Cathode : steel+Ni / Ni-Co | Anode : $4OH^- \rightarrow 2H_2O + O_2 + 4e^-$ Cathode: $4H_2O + 4e^- \rightarrow 2H_2 + 4OH^- + 4e^-$ |
| PEM | Proton Exchange Membrane (Nafion) | Anode : graphite-Ti/RuO ₂ , IrO ₂ Cathode : graphite+Pt/Pt | Anode : $H_2O \rightarrow 2H^+ + \frac{1}{2}O_2 + 2e^-$ Cathode : $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$ |
| SO Haute température | a) Zirconia ceramique. b) Zirconia oxide ceramics | Anode : ceramics Cathode : ZrNi cermet/CeO _x | a) Anode : $2O_2^- \rightarrow 2O_2 + 4e^-$ Cathode : $2H_2O + 4e^- \rightarrow 2O_2 + 2O_2^- + 2H_2$ b) Anode : $2H_2O \rightarrow 4H^+ + O_2 + 4e^-$ Cathode : $4H^+ + 4e^- \rightarrow 2O_2 +$ |

1.4. La pile à combustible type PEMFC

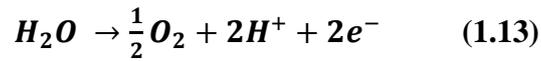
Nous ne nous intéresserons ici qu'aux piles de type PEMFC. Ce type de pile est actuellement très étudié car les applications sont multiples autant dans le domaine stationnaire que dans le domaine automobile et portable. Toutefois, certains problèmes scientifiques dans le cœur de pile restent à surmonter. Les différents atouts de ces dispositifs et leur robustesse restent encore à être démontrés pour convaincre les principaux acteurs de l'intérêt du développement d'une économie de l'hydrogène (production, distribution, stockage...).

1.4.1. Principe de fonctionnement de la pile PEMFC

Les piles PEMFC fonctionnent selon le principe inverse de l'électrolyse de l'eau. L'hydrogène est utilisé comme carburant et l'oxygène (ou l'air) sert de comburant. Le principe de fonctionnement des piles consiste à récupérer l'énergie de combustion de l'hydrogène pour la convertir en énergie électrique. La réaction globale se produisant dans la pile peut s'écrire.

Afin de récupérer l'énergie dégagée par la réaction, il est nécessaire de dissocier la réaction totale en deux demi-réactions, séparées spatialement par un électrolyte. L'électrolyte d'une pile PEMFC est une membrane polymère imperméable aux gaz, isolant les réactions d'oxydation de l'hydrogène à l'anode et de réduction de l'oxygène à la cathode. Cet électrolyte permet le passage de protons sans être conducteur électronique, donc sans passage d'électrons. Les groupements

acides présents dans sa structure, généralement SO₃H ou COOH, assurent le transfert des protons entre l'anode et la cathode.



Ces demi-réactions sont catalysées, à l'aide de platine en général, pour augmenter les cinétiques de réactions, relativement lentes aux faibles températures de fonctionnement de la pile. A l'anode, l'hydrogène se dissocie en protons et électrons. Les protons traversent alors l'électrolyte pour se recombinaer à la cathode avec les molécules d'oxygène, et ainsi former de l'eau. Les électrons circulent dans un circuit externe pour boucler le circuit électrique. Un schéma de fonctionnement est donné sur la Figure I. 2 .

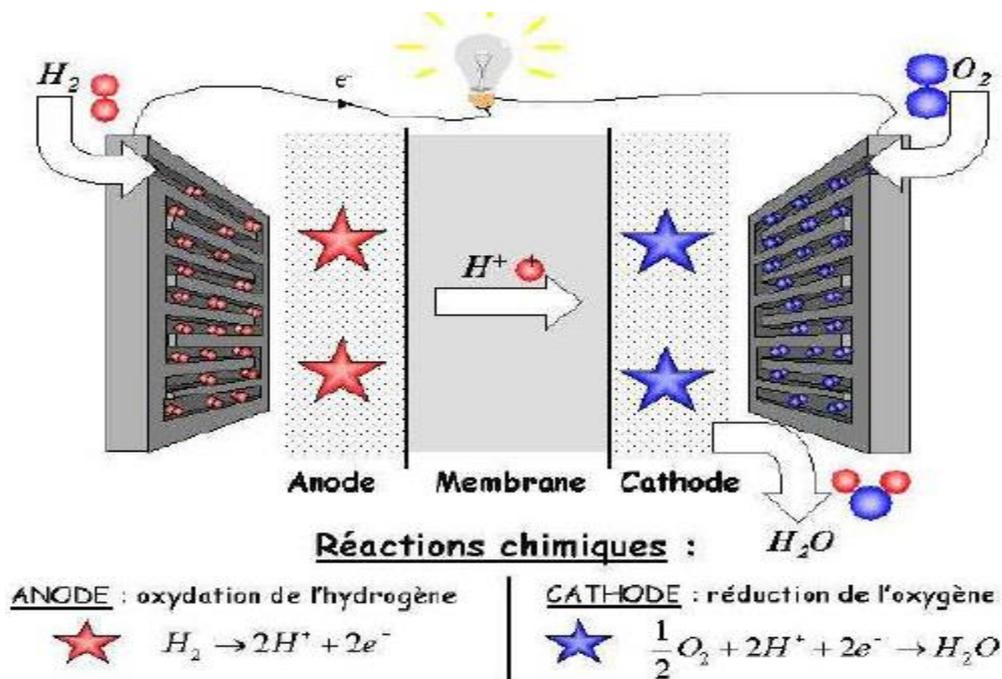


Figure I. 7 : Principe de fonctionnement d'une pile PEMFC

1.5. Conclusion

Le présent chapitre a permis de ressortir les différentes technologies liées aux systèmes hybrides, les éléments qui le constituent et qui nous seront utiles dans notre travail. Il est aussi présenté les différentes technologies des électrolyseurs et piles à combustibles. La description de ces éléments et leur caractérisation nous permettent de choisir d'une par le type de pile à combustible que nous aurons à utiliser, ainsi que de l'électrolyseur. Dans le chapitre suivant, il est question de présenter une architecture de notre système, de modéliser et de procéder aux calculs afin de faire un choix sur les différents composants de notre système.

Modélisation, architectures et calcul

2.1. Introduction

La démarche scientifique pour atteindre un but voudrait qu'on fasse une rétrospective sur un ensemble de travaux qui ont été effectués dans le même domaine. Cette rétrospective oriente la problématique, conduit à des pistes d'innovation, fait appel aux méthodes et outils. Le travail que nous présentons dans ce chapitre, vise à améliorer l'offre, la qualité et la disponibilité de l'énergie électrique et fluide dans un hôpital. Pour cela, nous envisageons utiliser la source énergétique de type solaire pour produire et l'électricité, et l'oxygène à travers un électrolyseur.

L'architecture de notre système se présente comme illustré sur le schéma de la figure

Il est constitué de :

- D'un champ PV ;
- D'électrolyseur ;
- De pile à combustible ;
- Des réservoirs de stockages
- D'un bus de commutation ;
- Des convertisseurs DC/DC, DC/AC et AC/DC.

2.2. Schéma descriptif du système

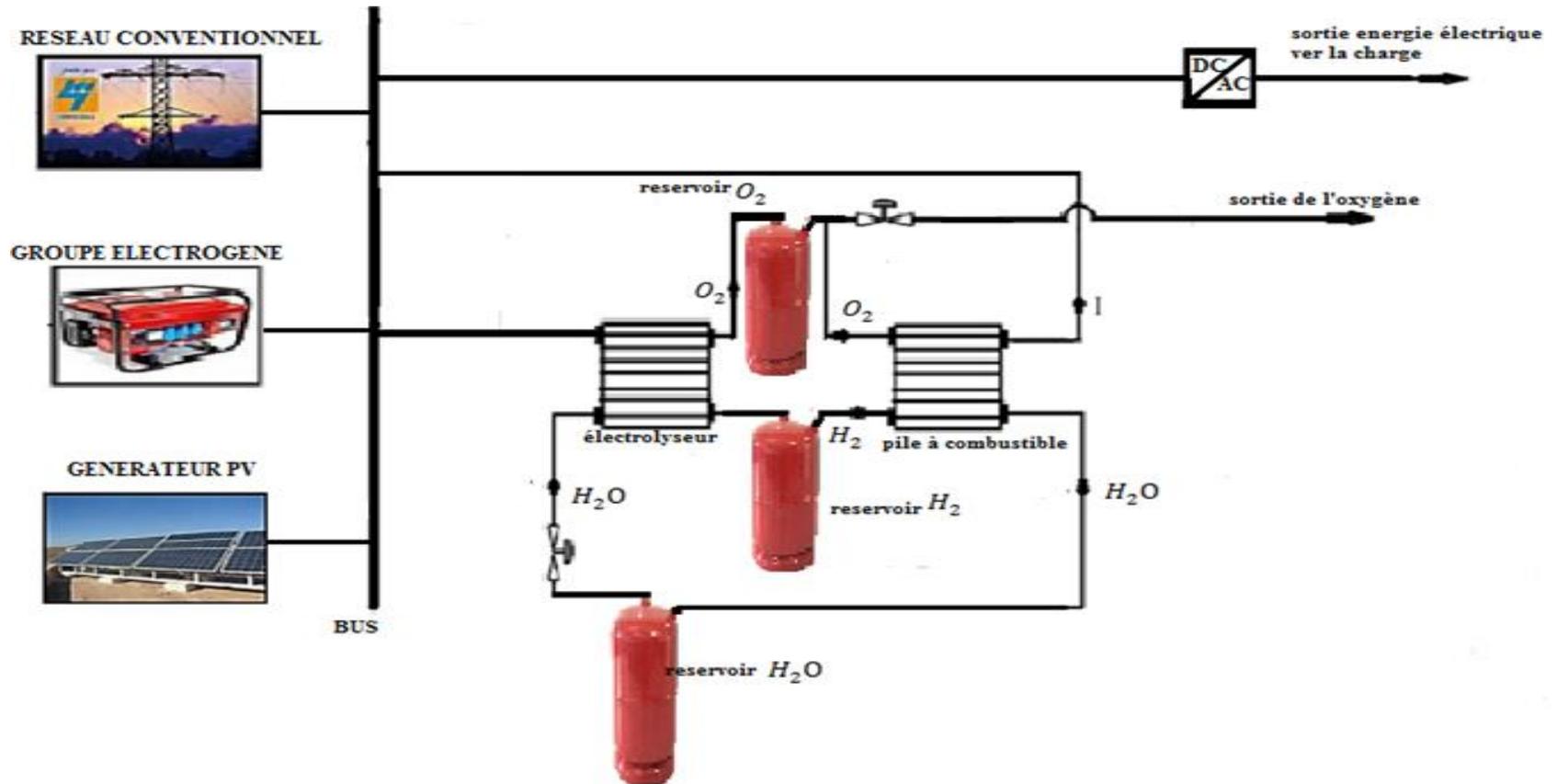


Figure 2.1 : Schéma descriptif du système hybride

2.3. Système de contrôle

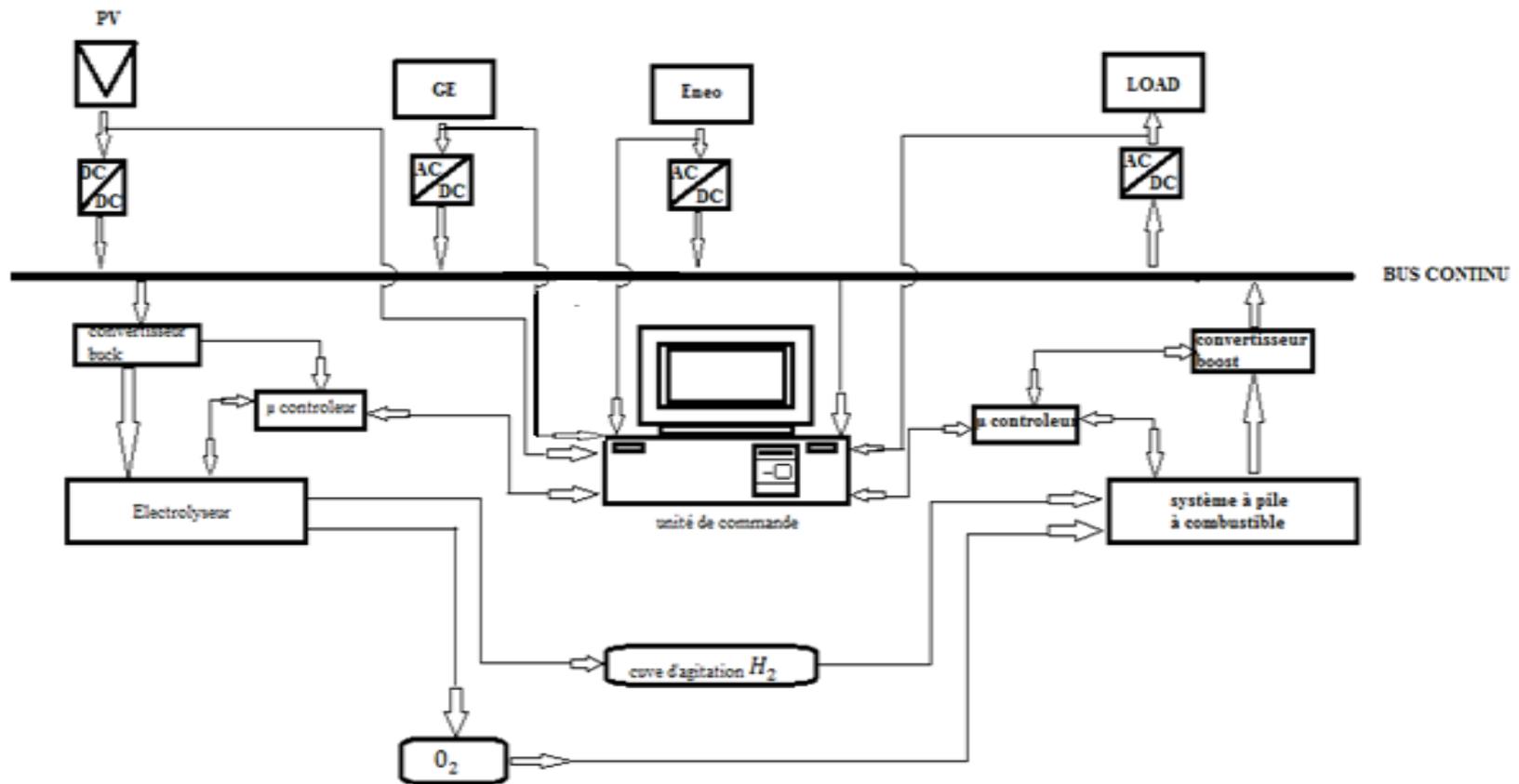


Figure 2.2 : Système de contrôle

2.3.1. Description du fonctionnement du système

Le fonctionnement de notre système est décrit comme suit :

Le champ PV est dimensionné de sorte à satisfaire la demande énergétique de l'électrolyseur lui permettant de produire la quantité d'oxygène souhaitée. Les sources Eneo et groupe électrogène alimentent directement la charge individuellement selon que la demande se ressentir.

