

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel  
Faculté des Sciences et de la Technologie



جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل  
كلية العلوم والتكنولوجيا

**Département D'Électrotechnique**

# Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme

**Master en Électrotechnique**

Option : Énergies renouvelables

## Thème

**Etude et modélisation d'une source d'énergie électrique  
à base d'une pile à combustible**

par :

**Mr / DENNI Taqiy eddine**

et

**Mr / DJAOUI Adel**

Travail proposé et dirigé par :

**Mr / BOUDJERDA Nasserline**

**Promotion 2020**

Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel  
PB 98, Ouled Aissa. 18000. Algérie. Tél : +213 34 50 11 89  
<http://www.univ-jijel.dz>

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Allah le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné le courage, la patience et la volonté d'aller au bout de notre cursus.

Nous tenons à remercier très chaleureusement notre encadrant Mr Nasserline BOUDJERDA pour ses orientations, ses précieux conseils et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Merci !

<b>Introduction Générale.....</b>	<b>01</b>
-----------------------------------	-----------

## **Chapitre I : Généralités sur les piles à combustible ; types et quelques applications**

I.1	Introduction.....	03
I.2	Définition .....	03
I.3	Historique .....	03
I.4	Fonctionnement d'une pile à combustible.....	05
I.5	Différentes technologies de piles à combustible .....	09
I.5.1	Etude comparative .....	09
I.6	Applications des piles à combustible .....	10
I.6.1	Transport .....	10
I.6.2	Stationnaires.....	14
I.6.3	Nomades .....	15
I.7	Conclusion .....	15

## **Chapitre II : Modélisation de la pile à combustible de type PEMFC**

II.1	Introduction .....	16
II.2	Quelques modèles de la pile à combustible PEMFC .....	16
II.2.1	Modèles à électrodes non dissociées .....	16
II.2.2	Modèles à électrodes dissociées .....	17
II.3	Modèle d'Amphlett et al. ....	17
II.3.1	Potentiel thermodynamiques .....	18
II.3.2	Pertes d'activation .....	18
II.3.3	Phénomènes ohmiques .....	19
II.3.3.1	Conduction électronique .....	20
II.3.3.2	Conduction protonique .....	20

II.3.4	Pertes de concentration .....	21
II.3.5	Courbe de polarisation .....	21
II.3.6	Influence de la température et de la pression sur les caractéristiques (V-I) et (P-I) .....	22
II.4	Modèle statique de Laminie-Dicks.....	24
II.5	Modèle de Chamberlin-Kim .....	25
II.6	Conclusion .....	26

### **Chapitre III : Etude par simulation de la pile à combustible de type PEMFC**

III.1	Introduction .....	27
III.2	Présentation du modèle Simulink de la pile PEMFC .....	27
III.3	Fonctionnement nominal .....	28
III.4	Effet de la pression de l'hydrogène .....	29
III.5	Effet de la pression de l'air (oxygène).....	31
III.6	Effet de la température .....	32
III.7	Régime Dynamique .....	32
III.7.1	Cas d'une charge RL connectée directement à la pile à combustible	34
III.7.2	Cas d'une charge RL connectée à la pile à combustible par l'intermédiaire d'un hacheur boost (élevateur).....	35
III.8	Conclusion .....	36
	<b>Conclusion générale</b> .....	37
	Bibliographie .....	38

**Nomenclature :****Abréviations :**

PAC : Pile à combustible.

MCFC : Pile à combustible à carbonate fondu.

SOFC : Pile à combustible à oxyde solide.

PCFC : Pile à combustible à céramique protonant.

AFC : Pile à combustible alcaline.

DMFC : Pile à combustible à méthanol direct.

PEMFC : Pile à combustible à membrane d'échange de protons.

PAFC : Pile à combustible à acide phosphorique.

DBFC : Pile à combustible à hydrure de bore direct.

DEFC : Pile à combustible à éthanol direct.

FAFC : Pile à combustible à acide formique.

EME : assemblées membrane-électrode.

Convertisseur DC-DC : convertisseur courant continue – continue.