Lorsque les réservoirs d'oxygène et d'hydrogène sont à leur niveau haut, le champ PV peut alimenter d'autres charges de l'hôpital substituant ainsi Eneo ou le groupe électrogène.

En cas de faible puissance au niveau du champ PV, une partie de l'énergie en sortie de la pile à combustible peut être utilisée pour alimenter l'électrolyseur d'où son autonomie

Nous proposons dans ce qui suit des représentations des différents composants de notre système. Ces représentations encore appelés modèles nous permettrons de simuler le système

2.4. Modélisation et calculs

2.4.1. Modélisation du système PV

La modélisation des champs photovoltaïques pour les systèmes de production d'hydrogène peut être effectuée par l'intermédiaire du modèle à une diode dont le circuit équivalent est donné par la figure 4.6. Ce modèle utilise les données (I_{sc} , V_{oc} , I_{mp} , V_{mp} , μI_{sc} , et μV_{oc}) fournies par le constructeur pour modéliser les performances du module PV.

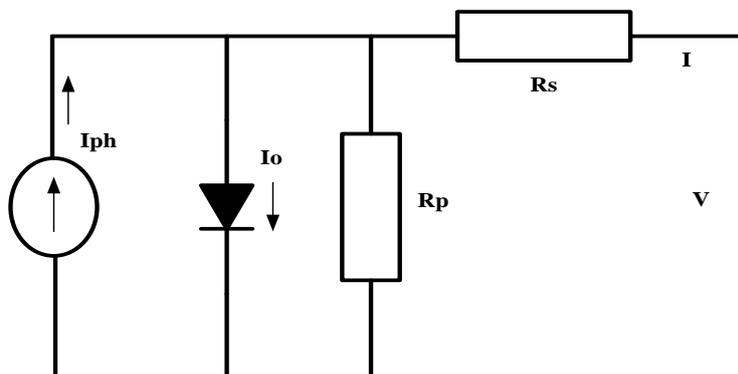


Figure 2.4 : schéma équivalent du modèle à une diode

La courbe I-V est calculée en fonction de la radiation solaire incidente et de la température des cellules suivant l'équation 4.1 :

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left(\frac{q(V+IR_s)}{AkT} \right) - 1 \right\} - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (2.1)$$

→ Au point de court-circuit sur la courbe I-V on a : $I = I_{sc}$ et $V = 0$. L'équation 2.1 devient :

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left(\frac{qI_{sc}R_s}{AkT} \right) - 1 \right\} - \frac{I_{sc}R_s}{R_p} \quad (2.2)$$

→ En circuit ouvert on a: $I_{pv}=0$ et $V=V_{oc}$ et on peut écrire,

$$0 = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left(\frac{qV_{oc}}{AkT} \right) - 1 \right\} - \frac{V_{oc}}{R_p} \quad (2.3)$$

→ Au point de puissance maximale,

$$I_{mp} = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left(\frac{q(V_{mp} + I_{mp}R_s)}{AkT} \right) - 1 \right\} - \frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{R_p} \quad (2.4)$$

• D'autres équations peuvent être obtenues en dérivant l'équation par rapport à V

$$\frac{dI}{dV} = -I_0 \left\{ \frac{q}{AkT} \left(1 + \frac{dI}{dV} R_s \right) \exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{AkT} \right) \right\} - \frac{1}{R_p} \left(1 + \frac{dI}{dV} R_s \right) \quad (2.5)$$

Au point de court-circuit on a également sur la courbe IV, $V = V_{oc}$ et $I = 0$. Ce qui permet d'écrire,

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV} \Big|_{I=0} \quad (2.6)$$

En substituant dans (4.5) on a la relation :

$$\frac{dI}{dV} \Big|_{I=0} = -I_0 \left\{ \frac{q}{AkT} \left(1 + \frac{dI}{dV} \Big|_{I=0} R_s \right) \exp \left(\frac{qV_{oc}}{AkT} \right) \right\} - \frac{1}{R_p} \left(1 + \frac{dI}{dV} \Big|_{I=0} R_s \right) \quad (2.7)$$

Toujours au point de point de court-circuit sur la courbe IV, $I = I_{sc}$ et $V = 0$.

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV} \Big|_{V=0} \quad (2.8)$$

$$\frac{dI}{dV} \Big|_{V=0} = -I_0 \left\{ \frac{q}{AkT} \left(1 + \frac{dI}{dV} \Big|_{V=0} R_s \right) \exp \left(\frac{qI_{sc}R_s}{AkT} \right) \right\} - \frac{1}{R_p} \left(1 + \frac{dI}{dV} \Big|_{V=0} R_s \right) \quad (2.9)$$

La puissance extraite du panneau PV en tout point:

$$P = IV \quad (2.10)$$

En différentiant (4.10) par rapport à V on a :

$$\frac{dP}{dV} = \left(\frac{dI}{dV} \right) V + I \quad (2.11)$$

La tension au point de puissance maximale est donnée par la solution de (4.12).

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (2.12)$$

En substituant dans (4.11) on obtient:

$$\frac{dI}{dV} = - \frac{I_{mp}}{V_{mp}} \quad (2.13)$$

En substituant dans (4.9) on obtient l'équation (2.14)

$$- \frac{I_{mp}}{V_{mp}} = -I_0 \left\{ \frac{q}{AkT} \left(1 - \frac{I_{mp}}{V_{mp}} R_s \right) \exp \left(\frac{qI_{sc}R_s}{AkT} \right) \right\} - \frac{1}{R_p} \left(1 - \frac{I_{mp}}{V_{mp}} R_s \right) \quad (2.14)$$

Dans la suite les équations (4.2) (4.3) (4.7) (4.9) (4.14) obtenues dans l'analyse précédente sont retenues pour la mise en œuvre numérique afin de déterminer les paramètres I_{ph} , I_0 , A , R_s , et R_p . Pour une meilleure lisibilité les notations complémentaires suivantes sont introduites :

$$R_{SO} = \left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=V_{oc}} \quad (2.15)$$

$$R_{Sho} = \left. \frac{dV}{dI} \right|_{I=I_{sc}} \quad (2.16)$$

$$a = \frac{AkT}{q} \quad (2.17)$$

La méthode de Newton-Raphson explicitée dans le paragraphe (4.1.2.3) est utilisée pour la résolution numérique du système, et l'obtention des cinq paramètres précités dans les conditions de référence. Les valeurs initiales utilisées par l'algorithme sont extraites des équations analytiques proposées par [91,92].

La valeur initiale du facteur d'idéalité des diodes est donc calculée à partir de l'expression ci-après:

$$a = \frac{V_{mp} + I_{mp}R_{SO} - V_{oc}}{\left\{ \ln\left(I_{sc} - \frac{V_{mp}}{R_{Sho}}\right) - \ln\left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_p}\right) + \frac{I_{mp}}{I_{sc} - (V_{oc}/R_{Sho})} \right\}} \quad (2.15)$$

De même les valeurs initiales des autres paramètres sont calculées à partir des formulations analytiques ci-après.

$$R_p = R_{sho} \quad (2.16)$$

$$I_0 = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_p}\right) \exp\left(-\frac{V_{oc}}{a}\right) \quad (2.17)$$

$$R_s = R_{so} - \frac{a}{I_0} \exp\left(-\frac{V_{oc}}{a}\right) \quad (2.18)$$

$$I_{ph} = I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_p}\right) + I_0 \left(\exp\frac{I_{sc}R_s}{a} - 1\right) \quad (2.19)$$

De manière concrète, les valeurs de ces coefficients sont d'abord déterminées pour une température et un ensoleillement de référence. Ensuite les valeurs pour diverses excitations météorologiques sont déduites des valeurs de références en exploitant les équations 4.20 à 4.24.

$$a = a_{ref} \frac{T_{pv}}{T_{pv,ref}}, \quad (2.20)$$

$$I_{ph} = \frac{S_{pv}}{S_{pv,ref}} [I_{ph,ref} + \mu_{I_{sc}} (T_{pv} - T_{pv,ref})], \quad (2.21)$$

$$I_0 = I_{0,ref} \left(\frac{T_{pv}}{T_{pv,ref}}\right)^3 \exp\left[\frac{E_g}{KT}\Big|_{T_{c,ref}} - \frac{E_g}{KT}\Big|_{T_c}\right] \quad (2.22)$$

$$R_p = R_{p,ref} \frac{S_{pv,ref}}{S_{pv}}, \quad (2.23)$$

$$R_s = R_{s,ref} \quad (2.24)$$

Dans l'équation (4.22), on a :

$$E_g = E_{g,ref} [1 - C(T_{pv} - T_{pv,ref})], \quad (2.25)$$

La température des cellules photovoltaïques T_{pv} est déterminée par l'équation (2.26):

$$T_{pv} = T_a + G_T e^{(a_c + b_c WS)} + \frac{G_T}{G_{NOCT}} \Delta T_{pv} \quad (2.26)$$

La connaissance des cinq paramètres susmentionnés permet la résolution de l'équation (4.1) et le calcul du courant (et de la puissance) à une tension donnée. Nous pourrions ainsi tracer les courbes courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) sous excitations météorologiques réelles. L'équation (4.1) est d'abord réécrite sous une forme explicite comme présentée dans l'équation (4.27) :

$$f(I_{pv}) = -I_{pv} + I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{(V_{pv} + I_{pv} R_s)}{a} \right] - 1 \right\} - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_p} = 0 \quad (2.27)$$

En appliquant la méthode de Newton, on peut donc estimer une solution à l'itération $n+1$ à partir de l'équation (2.28):

$$I_{pv}^{n+1} = I_{pv}^n - \frac{f(I_{pv}^n)}{f'(I_{pv}^n)} \quad (2.28)$$

f' est la dérivée de la fonction f , I_{pv}^{n+1} et I_{pv}^n sont deux solutions (valeurs) consécutives de I_{pv} .

Cette formulation exige donc à chaque fois, qu'une solution initiale aléatoire soit fixée.

En remplaçant la fonction f par son expression on obtient la relation suivante permettant le calcul itératif de I_{pv}^n :

$$I_{pv}^{n+1} = I_{pv}^n - \frac{-I_{pv}^n + I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{(V_{pv} + I_{pv}^n R_s)}{a} \right] - 1 \right\} - \frac{V_{pv} + I_{pv}^n R_s}{R_p}}{-1 - I_0 (R_s/a) \exp \left[\frac{(V_{pv} + I_{pv}^n R_s)}{a} \right] - \frac{R_s}{R_p}} \quad (2.29)$$

2.4.2. Modélisation des électrolyseurs PEM

Contrairement à la modélisation de la pile à combustible PEM, qui remonte au début des années 1990 (Springer et al. 1991), la modélisation de l'électrolyse PEM est plus récente dans son développement, avec les premiers modèles rapportés en 2002 (Onda *et al.* 2002). Cependant, la modélisation de la pile à combustible reste assez proche de celle de l'électrolyseur et les nombreux articles de synthèse disponibles sur la modélisation de la pile à combustible peuvent être exploités dans la présente étude.

La revue de littérature permet la distinction entre plusieurs types d'approches suivies pour la modélisation d'un électrolyseur PEM. Dans la suite de ce paragraphe, six différentes approches sont présentées accompagnées d'un exemple de publication appliquant cette approche.