**Symboles :**

$E_{th}$ : Potentiel théorique fonction de la température et de la pression.

$\eta_{act}$ : Pertes par activation.

$\eta_{conc}$ : Pertes par diffusion.

$R_{mem}I$ : Pertes ohmiques principalement dues à la membrane.

$E_{th_c}$  et  $E_{th_a}$ : potentiels théoriques respectivement à la cathode et à l'anode.

$\eta_{act_c}$  et  $\eta_{act_a}$ : pertes par activation.

$\xi_1, \xi_2, \xi_3$  et  $\xi_4$ : coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de PAC.

$A_{fc}$ : Surface active de la pile à combustible ( $\text{cm}^2$ )

$K_{cell}$ : ??????

$C_{H_2}$ : Représente les concentrations d'hydrogène ( $\text{mol/cm}^3$ ).

$C_{O_2}^*$ : Représente les concentrations de l'oxygène ( $\text{mol/cm}^3$ ).

$P_{cath}$ : Pression de l'oxygène à la cathode.

$X_{H_2O}^{sat}$ : Fraction molaire de saturation de l'eau dans le gaz humidifié et supposée  $\approx 50\%$ .

$R_c$ : la résistance équivalente de contact à la conduction des électrons.

$R_m$ : la résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons.

$l$  : Épaisseur de la membrane ( $\mu m$ ).

$A_{fc}$  : Surface active de la pile ( $cm^2$ ).

$r_m$  : Résistance spécifique de la membrane (ohm.cm).

$T$  : la température de la pile (Kelvin).

$\lambda_{H_2O_2/SO_3^-}$  : Est le taux d'hydratation (teneur en eau dans la membrane).

$B$  : est une constante empirique qui dépend du type de pile et de son état de fonctionnement.

$I$  : est la densité de courant du fonctionnement permanente ( $A=cm^2$ ).

$I_{max}$  : la densité de courant maximale.

$E_0$  : Tension réversible sans pertes de la pile à combustible.

$I$  : Courant délivré par la pile.

$i_0$  : Courant de l'échange à laquelle la surtension commence à se déplacer à partir de zéro.

$A$  : Pente de la droite de Tafel.

$i_{lim}$  : Courant limite.

$B$  : Constante de transfert de masse.

$i_n$  : Courant interne.

$R$  : Constante universelle des gaz.

$F$  : Nombre de Faraday.

$\alpha$  : Coefficient de transfert de charge. Sa valeur dépend de la réaction mise en jeu et du matériau d'électrode.

$V$  : La tension de cellule (V).

$J$  : La densité de courant ( $A.cm^{-2}$ ).

$E_0$  : La tension en circuit ouvert (V).

$b$  : Le paramètre de Tafel pour la réduction de l'oxygène (V).

$R_S$  : La résistance.

« $m, n$ » : Les paramètres de la diffusion (V et  $A^{-1}$ ).

$T_n$  : la température nominale de fonctionnement nominal ( $^{\circ}C$ ).

$V_n$  : la tension nominale aux bornes de la PAC nominal (V).

$I_n$  : le courant nominal (A).

$P_{H_2}$  : la pression nominale de l'hydrogène (Bar).

$P_{O_2}$  : la pression nominale de l'oxygène (Bar).

$R : R1 : R2$  : charge résistive ( $\Omega$ ).

$L1$  : charge inductive (mH).

$V$  : la tension (V).

$I$  : le courant (A).

$P$  : la puissance (W).

## Introduction générale

De nos jours, on parle de plus en plus du changement climatique, de la pollution de l'air qui entraîne la dégradation de l'environnement ainsi que de l'épuisement des ressources d'énergie fossile qui concerne la sécurité d'approvisionnement de l'énergie. Tous ces problèmes nous amènent à chercher des solutions efficaces et durables pour une exploitation fiable des ressources d'énergies propres et renouvelables. Une solution parmi tant d'autre consiste à utiliser des sources hybrides comprenant de l'éolien, du photovoltaïque, le tout relié à une pile à combustible (PAC). Bien entendu, ceci n'est possible qu'avec l'augmentation de l'efficacité des systèmes de conversion d'énergie existant et l'optimisation de leur utilisation. Tout cela favorise un développement durable et la protection de l'environnement.