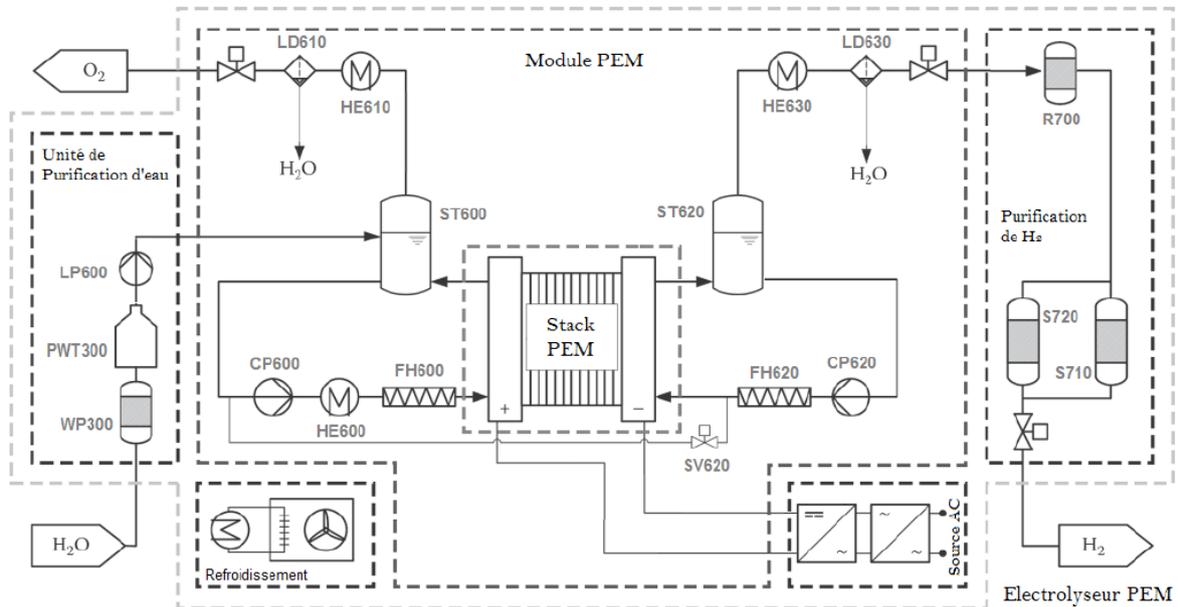


Figure 2.5. Configuration générale du système électrolyseur PEM

Cette diversité dans les approches existantes provient du caractère multi-physique du procédé de l'électrolyse mais également des objectifs fixés derrière la modélisation.

– Approche mécanistique (théorique), basée sur la résolution des EDP dans un domaine géométrique défini et maillé. Cette une approche généralement effectuée en régime statique et qui vise l'optimisation de la conception interne de la cellule d'électrolyse.

Approche semi-empirique, basée sur les données expérimentales, spécifique au composant modélisé. Busquet a choisi cette approche pour modéliser son banc d'essai de système autonome de production d'hydrogène (Figure 2.5).

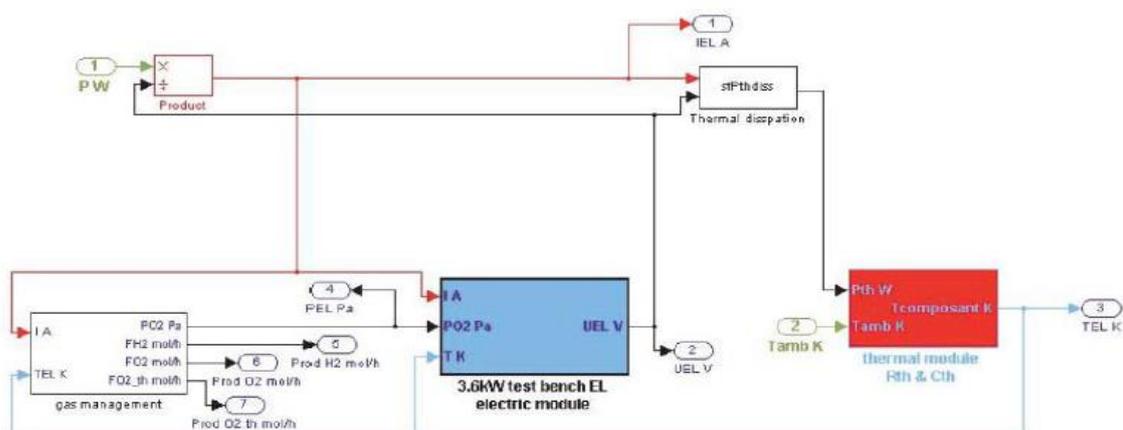


Figure 2.6 : Modèle Matlab/Simulink® d'un système de production d'hydrogène (Busquet, 2005)

Approche empirique, simple à mettre en place et rapide, cette approche produit souvent des modèles prédictifs dont l'apprentissage est issu de l'expérience. Becker & Karri ont utilisé cette approche pour prédire les performances de l'électrolyseur PEM. Leurs modèles prédictifs sont construits à partir de réseaux de neurones dont l'apprentissage est issu d'essais expérimentaux. Ces réseaux peuvent comporter une ou plusieurs couches suivant la complexité du système à modéliser.

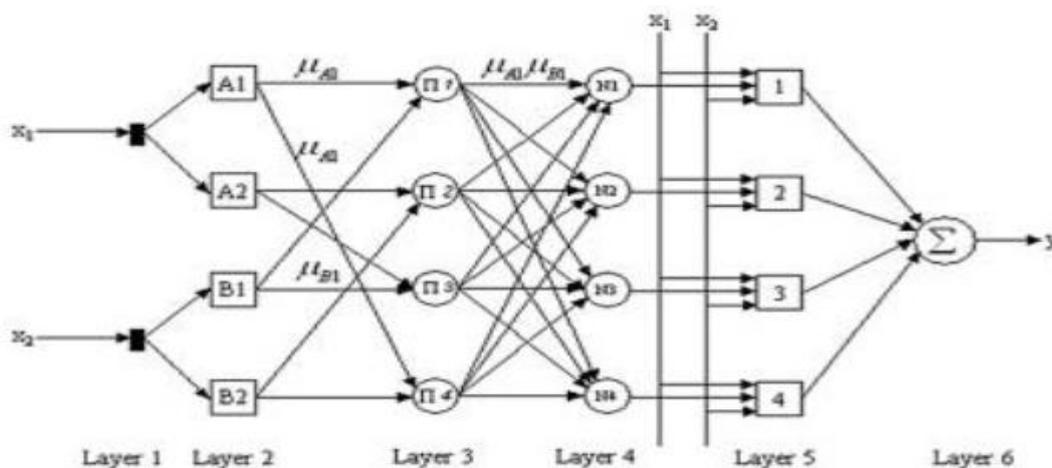


Figure 2.7 : Réseau de neurone à 6 couches et deux entrées (Becker and Karri, 2010)

Approche « circuits électriques », basée sur une analogie avec les circuits électriques. Cette approche est très répandue dans les études qui ne s'intéressent qu'à l'aspect électrochimique du stack électrolyseur. La Figure 1.12(a) représente la tension totale de l'électrolyseur composée de trois sources de tension. Le potentiel réversible est représenté par une source constante pour une température fixée alors que les pertes ohmiques et d'activation seront représentées par des sources de tension pilotées en courant. La Figure 1.12(b), représentant le modèle d'impédance, permettra d'analyser le comportement dynamique de l'électrolyseur.

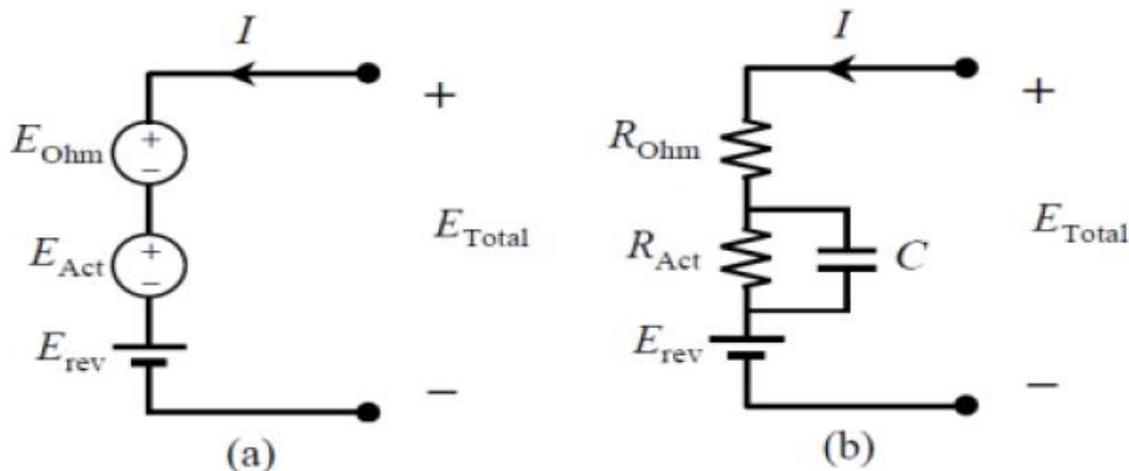


Figure 2.8 : Représentations du circuit électrique équivalent d'un stack électrolyseur PEM (Lopes and Watanabe, 2009)

Approche énergétique, basée sur une analogie multi-physique, met en évidence les interactions entre les parties électrochimiques, thermodynamiques, les phénomènes thermiques et fluidiques, qui surviennent simultanément dans un électrolyseur. Dans la littérature, les formalismes les plus utilisés dans le cadre de cette approche sont la représentation énergétique macroscopique (EMR1) et la théorie du Bond Graph. Deux types d'approches qui s'avèrent pertinents pour étudier les systèmes complexes hétérogènes tels que l'électrolyse. Rabih a choisi le formalisme Bond Graph pour modéliser une pile à combustible PEM réversible (Figure 2.9).

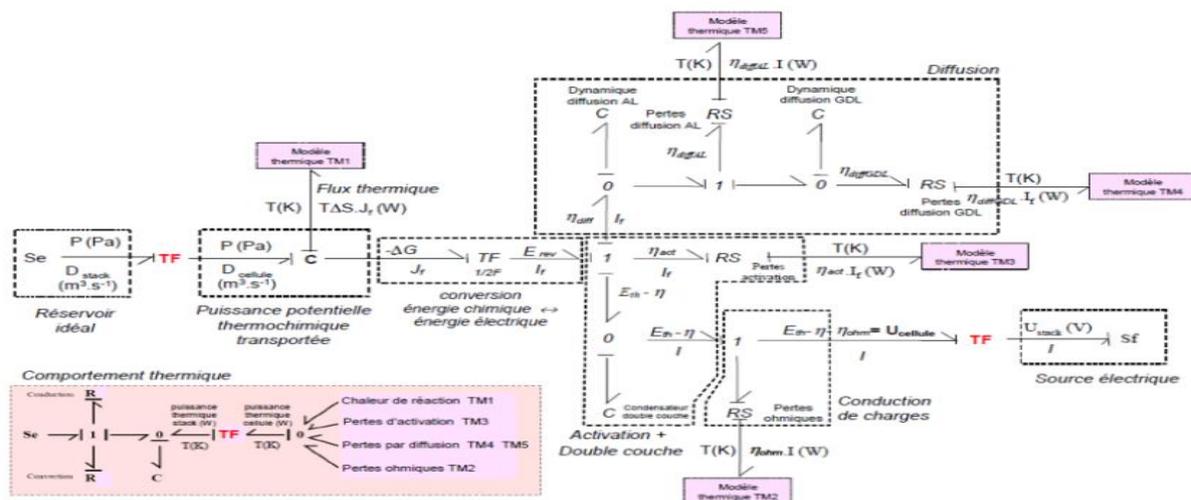
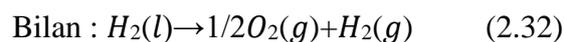
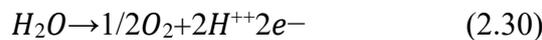


Figure 2.9 : Modèle Bond Graph d'une pile à combustible réversible PEM (Rabih, 2008)

2.4.3. Aspects thermodynamique, cinétique et énergétique

Aspect thermodynamique Dans un électrolyseur basse température le courant électrique est utilisé pour dissocier l'eau liquide en ses espèces chimiques élémentaires H₂ et O₂. En milieu acide, cette réaction se produit à travers deux demi-réactions :



De l'équation bilan ci-dessus on peut écrire :

$$\dot{N}_{H_2} = \dot{N}_{H_2O} = 2\dot{N}_{O_2} \quad (2.33)$$

Cette réaction d'électrolyse nécessite également un apport minimal d'énergie sous forme électrique et thermique qui correspond à la variation de l'énergie de Gibbs $\Delta_r G$ pour la part électrique et au terme $T\Delta_r S$, où $\Delta_r S$ est la variation d'entropie, pour la part thermique. L'apport total nécessaire correspond à la variation de l'enthalpie au cours de la réaction $\Delta_r H$:

$$\Delta_r H = \Delta_r G + T\Delta_r S \quad (2.34)$$

Ces grandeurs thermodynamiques permettent de calculer les tensions caractéristiques de l'électrolyse dont la tension à l'équilibre réversible ou la tension de Nernst ; qui correspond à la tension minimale pour dissocier la molécule d'eau et produire de l'hydrogène et de l'oxygène. Dans le cas de l'électrolyse basse température, cette tension est donnée par l'équation (2.36) (Marangio, 2009) :

$$U_{Nernst} = \frac{\Delta_r G^0}{2F} + \frac{RT_{cell}}{2F} \ln \left(\frac{a_{H_2} a_{O_2}^{0,5}}{a_{H_2O}} \right) \quad (2.35)$$

$$U_{Nernst} = 1,229 - 8,46 \times 10^{-4} (T_{cell} - 298) + \frac{RT_{cell}}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2} p_{O_2}^{0,5}}{P_{ca} P_{an}^{0,5}} \right) \quad (2.36)$$

Avec F la constante de Faraday, R la constante des gaz parfait, a_i et p_i l'activité et la pression partielle de l'espèce i respectivement, $\Delta_r G^0$ l'énergie libre de Gibbs à l'état standard, P_{ca} et P_{an} la pression de la cathode de l'anode respectivement et T_{cell} la température de la cellule. Ici on suppose que l'activité de l'eau liquide est égale à l'unité.