Les piles à combustible (**PAC**) sont des convertisseurs électrochimiques. Elles convertissent l'énergie chimique en une énergie électrique directement disponible grâce à une réaction d'oxydoréduction. Dans notre cas, nous nous intéressons aux piles à membrane protonique plus communément appelées **PEMFC** (Proton Exchange Membrane Fuel Cell). Ce type de piles domine le marché puisqu'elles conviennent à de nombreuses applications portables et stationnaires, elles possèdent de bonnes performances et offrent des conditions de fonctionnement moins contraignantes que les autres familles de PAC.

Elles peuvent être utilisées dans plusieurs domaines comme le transport automobile, les applications stationnaires (cogénération, groupe électrogène) et les applications portables (téléphones, ordinateurs portables).

Ce travail de mémoire comporte trois parties.

- Dans le premier chapitre, nous commençons par une définition de la pile à combustible, puis un historique sur les piles à combustible suivi de leur principe de fonctionnement. Choisir la pile à combustible de type PEMFC parmi les autres, selon certains critères, nous conduit à approfondir ce type. En suite, on rappelle les différentes technologies des piles à combustible et on fait une comparaison entre eux. Pour finir ce chapitre on cite les différentes applications des piles à combustible.
- Dans le deuxième chapitre, nous abordons la partie de la modélisation et d'identification des modèles de la pile à combustible connus. Ce chapitre vise à évaluer les différents modèles d'analyse sont utilisés pour la pile à combustible de type PEMFC. Les trois modèles : modèle Amphlett, modèle Larminie-Dicks et le modèle Chamberlin-Kim sont étudiés.

- Dans le troisième et le dernier chapitre, nous effectuons quelques simulations de la pile à combustible de type PEMFC en utilisant le modèle d'Amphlet disponible sous MatLab/Simulink. Nous commençons par une présentation du modèle, ensuite nous analysons les effets respectifs de la pression de l'hydrogène, de la pression de l'oxygène et de la température sur le fonctionnement en régime établi et nous terminons par quelques simulations en régime dynamique.

Enfin, nous terminons ce mémoire par une conclusion général.



# **Chapitre I :**

**Généralités sur les piles à combustible ;  
types et quelques applications**

## I.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à quelques généralités sur les piles à combustible (PACs). Nous commençons par quelques définitions et un historique, ensuite nous donnons leur principe de fonctionnement ainsi que les types des PACs et les applications les plus utiles.

## I.2. Définition

Une pile à combustible (PAC) permet de convertir directement de l'énergie chimique de combustion (oxydo-réduction) en énergie électrique, en chaleur et en eau. Le cœur d'une PAC est constitué de trois éléments, dont deux électrodes : une anode oxydante (émettrice d'électrons), une cathode réductrice (collectrice d'électrons) et un électrolyte qui sépare ces électrodes. L'électrolyte a la propriété de conduire directement des molécules ionisées d'une électrode à l'autre et de faire barrage aux électrons en les obligeant à passer par le circuit extérieur de la pile ou leur énergie électromotrice peut être exploitée. L'alimentation d'une PAC se fait par injection continue de combustible à l'anode, généralement de l'hydrogène, et à la cathode, généralement l'oxygène de l'air ou l'air lui-même. Une énergie électrique continue est alors disponible aux bornes de la pile. Dans le langage courant, les piles à combustible utilisant généralement l'hydrogène ou un combustible hydrogéné sont appelées « piles à hydrogène ».