On définit également la tension thermoneutre U_{tn} qui correspond à la tension à appliquer aux électrodes de la cellule d'électrolyse pour que le régime de fonctionnement de la cellule soit adiabatique et isotherme. Elle est définie par le rapport :

$$U_{tn} = \frac{\Delta_r H}{2F} \quad (2.37)$$

Aspect cinétique Le passage de courant dans la cellule d'électrolyse, entraîne des irréversibilités qui se traduisent par l'apparition de ce qu'on appelle les surtensions de fonctionnement. On distingue plusieurs types de surtensions au sein d'une cellule :

- Les surtensions d'activation η_{act} dues aux réactions de transfert de charges se déroulant dans les zones de triple contact des électrodes, elles apparaissent donc dès le départ sur la courbe de polarisation (voir figure 2.2) ;
- Les surtensions ohmiques η_{ohm} dues à la perte de tension ohmique dans les milieux conducteurs de la cellule, principalement la membrane, et dans les résistances de contact

des points de collectage du courant. Elles sont proportionnelles à la production et correspondent à la partie linéaire de la courbe de polarisation ;

- Les surtensions de diffusion ou de concentration η_{diff} observées pour les fortes densités de courant², pour lesquelles les réactifs sont quasiment épuisés et leur accès à la zone réactive est gêné par les gaz produits. Les surtensions de concentration, liées au transfert de masse, sont visibles à la fin de courbe de polarisation où la production stagne malgré l'élévation de la tension.

La tension totale ou réelle de la cellule est la somme de la tension de Nernst et des trois types de surtensions recensés.

$$U_{cell} = U_{Nernst} + \eta_{act} + \eta_{ohm} + \eta_{diff} \quad (2.38)$$

Les différents termes de l'équation sont explicités ou calculés comme suit :

$$U_{Nernst} = 1.229 - 8.46 \times 10^{-4}(T_{cell} - 298) + \frac{RT_{cell}}{2F} \ln(p_{H_2} p_{O_2}^{0,5}) \quad (2.39)$$

$$\eta_{act} = \frac{RT_{an}}{\alpha_{an}F} \ln\left(\frac{i}{i_{o,an}}\right) + \frac{RT_{ca}}{\alpha_{ca}F} \ln\left(\frac{i}{i_{o,ca}}\right) \quad (2.40)$$

$$\sigma_m = (0,00514 \times \lambda - 0,000326) \exp\left[1268\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{cell}}\right)\right] \quad (2.41)$$

2.4.4. Modèle statique du système électrolyseur

Une approche semi-empirique est adoptée pour modéliser en régime stationnaire le comportement du système d'électrolyse PEM. Nous commencerons par l'écriture des bilans de matière et d'énergie propres au stack PEM pour détailler après les paramètres de simulation relatifs au fonctionnement du stack et des systèmes auxiliaires.

La Figure 2.5 montre la distribution des flux d'eau et de gaz dans le stack PEM. La détermination de ces flux avec précision revêt d'une importance capitale pour assurer une bonne stratégie de contrôle et la sûreté pendant le fonctionnement de la machine. En effet, c'est la présence de ces flux qui est à l'origine de la détection des impuretés au niveau des gaz produits. D'une part, la loi de Faraday permet de déterminer les débits molaires consommés NH_2O , et produits par le stack $\dot{N}_{H_2O,prod}$ et $\dot{N}_{O_2,prod}$ pour une densité de courant donnée.

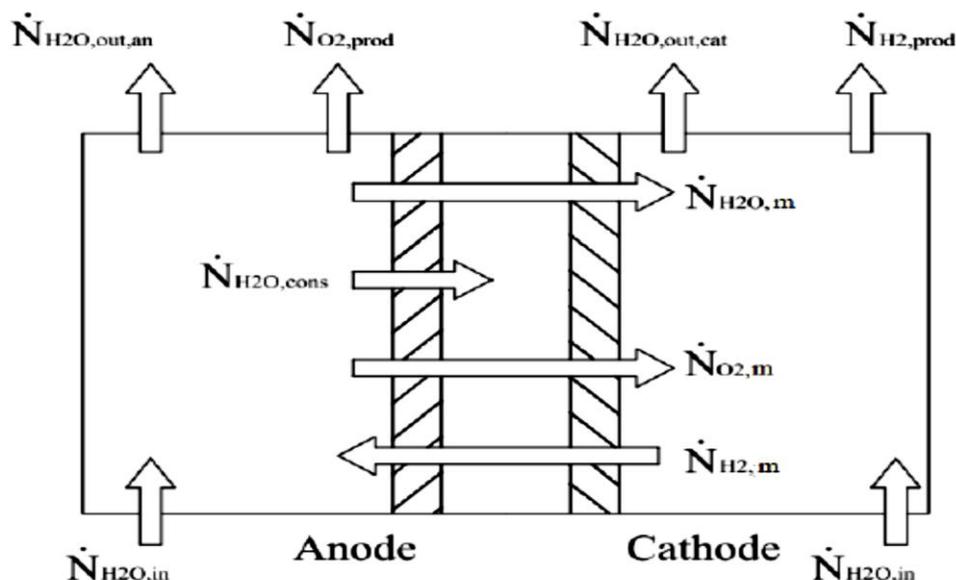


Figure 2.9 : Flux entrants, sortants et traversant la membrane du stack PEM

Quant au transport des gaz $\dot{N}_{H_2,m}$ et $\dot{N}_{O_2,m}$ à travers la membrane, ce phénomène est essentiellement dû aux gradients de concentration (pressions partielles des espèces) et de pression qui existent entre les deux électrodes. Compte tenu de la complexité des phénomènes de transfert mis en jeu et de leur dépendance à la fois des conditions opératoires et des caractéristiques propres à la membrane polymère utilisée, les valeurs des flux traversant la membrane, de part et d'autre, sont estimées de manière empirique pour le cas de référence

Les expressions des débits présentées en annexe (A) permettent d'écrire les bilans de matière partiels des trois espèces côté anode et cathode. L'objet étant de retrouver les compositions des flux à la sortie de chaque électrode :

Tableau 2.1 : Equation à l'anode et à la Cathode

| | | |
|---------|--------|---|
| | H_2O | $\dot{N}_{H_2O,out,an} = \dot{N}_{H_2O,in,an} - \dot{N}_{H_2O,m} - \dot{N}_{H_2O,cons}$ |
| Anode | H_2 | $\dot{N}_{H_2,out,an} = \dot{N}_{H_2,in,an} + \dot{N}_{H_2,m}$ |
| | O_2 | $\dot{N}_{O_2,out,an} = \dot{N}_{O_2,in,an} + \dot{N}_{O_2,prod} - \dot{N}_{O_2,m}$ |
| Cathode | H_2O | $\dot{N}_{H_2O,out,ca} = \dot{N}_{H_2O,in,ca} + \dot{N}_{H_2O,m}$ |
| | H_2 | $\dot{N}_{H_2,out,ca} = \dot{N}_{H_2,in,ca} + \dot{N}_{H_2,prod} - \dot{N}_{H_2,m}$ |
| | O_2 | $\dot{N}_{O_2,out,ca} = \dot{N}_{O_2,in,ca} + \dot{N}_{O_2,m}$ |

L'aspect électrochimique du stack PEM est également modélisé afin de prédire la tension dans chaque cellule en fonction de la densité de courant appliquée. Cette tension est la somme de la tension de Nernst et des surtensions qui apparaissent lors du passage du courant dans la cellule d'électrolyse. Nous en distinguerons les surtensions d'activation η_{act} dues aux réactions de transfert de charges et les surtensions ohmiques η_{ohm} dues à la perte de tension ohmique dans les milieux conducteurs de la cellule. Ici, les surtensions de diffusion η_{diff} observées pour les fortes densités de courant seront négligées sous réserve que le système soit opéré en dessous de cette limite.

2.5. Dimensionnement

Afin de caler les grandeurs et caractéristiques des composants à simuler, il est important de procéder au dimensionnement du système.

Partant du besoin énergétique ou fluïdique à satisfaire, les différents composants sont déterminés suivant la démarche ci-après :

Bases de dimensionnement

Notre système est dimensionné de manière à permettre à notre électrolyseur de pouvoir produire en une journée une quantité suffisante d'oxygène pour la prise en charge des patients en détresse respiratoire. Il peut s'agir des patients des unités de néonatalogie, de réanimation ou d'un patient COVID-19 en détresse respiratoire soit 13m^3 d'oxygène par jour. On a donc :

$$\dot{N}_{O_2} = 0,00015 \text{ m}^3/\text{s}$$

Constante de Faraday : 96487 C/ mole

Rendement de Faraday : 0,9

2.5.1. Détermination de l'électrolyseur.

Connaissant la quantité d'oxygène que nous voulons produire et par ricochet celle de l'hydrogène (2.7), Il est possible pour nous de pouvoir déterminer la quantité d'énergie électrique (intensité, tension et puissance) suffisante pour faire fonctionner notre électrolyseur.

$$\dot{N}_{O_2} = \frac{N_{celec} I_{elec} \eta_F}{N_{st} F} \quad (2.42)$$

Avec : \dot{N}_{O_2} volume d'oxygène ;

N_{celec} Nombres de cellules de l'électrolyseur en série ;

I_{elec} Courant de l'électrolyseur ;

N_{st} Coefficient stœchiométrie de l'oxygène;

ηF Rendement faradique.

Contrairement à la pile à combustible, le rendement faradique de l'électrolyseur n'est pas constant, il dépend du courant absorbé

Le débit d'hydrogène produit est également calculé sur la base de la loi de Faraday.

$$\dot{N}_{H_2} = \frac{N_{celec} I_{elec} \eta F}{N_{st} F} \quad (2.43)$$

N_{stH_2} Coefficient stœchiométrie de l'hydrogène.

Le débit molaire de l'eau devant alimenter l'électrolyseur est calculé à partir de l'équation :

$$\dot{N}_{H_2O} = 2\dot{N}_{O_2} = 2 \times \frac{N_{elec} I_{elec} \eta F}{N_{stO_2} F} \quad (2.44)$$

Calcul du courant et de la puissance de l'électrolyseur :

Hypothèse : Nombre de cellule d'électrolyseur en série : $N_{cel}=45$

Tension de cellule électrolyseur : $U_{cel}= 1,6 \text{ V}$

Le courant et la tension sont donnés par les équations (2.45), (2.46)

$$I_{elec} = \frac{\dot{N}_{O_2} N_{stH_2} F}{N_{elec} \eta F} \quad (2.45)$$

$$P_{Telec} = U_{cel} \times N_{elec} \times I_{el} \quad (2.46)$$

Au terme des opérations mathématiques, le tableau bilan ci-après permet de récapituler les caractéristiques de l'électrolyseur :

Tableau 2.1 : tableau récapitulatif des caractéristiques de l'électrolyseur

| Grandeurs | Valeurs numériques |
|-----------------------------------|--------------------|
| Tension (V) | 72 |
| Courant (A) | 58 |
| Puissance (W) | 4190 |
| Débit Oxygène (m ³) | 25,92 |
| Débit Hydrogène (m ³) | 25,92 |
| Débit d'eau (m ³) | 51,84 |

2.5.2. Détermination de la pile à combustible

Le débit d'hydrogène consommé par la pile est également calculé sur la base de la loi de Faraday et correspond à celle produit par l'électrolyseur.

$$\dot{N}_{H_2} = \frac{N_{celP} I_{pile} \eta_F}{N_{stH_2} F} \quad (2.12)$$

De même le débit d'oxygène consommé.

$$\dot{N}_{O_2} = \frac{N_{elec} I_{elec} \eta_F}{N_{st} F} \quad (2.13)$$

Au terme des opérations mathématiques, le tableau bilan ci-après permet de récapituler les caractéristiques de la pile :

Tableau 2.2 : tableau récapitulatif des caractéristiques de la pile

| Grandeurs | Valeurs numériques |
|-----------------------------------|--------------------|
| Tension (V) | 220 |
| Courant (A) | 58 |
| Puissance (W) | 12760 |
| Débit Oxygène (m ³) | 25,92 |
| Débit Hydrogène (m ³) | 25,92 |

2.5.3. Dimensionnement du champ Photovoltaïque

Le champ PV sera calculé pour alimenter prioritairement l'électrolyseur dimensionné.

Le stockage d'énergie se fera sous forme chimique et sera assuré par le réservoir d'hydrogène disposé entre l'électrolyseur et la pile à combustible.

Hypothèses de dimensionnement :

Base de l'ensoleillement : **Moyen au lieu de défavorable** $E_s=7 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$

Nombre d'heures de fonctionnement journalier de l'électrolyseur : **DF=08 heures**

Coefficient des pertes : $K_s=0,8$

La puissance crête est calculée par l'expression : (2.14).

$$P_{PV} = \frac{P_{EL} \times DF}{E_s \times K_s} \quad (2.14)$$

Nous faisons le choix de travailler avec les panneaux solaires polycristallins LUXOR Solo Line de caractéristiques suivantes : $P_c = 260W_c$ et $V = 24V$

Sur la base de ce choix et de la connaissance de la tension du bus fixée à 72V, les caractéristiques et la configuration du champ PV sont résumés dans le tableau :

Pour notre système, nous avons opté pour Les panneaux solaires polycristallins LUXOR Solo Line 260Wc 24V.