## I.3. Historique

La flèche chronologique de l'historique de la pile à combustible est représentée en figure 1.1. La découverte du principe de fonctionnement de la PAC a été en 1802 par Sir Henri David (production de l'énergie électrique par l'électrolyse inverse de l'eau), puis en 1838 par le Suisse Christian Schönbein qui découvre l'effet de **la PAC**. L'Anglais William Grove et le Suisse Christian Schönbein ont pu créer un premier prototype en 1845, prenant le nom de « Gas Battery ». En 1889, Ludwig Mond et son assistant Charles Langer créent la pile à combustible avec des électrodes en platine perforées développant une tension de 0,75 V pour une densité de flux (*quantité de chaleur passant par unité de surface*) d'environ  $2 \text{ A/m}^2$ , d'où le nom de « Fuel Cell ». En 1921, le Suisse Emil Baur améliore le rendement de la pile à combustible en faisant fonctionner cette dernière à haute température (1000 °C). Ensuite, en 1932, l'Anglais Francis Thomas Bacon, de l'université de Cambridge, reprend les travaux de Mond et Langer en remplaçant les éléments de platine par du nickel et de l'acide phosphorique par de l'hydroxyde de sodium. Il s'agira de la première pile de type alcaline

(AFC, Alkaline Fuel Cell). En 1933, Emile Baur arriva à la conclusion que la configuration optimale de la pile est l'association de l'hydrogène comme combustible et d'un composé alcalin comme électrolyte. Dans les années 60, la pile à combustible de M. Bacon est utilisée par la NASA comme générateur pour leurs engins spatiaux habités[1].

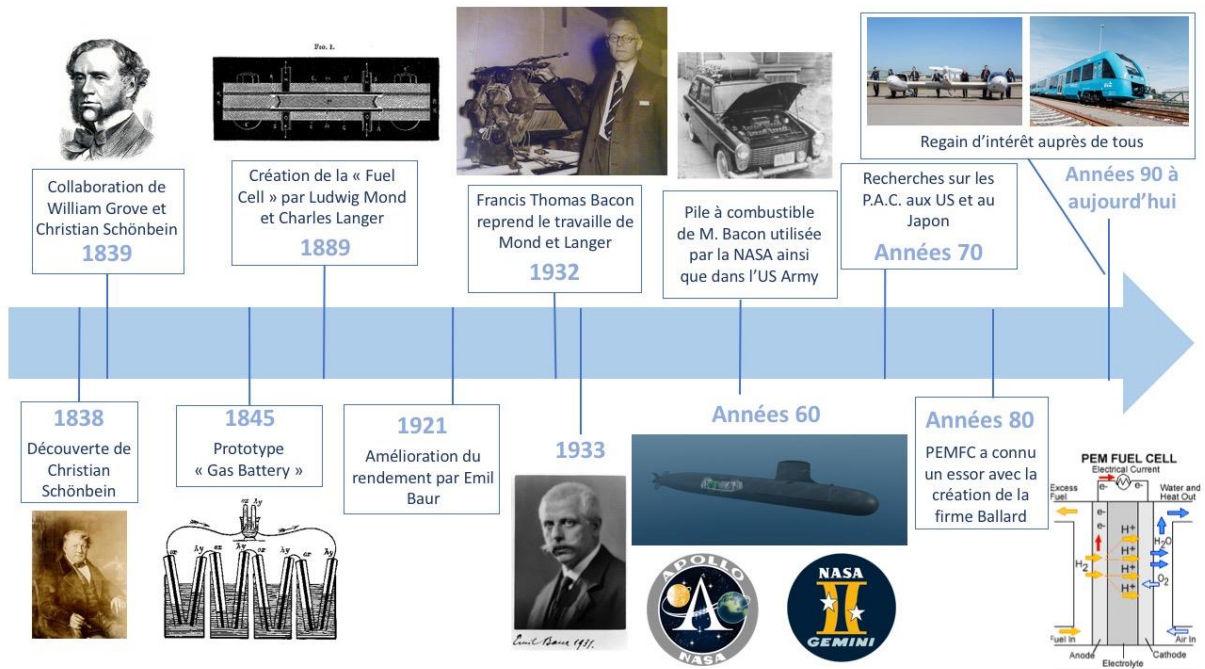


Figure I.1: Flèche chronologique de l'historique de la pile à combustible



Figure I.2. Francis Thomas Bacon et sa pile à combustible [2]

Parmi les premiers prototypes de véhicules fonctionnant avec une pile, la figure I.4 montre un tracteur électrique et une voiture Austin A40 (cette dernière a une autonomie de 300 km, et a parcouru pendant 3 ans un total de 16 000 km).



*Tracteur électrique*

*Austin A40*

**Figure I.3.** Quelques un des premiers prototypes de véhicules fonctionnant avec une pile[3]

Pendant les années 70, de plus en plus de recherches sur les piles à combustible (Etats-Unis et Japon) ont été effectuées. Dans les années 80, dû au coût de fabrication des matériaux mais aussi de son volume et de son poids cela rend difficile son intégration à des systèmes de petite taille. Cependant elle se poursuit au Japon et en Amérique. A partir des années 1990 les piles à combustibles connaissent un regain d'intérêt auprès de tous.

#### **I.4. Fonctionnement d'une pile à combustible**

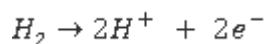
Le courant électrique dans un conducteur est constitué d'électrons libres qui voyagent d'un atome vers un autre. Il s'agit de la somme d'électrons qui se déplacent du pôle - vers le pôle +. Donc le générateur électrique d'une pile à combustible est un appareil capable de fournir :

Une grande quantité d'électrons libres à la borne -.

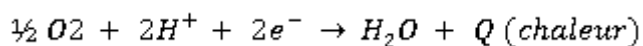
Une grande quantité d'ions positifs à la borne +.

Dans une pile à combustible, il se passe une combustion électrochimique contrôlée d'oxygène et d'hydrogène, avec production simultanée d'eau, d'électricité et de chaleur (Figure I.4), [4].

On a donc à l'anode, la formule suivante :



Et à la cathode, l'équation suivante :



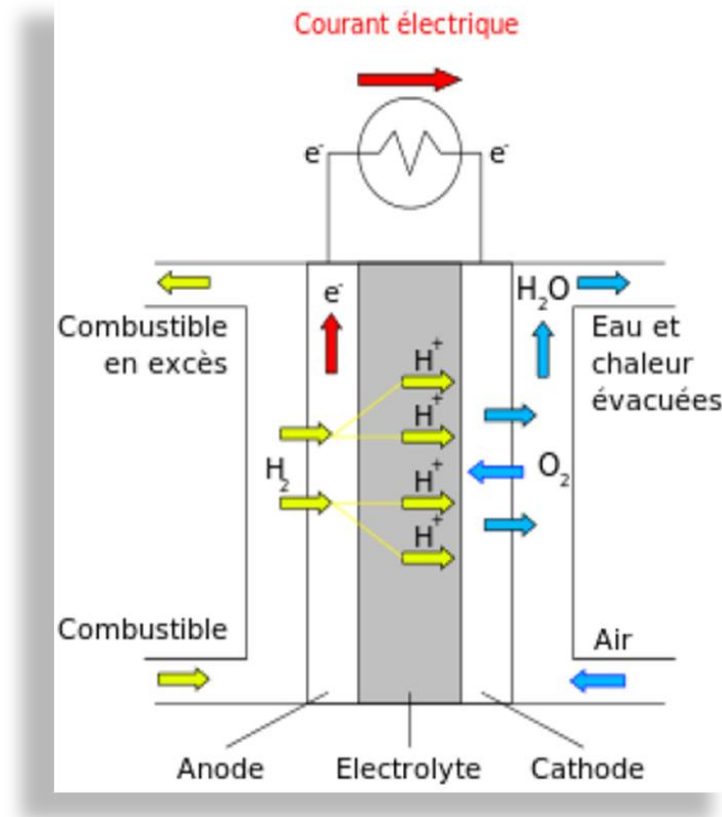


Figure I.4 : conception d'une pile à combustible [5]

D'après les figures I.5 et I.6, il y a différents composants chimiques et mécaniques dans une pile à combustible, parmi eux nous avons :

1. **La cellule élémentaire** : il s'agit principalement de l'assemblage de 3 éléments, dont deux électrodes (anode et cathode) et un électrolyte.