La détermination du nombre de panneaux utilisé est faite par la relation (2.15).

$$N_p = \frac{P_c}{P_u} \quad (2.15).$$

Le nombre de panneaux en série est déterminé à l'aide de la relation (2.16).

$$N_{PS} = \frac{U_{CPV}}{U_{maxM}} \quad (2.16).$$

La relation (2.17) nous permet de déterminer le Nombre de panneaux en parallèle:

$$N_{PP} = \frac{P_c}{P_m \times N_{mS}} \quad (2.17)$$

Au terme des opérations mathématiques, le tableau bilan ci-après permet de récapituler les caractéristiques de notre champ PV :

Tableau 2.3 : tableau récapitulatif des caractéristiques du champ PV

| Grandeurs | Valeurs numériques |
|---------------------------|--------------------|
| Tension (V) | 24 |
| Puissance (V) | 5985 |
| Nombre panneaux en série | 3 |
| Nombre panneaux parallèle | 8 |
| Nombre de panneaux total | 24 |

2.6. Dispositif de commutation

Le circuit de commutation de la figure (2.11) de notre structure est inspiré du modèle proposé par PESDJOCK Mathieu et al. (2019) est l'interface de puissance à paires de relais. Il permet d'éviter les commutations simultanées de plus d'une source sauf le cas où l'on souhaite coupler le PV et le sous-système PAC-Electrolyseur. L'un des avantages qu'offre ce circuit réside du fait que les sources continues sont complètement séparées des alternatives et ne peuvent fonctionner au moment. Le mode de fonctionnement par défaut sur le bus continu (entrée onduleur) est le système photovoltaïque, sur le bus alternatif des sources, le réseau et au niveau de la charge, l'onduleur (bus alternatif commun). Cela montre que le système photovoltaïque

est le mode de configuration par défaut du circuit. Un autre avantage est le fait qu'en mode de fonctionnement par défaut, les relais ne sont appelés à aucune ressource énergétique, ce qui n'entraîne pas de dépenses énergétiques sur la carte de commande. Dans le cas où toutes les sources sont à leur potentiel maximal pas plus de deux relais ne peuvent fonctionner au même moment.

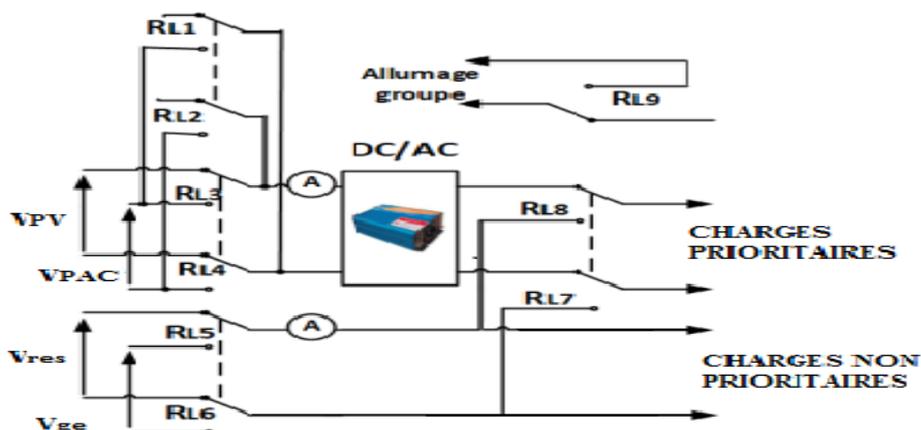


Figure 2.10. Circuit d'interface de commutation

2.6.1 Description de la séquence de commutation des sources.

L'utilisation des sources sera fonction de la demande de la charge. Nous utiliserons le réseau local (ENEO) comme source principale. Deux sources ne peuvent être utilisées en même temps que si les conditions fixées au préalable sont effectives.

La séquence de commutation est décrite ainsi qu'il suit :

- Le réseau local et le groupe électrogène assurent l'alimentation de la totalité de la charge.
- Le sous-système pile à combustible- électrolyseur est alimenté par les modules PV ;
- L'électrolyseur produit l'oxygène à partir de l'électrolyse de l'eau ;
- La PAC produit l'énergie électrique alimentant uniquement les salles sensibles de l'hôpital
- En cas de défaut ou de manque d'énergie électrique au niveau des sources principales, seuls les salles sensibles restent alimentées grâce à l'énergie électrique produite par le sous-système PAC-électrolyseur ;
- La PAC peut alimenter à son tour l'électrolyseur si et seulement si les modules ne fournissent aucune tension et le réservoir d'oxygène est à son niveau bas.

2.7. Algorithmes de gestion des sources

La stratégie de gestion proposée est basée essentiellement sur la connaissance de l'expert qui a conçu les règles. De nombreux scénarios de gestion peuvent être proposés en fonction des sources d'énergie disponibles, de la consommation d'énergie et de l'état du sous-système pile à combustible-électrolyseur pendant 24 heures pour pouvoir assurer le bon déroulement de l'algorithme. Dans notre cas, nous avons utilisé un logiciel de simulation informatique (MATLAB SIMULINK), qui permet de déterminer à chaque instant le fonctionnement des différents éléments qui constituent notre système

2.7.1. Différents modes de fonctionnement du système

Notre système est composé d'un champ PV de 80 kWc, d'une pile à combustible d'une puissance de 5000 W. Le SHPE est conçu pour alimenter une charge (DC ou AC) et un électrolyseur. On considère que:

- Le réseau local est la source principale ;
- La pile à combustible, le champ PV et le groupe électrogène sont considérée comme des sources de secours ;
- La charge est toujours connectée ;
- L'électrolyseur est considéré comme une charge auxiliaire pour dissiper le surplus de production.

Pour rendre l'étude plus simple, nous supposons que chaque composant a deux états : actif et inactif en fonction des périodes du jour. Les tableaux 2.2 et 2.3 donnent l'état de chaque composant du système. En effet, en fonction des sources d'énergie disponibles, la consommation d'énergie et l'alimentation de l'électrolyseur, nous distinguons plusieurs scénarios de fonctionnement du système.

Tableau 2.4 : Etat de chaque composant constituant du système

| Etat | | actif | inactif |
|---------------------|--------------------|---|---|
| Source principale | ENEO | Tous les jours | |
| Sources auxiliaires | Champ PV | Pendant un jour ensoleillé | -Pendant la nuit -Pendant un jour nuageux -En cas de panne |
| | Pile à combustible | Pendant l'incapacité des sources principales, | |
| | Groupe électrogène | - Pendant l'incapacité de la source principale, par exemple lorsque : 1. La demande de la charge totale est supérieure à la production 2. En cas de panne de la source principale | -pendant le fonctionnement normal de la source principale -La demande de la charge est égale ou inférieure à la production |
| Charge prioritaire | | La charge est toujours connectée. | |
| Charge totale | | La charge est toujours connectée. | Pendant l'incapacité de la source principale |

Tableau 2.5 : Différents scénarios de fonctionnement du système

| Cas | Période | ENEO | PV | GE | PAC | ELEC | description | | |
|---------|-------------------------------------|-------------------------------|----|-----|-----|------|--------------------|---------------------------|--|
| | | | | | | | Charge prioritaire | Charge totale | |
| 1 | Pendant 24 heures de fonctionnement | A | A | OFF | ON | ON | $P_{ChP}=P_{PAC}$ | $P_{ChT}=P_{ENEO}$ | |
| 2 | | A | A | ON | ON | ON | $P_{ChP}=P_{PAC}$ | $P_{ChT}=P_{ENEO}+P_{GE}$ | |
| 3 | | I | A | ON | ON | ON | $P_{ChP}=P_{PAC}$ | $P_{ChT}=P_{GE}$ | |
| 4 | | I | A | OFF | ON | ON | $P_{ChP}=P_{PAC}$ | $P_{ChT}=P_{PAC}$ | |
| 5 | | A | I | OFF | ON | ON | $P_{ChP}=P_{ENEO}$ | $P_{ChT}=P_{ENEO}$ | |
| 6 | | I | I | ON | ON | ON | $P_{ChP}=P_{GE}$ | $P_{ChT}=P_{ENEO}$ | |
| 7 | | I | I | I | ON | ON | $P_{ChP}=P_{PAC}$ | $P_{ChT}=P_{PAC}$ | |
| Légende | A | Fonctionnement normal (actif) | | | | | | | |
| | I | Inactif | | | | | | | |

Algorithme de commande

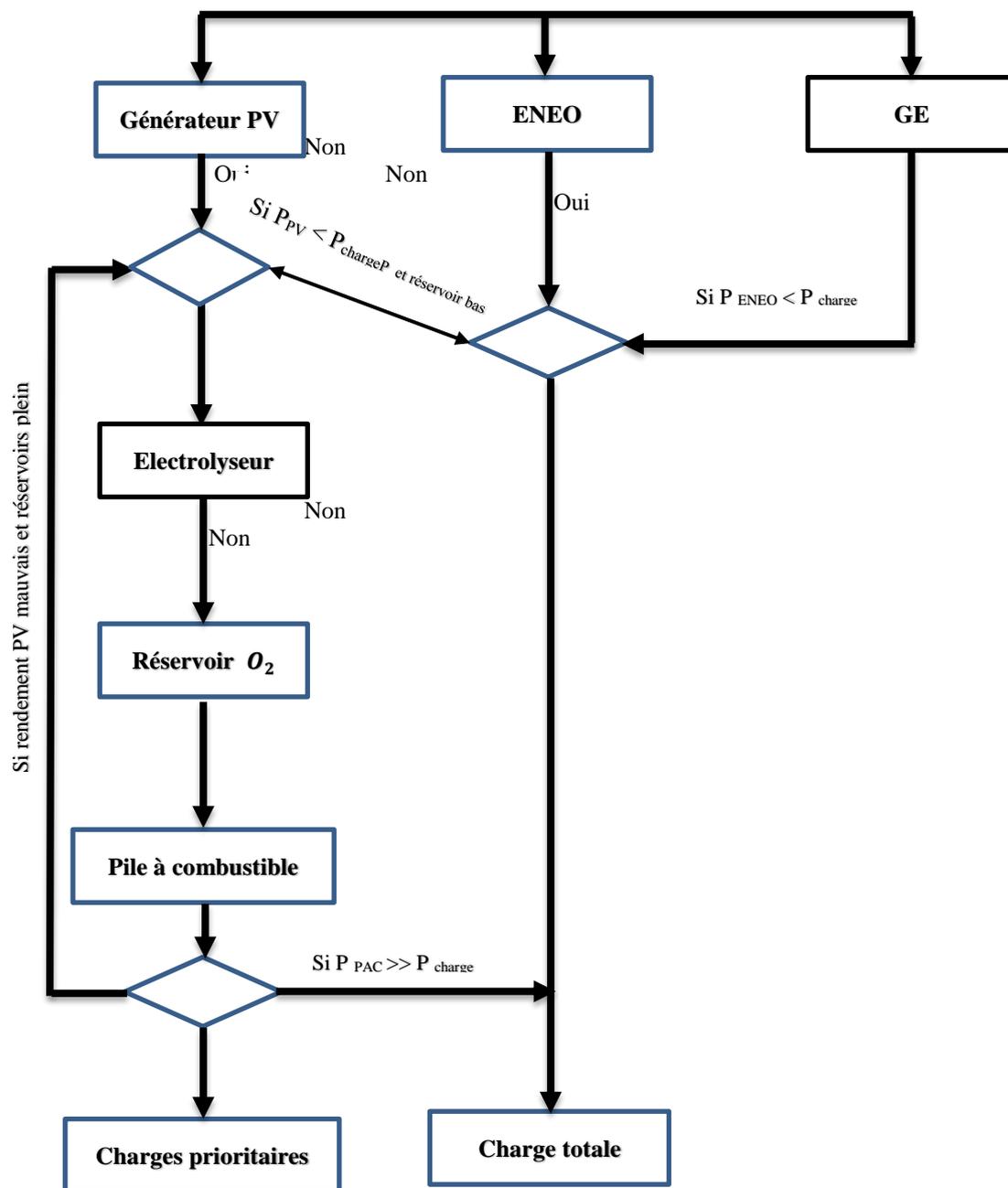


Figure 2.11 : Algorithme de commande

2.7. Conclusion

Les outils et méthodes invoqués dans la littérature nous ont permis d'étudier et d'établir un modèle conforme de notre système multi-sources. Autour de ce modèle, on a établi un ensemble de lois de contrôles et de commandes qui respectent le comportement d'un système physique. Il nous permettra de valider le comportement lors de la commutation des sources dans gestion des d'énergie en simulation. Ainsi, nous allons valider notre système en simulation sous MATLAB. Le prochain chapitre permet de vérifier les méthodes et algorithmes proposés dans ce chapitre puis de présenter une synthèse de ces résultats.

Simulations, Résultats et Analyses

3.1. Introduction

L'hybridation des sources d'énergies a pour objectif de satisfaire la demande énergétique de façon permanente. Elle apporte ainsi une solution notoire aux problèmes de demande énergétique du consommateur. Lors du transit, le système hybride subit un ensemble d'effets interne ou/et externe. Il est présenté dans les chapitres qui précèdent des dispositifs qui favorisent la mise en œuvre d'un système de commutation multi-sources. Nous avons conçu une interface qui permet la gestion du système multi-source au tour d'une carte électronique. Nous consacrons ce chapitre aux présentations des résultats partant de la simulation jusqu'à la mise en œuvre de l'interface. Il s'agit des résultats en simulation et les résultats expérimentaux.

3.2. Présentation des résultats en simulation

Il est présenté dans cette section, le schéma bloc global de simulation dans le logiciel MATLAB et les différents résultats obtenus.

Au terme du dimensionnement, nous avons obtenus dont les différentes caractéristiques des composants du système sont présentés dans le tableau 1.3.

Tableau 1.3 : puissance des éléments du système

| Désignation | Puissance (W) | Tension (V) | Courant (A) | Nombre en série | Nombre de cellules en parallèle |
|---------------------------|------------------|----------------|----------------|--------------------|------------------------------------|
| Champ PV | 5985 | 24 | 58 | 3 | 8 |
| Electrolyseur | 4190 | 72 | 58 | 45 | / |
| Pile à combustible | 12760 | 220 | 24 | 45 | / |

3.3. Base métrologique

Les caractéristiques métrologiques de la zone d'étude sont résumées sur la figure 3.1

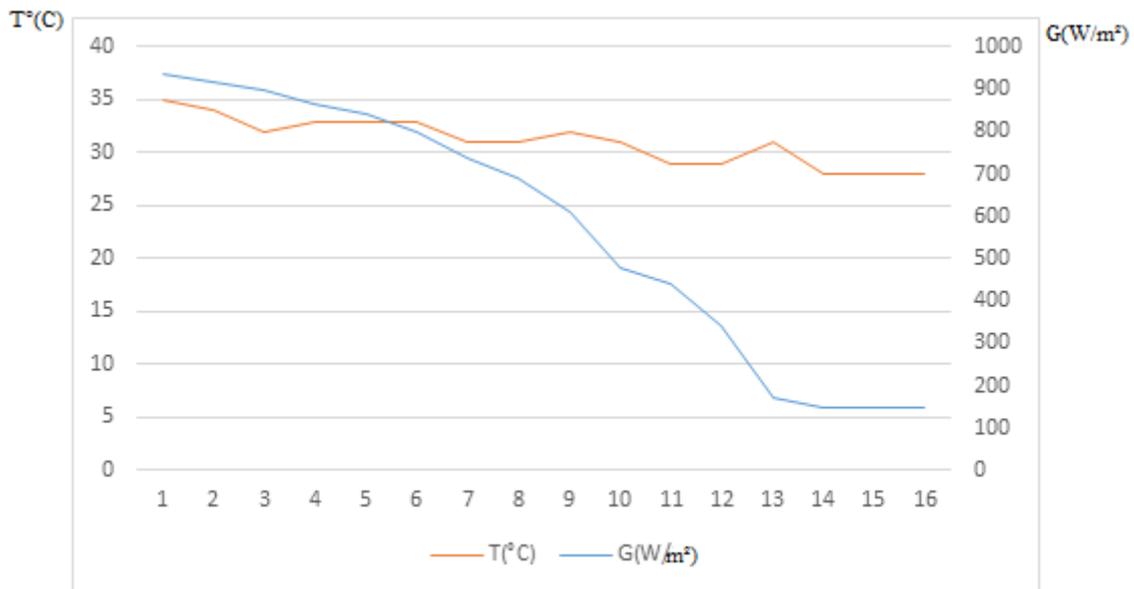


Figure 3.1 : caractéristique de la zone métrologique

3.4. Simulation du générateur PV

Le schéma de générateur photovoltaïque en l'environnement Matlab-Simulink est représenté par :

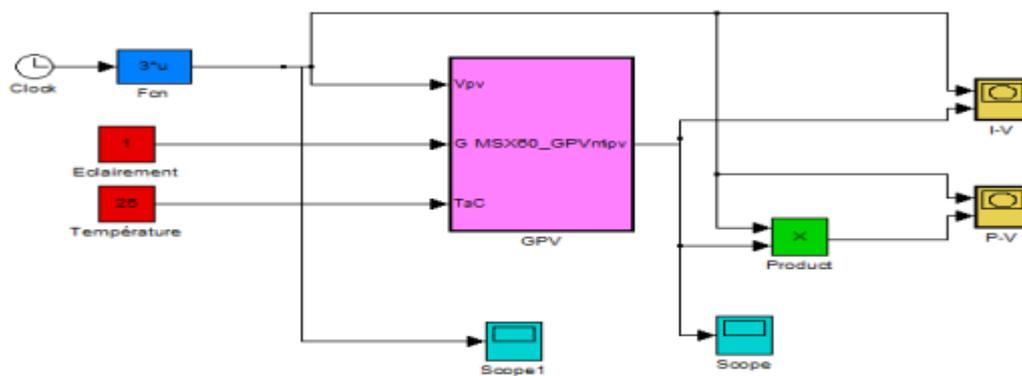


Figure 3.2
: Schéma

de générateur PV en MATLAB-SIMULINK

3.4.1. Simulation des caractéristiques I-V et P-V du panneau

Sur les figures 3.3 et 3.4 sont représentés les caractéristiques courant-tension (P-V) et puissance tension (I-V). On fait les mêmes observations et on note que dans le cas le plus favorable la puissance délivrée par le panneau plafonne à 250 W.

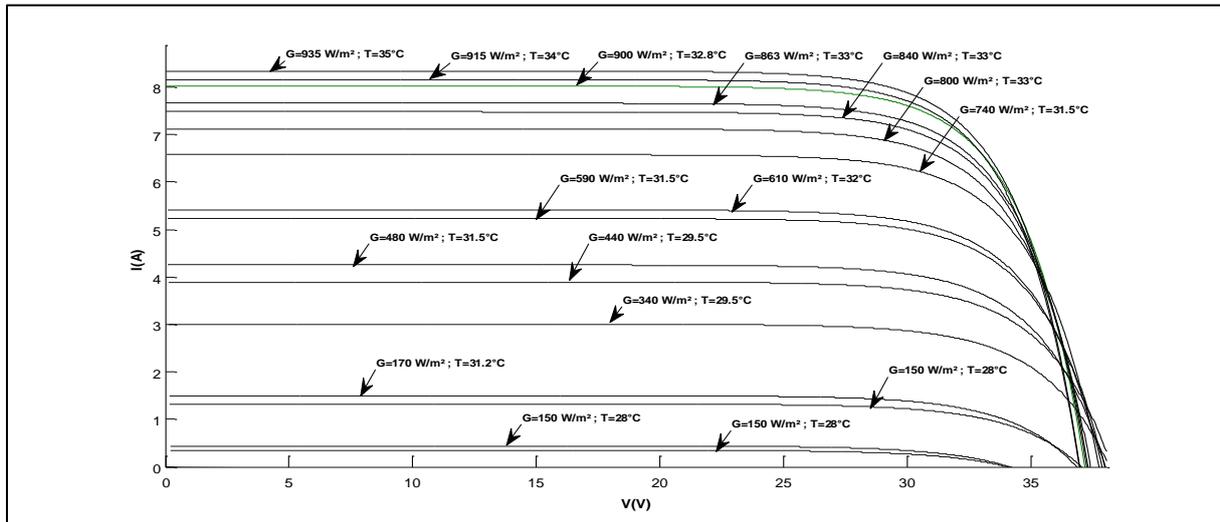


Figure 3.3 : Evolution des caractéristiques I-V du panneau sous excitations météorologiques réelles

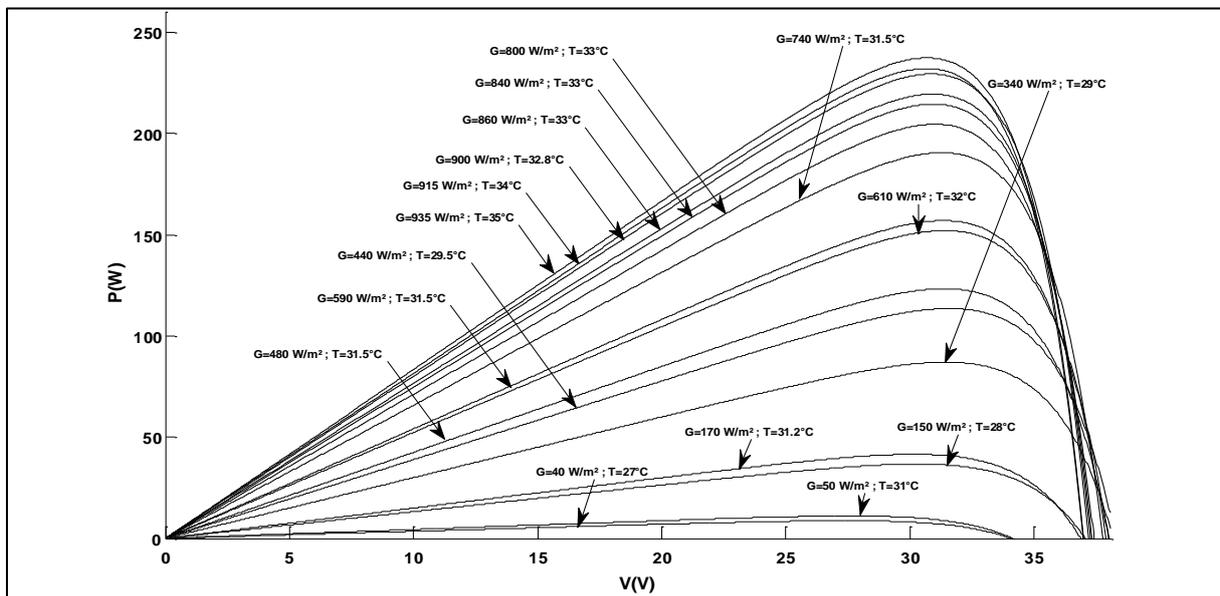


Figure 3.4: Evolution des caractéristiques P-V du panneau sous excitations météorologiques réelles

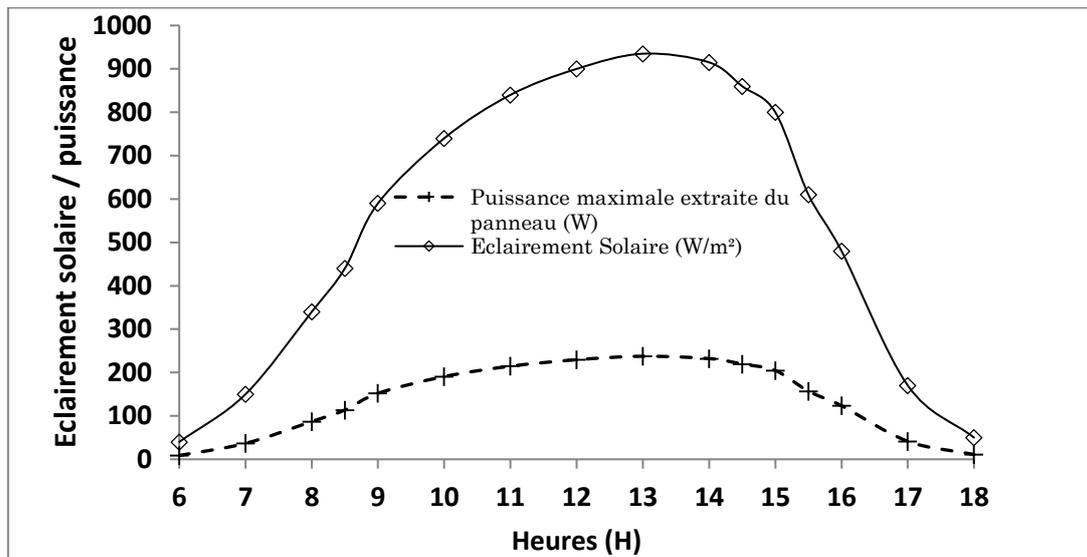


Figure 3.5 : Evolution de la puissance maximale extraite d'un panneau au cours d'une journée de référence.

La simulation du champ PV de 24 panneaux dont 03 en série et 08 en parallèle noté 24P3S8P sont présentés en annexes.

La simulation du champ PV de 24P3S8P a permis d'extraire la puissance maximale présentée dans la figure 3.6

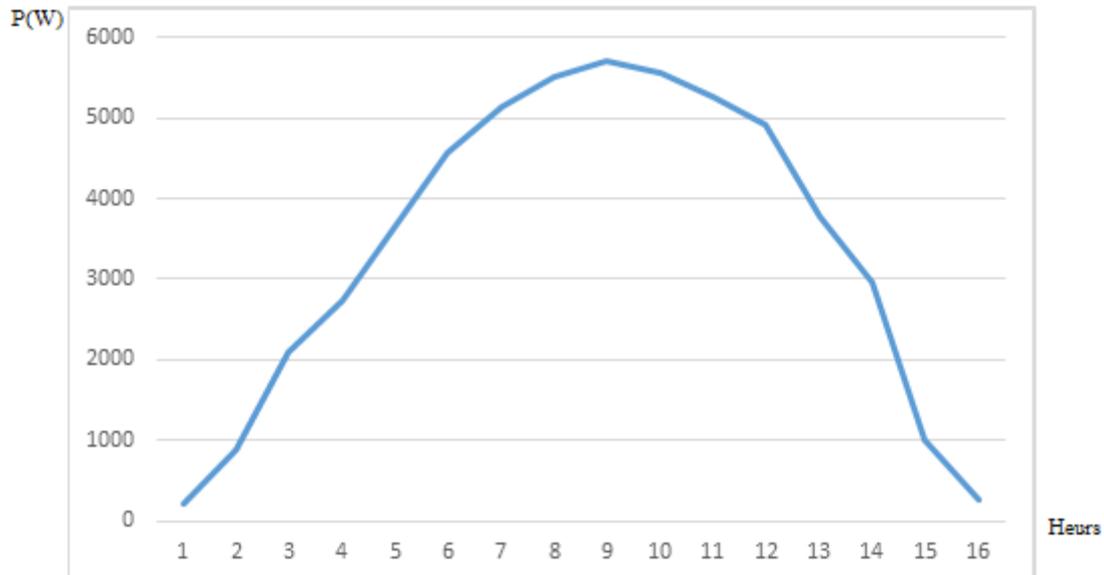


Figure 3.6 : caractéristique de la puissance du champ PV

3.5. Résultats et analyse

Nous commençons par évaluer en situation réelle la production de notre système dimensionné dont les résultats sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 1.3 : valeurs caractéristique des différents éléments

| Heure (H) | Eclairement (W/m ²) | Puissance maximale champ PV (W) | débit hydrogène (g/s) | production tranche horaire (g) | Production O2 (g) | production O2 (m ³) | Energie restituable (kWh) |
|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------|
| 6 | 40 | 210,2 | 0,00168856 | 6,07880468 | 48,6304374 | 0,11396619 | 0,20260656 |
| 7 | 150 | 880,3 | 0,00707153 | 25,457525 | 203,6602 | 0,47728086 | 0,84849931 |
| 8 | 340 | 2089,15 | 0,01678234 | 60,4164357 | 483,3314857 | 1,13269489 | 2,0136798 |
| 8,5 | 440 | 2725,1 | 0,02189099 | 78,8075672 | 630,4605374 | 1,47749412 | 2,62665621 |
| 9 | 590 | 3649,55 | 0,02931719 | 105,541873 | 844,3349801 | 1,97871222 | 3,51771061 |
| 10 | 740 | 4573,8 | 0,03674178 | 132,270394 | 1058,163152 | 2,47982188 | 4,40857223 |
| 11 | 840 | 5148,85 | 0,04136121 | 148,900349 | 1191,202796 | 2,79160236 | 4,96284865 |
| 12 | 900 | 5507 | 0,04423826 | 159,257742 | 1274,061935 | 2,98578405 | 5,30806054 |
| 13 | 935 | 5696,9 | 0,04576375 | 164,749488 | 1317,995903 | 3,08874399 | 5,49110043 |
| 14 | 915 | 5570,15 | 0,04474555 | 161,083986 | 1288,671888 | 3,02002271 | 5,36892925 |
| 14,5 | 860 | 5267,4 | 0,04231353 | 152,328714 | 1218,629714 | 2,85587778 | 5,07711605 |
| 15 | 800 | 4910,45 | 0,03944612 | 142,006025 | 1136,048199 | 2,6623467 | 4,73306081 |
| 15,5 | 610 | 3767,45 | 0,03026429 | 108,95144 | 871,6115195 | 2,04263521 | 3,63135149 |
| 16 | 480 | 2959,6 | 0,02377475 | 85,5891071 | 684,712857 | 1,60463528 | 2,85268494 |
| 17 | 170 | 996,3 | 0,00800337 | 28,812146 | 230,4971683 | 0,54017372 | 0,96030883 |
| 18 | 50 | 265,05 | 0,00212917 | 7,66501988 | 61,32015906 | 0,14370475 | 0,25547511 |
| Total journalier | | 54217,25 | 0,43553239 | 1567,91662 | 12543,33293 | 29,3954967 | 52,2586608 |

Le tableau tableau qui précède, nous permet d'interpréter les résultats obtenus à partir des courbes fonctionnelles des différents équipements de notre système.