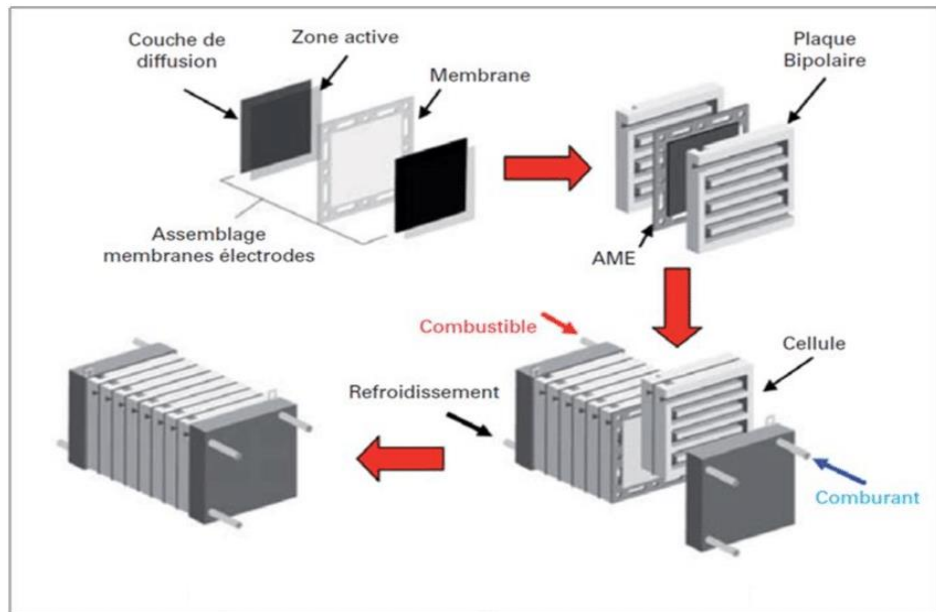
Ces cellules sont souvent multipliées et forment donc des « Stacks ».

- **L'électrolyte ou membrane** : est l'élément qui permet la circulation des ions d'une électrode à l'autre ainsi que la séparation entre les deux compartiments cathodique et anodique. De plus, le type d'électrolyte détermine le type et la température de fonctionnement de la pile. D'un point de vue chimique, c'est un composé qui, placé dans une solution aqueuse, est conducteur ionique et permet le passage du courant électrique par déplacement d'électrons.
- **L'anode** : il s'agit de l'électrode où se produit une réaction d'oxydation, donc production d'électrons et correspond au pôle (-).

- **La cathode** : il s'agit ici de l'électrode où se produit une réaction de réduction, donc consommation d'électrons et elle correspond au pôle (+).
- **Le stack** : il représente un assemblage de couches élémentaires d'une pile telles que les électrodes, l'électrolyte, etc... De plus, elle permet d'avoir une puissance en sortie de la pile plus importante. Car le courant dépend de la section ( $A/cm^2$ ) de la membrane ou de l'électrolyse donc plus la pile possède de « stacks » plus on gagne en intensité et en tension pour par la suite avoir une puissance plus élevée. D'où la formule :  $P = U.I$

Dans les cellules élémentaires, les éléments de liaisons sont appelés « **plaques bipolaires** ». Elles servent de jonction entre les pôles - et + ainsi que le bon acheminement du combustible et du comburant lors de leur cycle de production d'électricité et servent à l'assemblage des « **stacks** » en fonction mécanique.

Du côté fonction thermiques, elles effectuent le refroidissement ou le chauffage du cœur de la pile.



**Figure I.5** : vue éclatée et assemblée d'une pile à combustible [6]

La figure I.6 permet de comprendre le fonctionnement d'une pile à combustible. Tout d'abord du côté de l'alimentation du combustible, nous avons le stockage du combustible qui permet d'assurer une continuité de fonctionnement du système. Ensuite, il y a le détendeur qui permet le changement d'état au niveau de la pression du combustible, c'est-à-dire que le gaz à haute