Les données du tableau ont permis de construire les graphiques ci-après : 3.7 ; 3.8 ; 3.9 ; 3.10 ; 3.11.

3.5.1. Caractéristique de la puissance fournie par le panneau PV en fonction de l'éclairement journalier

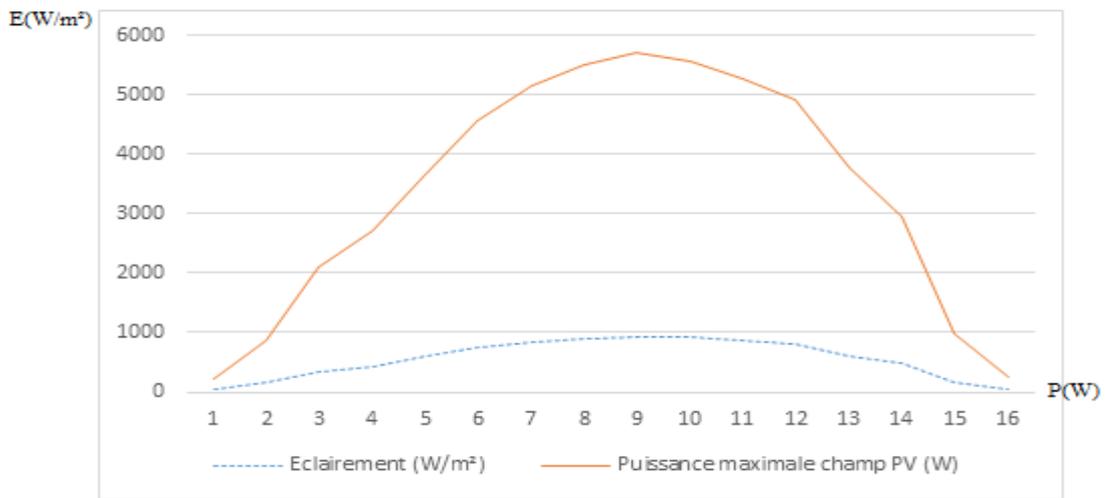


Figure 3.7 : Evolution de l'éclairement en fonction de la puissance maximale des panneaux PV au cours d'une journée.

Sur cette courbe, nous pouvons observer l'évolution de la puissance produite par les PV en fonction de l'éclairement journalier

3.5.2. Evolution de la production d'hydrogène en m³/s et en g/s

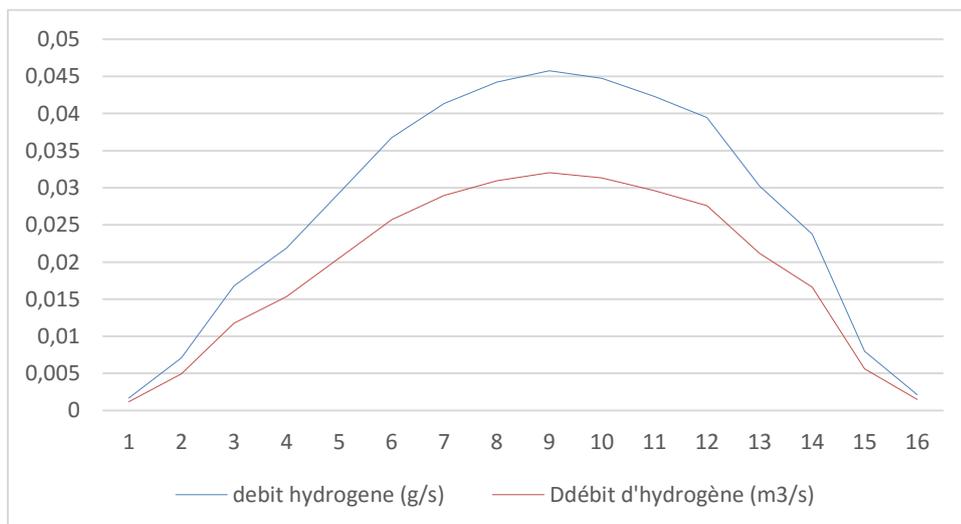


Figure 3.8 : production d'hydrogène au cours d'une journée.

Nous constatons ici que la production d'hydrogène varie aussi en fonction de la variation de la puissance des panneaux PV.

3.5.3. Evolution de la production d'oxygène en m³/s et en g/s

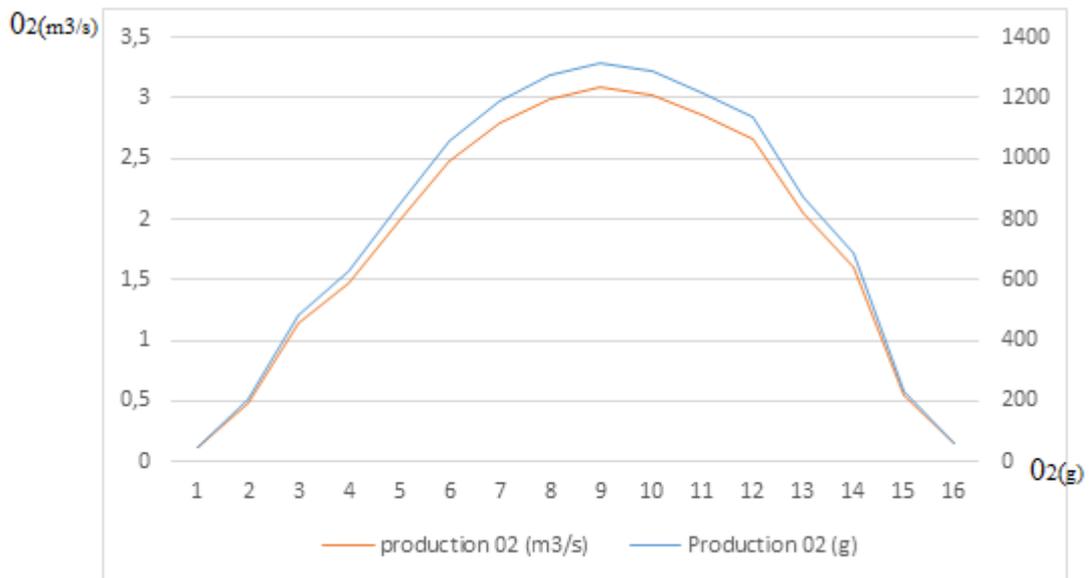


Figure 3.9 : Production d'oxygène au cours d'une journée.

La production d'oxygène varie nettement en fonction de la variation de la puissance des panneaux PV

3.5.4. Caractéristique de l'énergie électrique en sortie de la pile à combustible en fonction de la puissance des panneaux PV

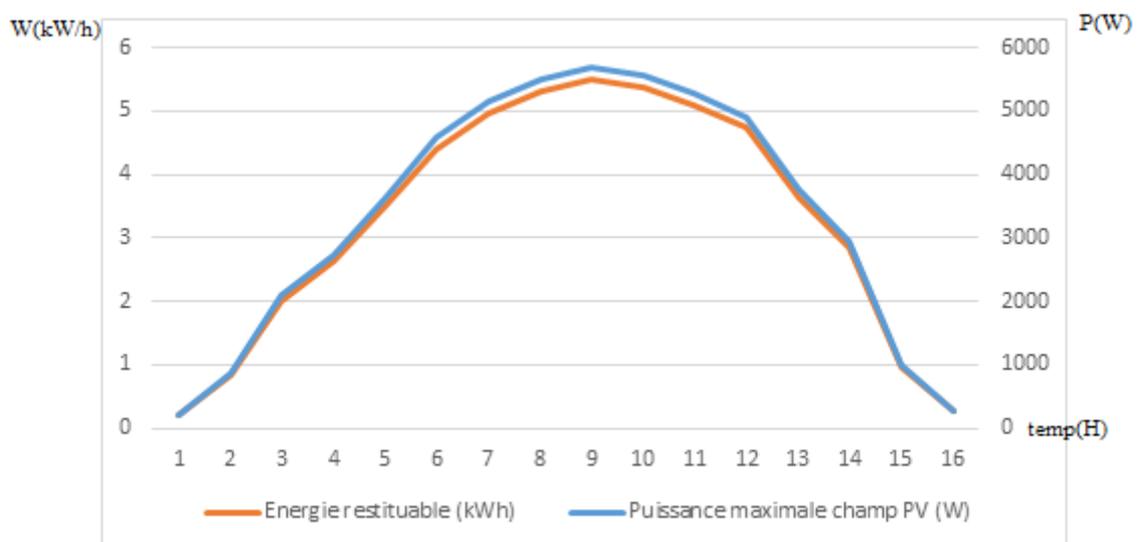
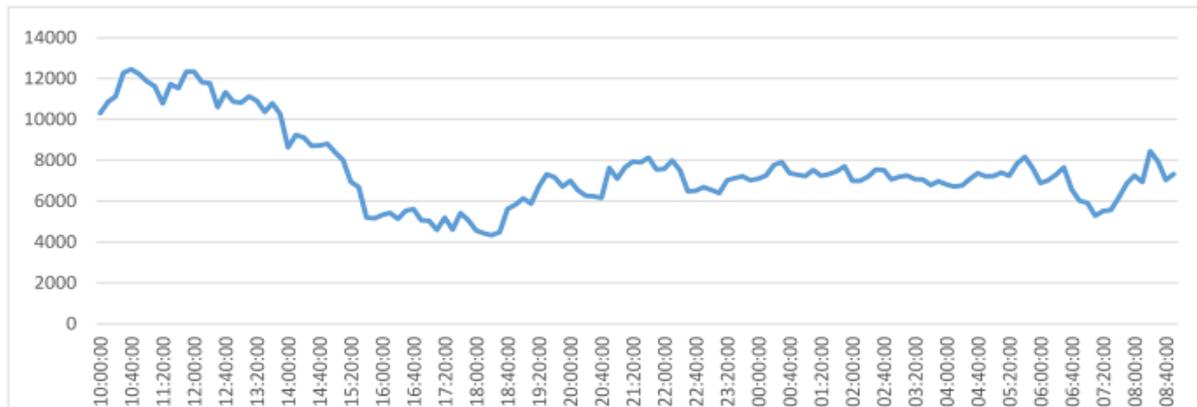


Figure 3.10 : Evolution de la de l'énergie en sortie de la pile à combustible en fonction de la puissance maximale des panneaux PV.

Quel que soit la variation de la puissance du champ PV l'énergie électrique en sortie de la pile à combustible reste constante

3.8. Analyse des alimentations électrique

La courbe de charge de l'hôpital nous donne une consommation d'énergie électrique journalier de $W = 130000W / J$ ce qui fait un cout de consommation estimé à 117000FrCFA/mois



La caractéristique de la figure : 3.5.5 nous donne la puissance excédentaire produite par la pile à combustible susceptible d'être desservie aux autres circuits électriques de l'hôpital.

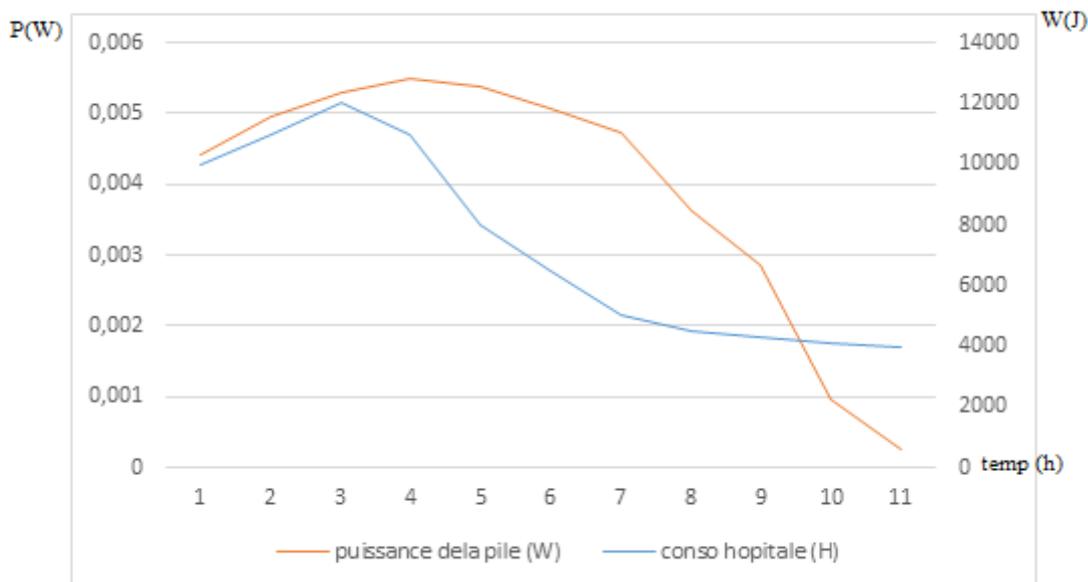


Figure 3.11 : caractéristique de la puissance de la pile en fonction de la consommation

Nous observons qu'avec nos systèmes 18% de cette puissance est produite par la pile à combustible. Par conséquent, en utilisant un tel système l'hôpital fera une économie considérable de 18% du cout de consommation énergétique.

La caractéristique 3.12 nous permet de faire une analyse comparative des sources d'énergie en fonction de la demande.

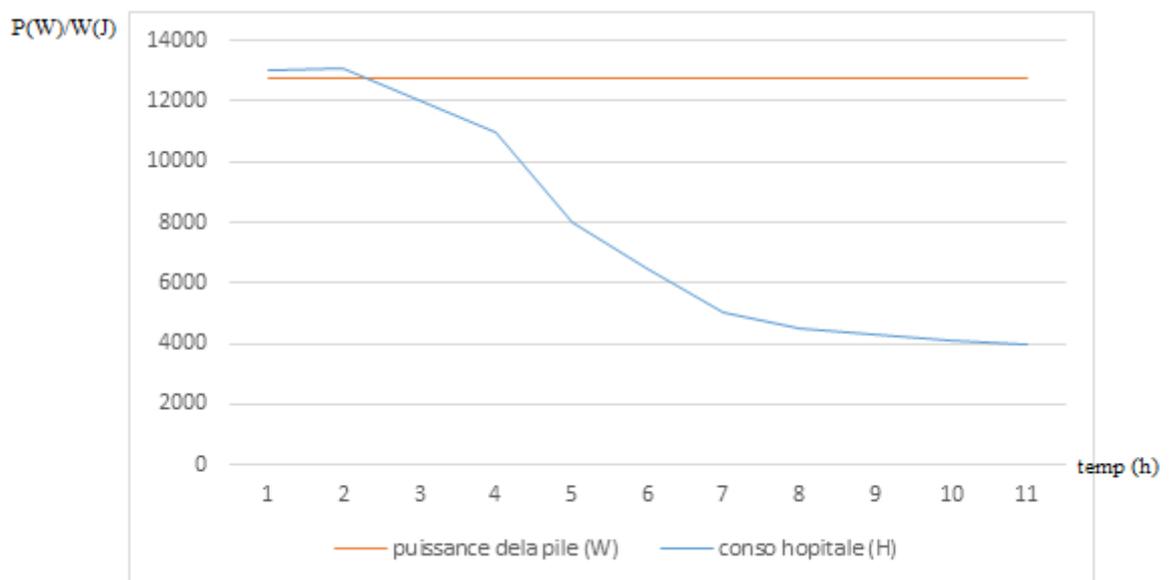


Figure 3.12: analyse comparative

Nous constatons sur cette courbe que :

- Dans l'intervalle horaire où la demande de la charge est supérieure à la puissance de la pile à combustible, la source Eneo ou groupe électrogène assure l'alimentation des charges de l'hôpital.
- Dans les intervalles horaires où la puissance de la pile à combustible est supérieure à la demande de la charge, cette dernière assure l'alimentation des charges de l'hôpital.

Il est important de noter ici que, l'excédent d'énergie produite par le champ PV peut être compensé un éventuel déficit dans certains secteurs de l'hôpital notamment les secteurs sensibles.

Au terme de ces résultats, nous pouvons assurer la faisabilité et la fonctionnalité de notre système multi-sources. En comparaison avec les systèmes classiques utilisés notamment pour notre cas d'étude (hôpital de BIYEMASSI) dont la courbe de consommation énergétique nous a été présentée, on peut observer une baisse du coût de consommation énergétique ceci due à la segmentation des charges. Notamment la pile à combustible qui alimente les salles sensibles de l'hôpital.

3.9. Conclusion

Dans ce chapitre, il était question de présenter et analyser les résultats obtenus en simulation. Il en ressort d'après les différentes courbes obtenues que notre électrolyseur et notre pile à combustible pourront fournir à cet hôpital no, une quantité suffisante d'oxygène au patient en détresse respiratoire en ce concerne l'électrolyseur, et une énergie disponible et de qualité à cet hôpital en ce concerne la pile à combustible.

Conclusions générale et/perspectives

Dans ce mémoire de fin d'étude, nous avons exploré de façon théorique, en simulation et expérimentale le fonctionnement d'un micro-réseau hybride avec système PAC-Electrolyseur dans le but d'améliorer la qualité d'énergies et fluides en milieu hospitalier. Il en ressort de cette étude que le dispositif qui fait l'objet de notre étude contribuera considérablement à la résolution des divers problèmes que nous avons mentionnés au début de ce travail. Nous avons démontré à l'aide du dimensionnement qu'il est possible grâce à l'électrolyseur de produire de l'oxygène et de le mettre à la disposition des patients en déficit respiratoire. Dans ce travail, nous avons pu exploiter l'oxygène et l'hydrogène produites par l'électrolyseur dans le but de produire de l'énergie électrique à partir de la pile à combustible pour alimenter les secteurs sensibles de l'hôpital. Une étude démontrée que ce système permettra à cet hôpital de faire une économie financière en ce qui concerne l'achat énergétique d'environ 18%. Notre contribution dans ce travail a été d'une part, exploiter l'oxygène sortie de l'électrolyseur pour le mettre à la disponibilité des nécessiteux. D'autre part, utiliser la pile à combustible pour alimenter une charge à partir des fluides sortis de l'électrolyseur. Compte tenu de l'importance de ce projet dans notre société, nous projetons poursuivre cette étude de sorte à exploiter de l'eau disponible en sortie de la pile à combustible pour la distribuer pour un usage domestique et sanitaire.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] a. s. fraser. simulation of genetic systems by automatic digital computers. i. introduction. *australian journal of biological science*, 10: 484–491, 1957. c.bernard, «station solaire autonome pour l'alimentation station pompage,» l'archive ouverte pluridisciplinaire, hal, 2006.
- [2] J. H. Holland. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, first edition, 1975. Reprinted in 1992 by MIT Press. K.Benlarbi, «Optimisation Floue, neuronale et neuro-floue d'un systeme de pompage,» These de Magister Université, Teheran, 2003.
- [3] J. R. Koza. Hierarchical genetic algorithms operating on populations of computer programs. In *Proceedings of the 11th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, vol. 1, pp. 768–774, Detroit, Michigan, USA, August 1989. Morgan Kaufmann. M.Kadjoudj et al, «modélisation des machines électriques».
- [4] J. R. Koza. *Genetic programming: A paradigm for genetically breeding populations of computer programs to solve problems*. TechnicalReportSTANCS-90-1314, Stanford University, Department of Computer Science, 1990. A. S. Fraser. *Simulation of genetic systems by automatic digital computers. I. Introduction*. *Australian Journal of Biological Science*, 10: 484–491, 1957.
- [5] L. J. Fogel. *Autonomous automata*. *Industrial Research Magazine*, 4(2): 14– 19, 1962. J. H. Holland. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, first edition, 1975. Reprinted in 1992 by MIT Press.
- [6] L. J. Fogel, A. J. Owens, & M. J. Walsh. *Artificial Intelligence through Simulated Evolution*. John Wiley & sons, first edition, 1966. J. R. Koza. Hierarchical genetic algorithms operating on populations of computer programs. In *Proceedings of the 11th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, vol. 1, pp. 768–774, Detroit, Michigan, USA, August 1989. Morgan Kaufmann.
- [7] H. G. Beyer. *The theory of evolution strategies*. Springer, first edition, 2001. J. R. Koza. *Genetic programming: A paradigm for genetically breeding populations of computer programs to solve problems*. TechnicalReportSTANCS-90-1314, Stanford University, Department of Computer Science, 1990.
- [8] I. Rechenberg. *Cybernetic solution path of an experimental problem*. Technical report, Library translation 1122, Ministry of Aviation, Royal Aircraft Establishment (UK), 1965.

- [9] R. Storn & K. Price. Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4): 431–359, 1997.
- [10] K. Price, R. Storn, & J. Lampinen. *Differential Evolution - A Practical Approach to Global Optimization*. Springer, 2005.
- [11] A.E.Eiben&J.E.Smith. *Introduction to Evolutionary Computing*. Springer, second edition, 2008.
- [12] J. Branke, T. Kaußler, C. Schmidt, & H. Schmeck. A multi-population approach to dynamic optimization problems. In *Proceedings of Adaptive Computing in Design and Manufacturing*, pp. 299–308, Berlin, Germany, April 2000. Springer.
- [13] Electrolyse de l'eau. Wikipedia (2016)
- [14] de levie, R. The electrolysis of water. *J. Electroanal. Chem.* 476, 92-93 (1999)
- [15] Zeng K et Zhang D, Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Prog. Energy Combust. Sci* 36, 307-326 (2010)
- [15] K. Wang et al., « A Review on solid oxide fuel cell models », *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011.
- [16] D. Marra et B. Bosio, « Process analysis of 1 MW MCFC plant », *International journal of hydrogen energy*, vol. 32, no. 7, p. 809–818, 2007.
- [17] « Hydrogène : production, stockage et conversion », n-ghy.com. [Online]. Available: <http://www.n-ghy.com/new/hydrogene/filiere>. [Accessed: 16-févr-2011].
- [18] N. Lymberopoulos, *Hydrogen production from renewables*. Centre for Renewable Energy Sources, 2005.
- [19] S. Rabih, « Contribution à la modélisation de systèmes réversibles de types électrolyseur et pile à hydrogène en vue de leur couplage aux générateurs photovoltaïques », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [20] E. Schouler, E. Fernandez et H. Bernard, 'Electrolyseur de la Vapeur d'Eau à Haute Température, Principe et Etat de Développement', *Revue Générale de l'Electricité*, N°3, Mars 1982.
- [21] P. Aujollet, 'Couplage d'un Réacteur Nucléaire avec un Electrolyseur à Vapeur à Très Haute Température', *DER/SERI*, Nov. 2003.
- [22] H. Wendt and G. Kreysa, 'Génie Electrochimique, Principes et Propriétés', Editions Dunod, 2001.
- [23] A. Damien, 'Hydrogène par Electrolyse de l'Eau', *Techniques de l'Ingénieur*, Vol. J6, N°6366, 12-1992.

[24] C. Darras, S. Sailler, C. Thibault, M. Muselli, P. Poggi, J.C. Hoguet, S. Melscoet, E. Pinton, S. Grehant, F. Gailly, C. Turpin, S. Astier, et G. Fontès, « Sizing of photovoltaic system coupled with hydrogen/oxygen storage based on the ORIENTE model », *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 35, Issue 8, April 2010, Pages 3322-3332

ANNEXES

1. Aperçu de la méthode de Newton-Raphson

Le principe de la méthode consiste à trouver les racines d'une fonction non linéaire, en calculant une linéarisation du Jacobien au voisinage d'une itérée initial. Cette valeur linéarisée est ensuite utilisée pour approcher au mieux le zéro le plus proche.

Un système d'équations non linéaires peut prendre la forme suivante :

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_N(x) \end{bmatrix} = Z \quad (4.30)$$

Où Z et x sont deux vecteurs d'ordre N et $f(x)$ un vecteur de fonction de dimension N .

Le système peut être réécrit sous la forme :

$$\mathbf{0} = Z - f(x) \quad (4.31)$$

En ajoutant Dx (où D est une matrice carré de dimension $N \times N$) dans chaque membre on obtient :

$$Dx = Dx + Z - f(x) \quad (4.32)$$

Par multiplication par D^{-1} , on a :

$$x = x + D^{-1}[Z - f(x)] \quad (4.33)$$

Dans la méthode de Newton-Raphson, la matrice D est spécifiée à partir de l'approximation de Taylor de x au point x_0

$$Z = f(x_0) + \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x_0} (x - x_0) \dots \quad (4.34)$$

En négligeant les termes d'ordre supérieur on peut extraire x suivant l'expression :

$$x = x_0 + \left[\left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x_0} \right]^{-1} [Z - f(x_0)] \quad (4.35)$$

Le terme x_0 est remplacé par la valeur de $x(i)$ à l'itération précédente et le terme x est remplacé par la valeur de $x(i+1)$ à l'itération courante.

$$x(i+1) = x(i) + J^{-1}(i)\{Z - f[x(i)]\} \quad (4.36)$$

La matrice Jacobienne J à chaque itération s'écrit :

$$J(i) = \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x(i)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_N} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_N}{\partial x_1} & \frac{\partial f_N}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_N}{\partial x_N} \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

Dans le cas du modèle PV à une diode, en assimilant à titre d'illustration l'équation (4.2) à la fonction $f_i(x)$ on peut exprimer les éléments de la ligne 1 de la matrice Jacobienne comme suit :

$$J(1, 1) = 1$$

$$J(1, 2) = -\exp\left(\frac{qV_{oc}}{AkT}\right) + 1$$

$$J(1, 3) = -\frac{qI_0V_{oc}\exp\left(\frac{qV_{oc}}{AkT}\right)}{A^2kT}$$

$$J(1, 4) = 0$$

$$J(1, 5) = -\frac{V_{oc}}{R_p^2}$$