pression qui passe dans le détendeur sort à basse pression. Puis, on passe par la vanne de sectionnement qui sert à séparer l'installation de la source afin d'arriver au niveau de la pompe de recirculation des restes d'hydrogène qui assure la restitution des restes de combustible par le pompage de ces derniers. Cela permet d'augmenter le temps de fonctionnement avec la même source de combustible. Elle peut être facultative mais elle joue un rôle important en matière d'économie du système. On arrive du côté de la production électrique où le combustible passe dans un générateur qui sert de convertisseur d'énergie, où, dans notre cas il permet de créer de l'énergie électrique par rapport à l'énergie chimique reçue. Ensuite, cette énergie électrique passe par un convertisseur de type onduleur permettant de transformer les tensions et les courants continus en une source d'énergie électrique alternative (DC/AC). Ainsi, fournissant de l'électricité à un récepteur, c'est-à-dire à un appareil qui convertit l'énergie électrique emmagasinée sous une autre forme d'énergie, par exemple une lampe ou une radio.

Enfin, on termine du côté de l'alimentation comburant où on passe par un humidificateur ou plutôt un évaporateur, il s'agit d'un appareil effectuant un changement d'état liquide vers gazeux, dans notre cas il s'agit de l'eau liquide qui devient gazeux. De plus, de l'air frais passe par un compresseur qui permet d'augmenter la pression d'un fluide et de faire circuler le fluide, [7].

### Composition d'un système à pile à combustible

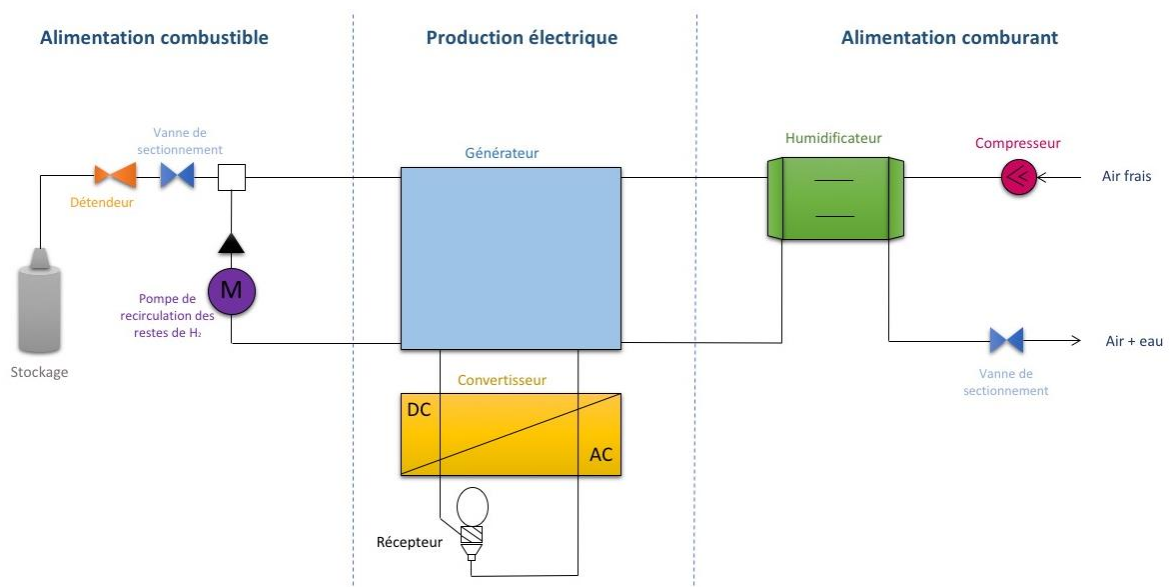


Figure I.6 : Schéma technique d'une pile à combustible [8]

### I.5. Différentes technologies de piles à combustible :

Il existe deux technologies des piles à combustible ; celle à hautes températures et celles à basses températures (Tableau I.1). Plus de détails peuvent être trouvés dans les références [9].

Piles à hautes températures	Piles à basses températures
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pile à combustible à carbonate fondu (MCFC)</li> <li>• Pile à combustible à oxyde solide (SOFC)</li> <li>• Pile à combustible à céramique protonant (PCFC)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pile à combustible alcaline (AFC)</li> <li>• Pile à combustible à méthanol direct (DMFC)</li> <li>• Pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC)</li> <li>• Pile à combustible à acide phosphorique (PAFC)</li> <li>• Pile à combustible à hydrure de bore direct (DBFC)</li> <li>• Pile à combustible à éthanol direct (DEFC)</li> <li>• Pile à combustible à acide formique (FAFC)</li> </ul>

**Tableau I.1** : Différentes technologies de piles à combustible [9]

#### I.5. 1. Étude comparative

Dans ce paragraphe, nous allons dresser un tableau comparatif des piles à combustibles.

Descriptio n	Électrolyte	Ions mis en œuvr e	Anode	Cathode	Puissance	Température de fonctionneme nt	Rendement électrique	Domaine
<b>AFC</b>	Hydroxyde de potassium	OH <sup>-</sup>	Dihydrogène	Dioxygène	10 à 100 kW	60 à 90 °C	<i>Stack</i> : 60 –70 % <i>Système</i> : 62 %	Portable et transport
<b>DBFC</b>	Membrane polymère ou anionique	Na <sup>+</sup> ou OH <sup>-</sup>	NaBH <sub>4</sub> liquide	Dioxygène	250 mW/c m <sup>2</sup>	20 à 80 °C	50% monocellulai re	Portable < 20 W
<b>PEMFC</b>	Membrane polymère	H <sup>+</sup>	Dihydrogène	Dioxygène	0,1 à 500 kW	60 à 100 °C	<i>Stack</i> : 50–70 % <i>Système</i> : 30 – 50 %	Portable, transport et stationnair e
<b>DMFC</b>	Membrane	H <sup>+</sup>	Méthanol	Dioxygène	1 mW à	90 à 120 °C	<i>Stack</i> :	Transport



	polymère			ne	100 kW		20 – 30 %	et stationnaire
<b>DEFC</b>						90 à 120 °C		
<b>FAFC</b>						90 à 120 °C		
<b>PAFC</b>	Acide phosphorique	H <sup>+</sup>	Dihydrogène	Dioxygène	Jusqu'à 10 MW	Environ 200 °C	<i>Stack</i> : 55 % <i>Système</i> : 40 %	Transport et stationnaire
<b>MCFC</b>	Carbonate de métaux alcalins	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Dihydrogène, méthane, gaz de synthèse	Dioxygène	Jusqu'à 100 MW	Environ 650 °C	<i>Stack</i> : 55 % <i>Système</i> : 47 %	Stationnaire
<b>PCFC</b>						700 °C		
<b>SOFC</b>	Céramique	O <sup>2-</sup>	Dihydrogène, méthane, gaz de synthèse	Dioxygène	Jusqu'à 100 MW	800 à 1050 °C	<i>Stack</i> : 60 – 65 % <i>Système</i> : 55 – 60 %	Stationnaire

**Tableau I.2.** Comparaison entre piles à haute température et piles à basse température [10]

## I.6. Applications des piles à combustible

Les PACs sont utilisés dans plusieurs domaines on mentionne :

### 1.6.1. Transport

#### a. Transport Ferroviaire :

Les piles à combustible sont aujourd'hui utilisées dans un train du nom de Coradia iLint qui a été créé par le groupe Alstom et est entré en service en Allemagne en 2018. Il a été conçu à Salzgitter en Allemagne et à Tarbes en France.



*Figure I.8 : Train Coradia iLint [11]*

**b. Automobile :**

Les prototypes les plus connus sont de la marque Mercedes, Audi, Peugeot, Ford, GM, Nissan, BMW et d'autres marques. De plus, les voitures hybrides électriques à hydrogène commercialisées depuis 2016 sont Toyota, Hyundai et Honda.



*Figure I.9 : Toyota Mirai [12]      Figure I : Mercedes-Benz GLC F-CELL[13]*

**c. Aéronautique :**

Dans le domaine aéronautique, le premier exemple d'application est le Dimona qui a été transformé par Boeing. Il s'agit d'un modèle réduit alimenté par une pile à hydrogène de type PEMFC de la firme britannique Intelligent Energy. L'avion a volé environ 20 minutes en palier à 100 km/h et a grimpé jusqu'à une altitude de 1 000 mètres (Figure I.11).



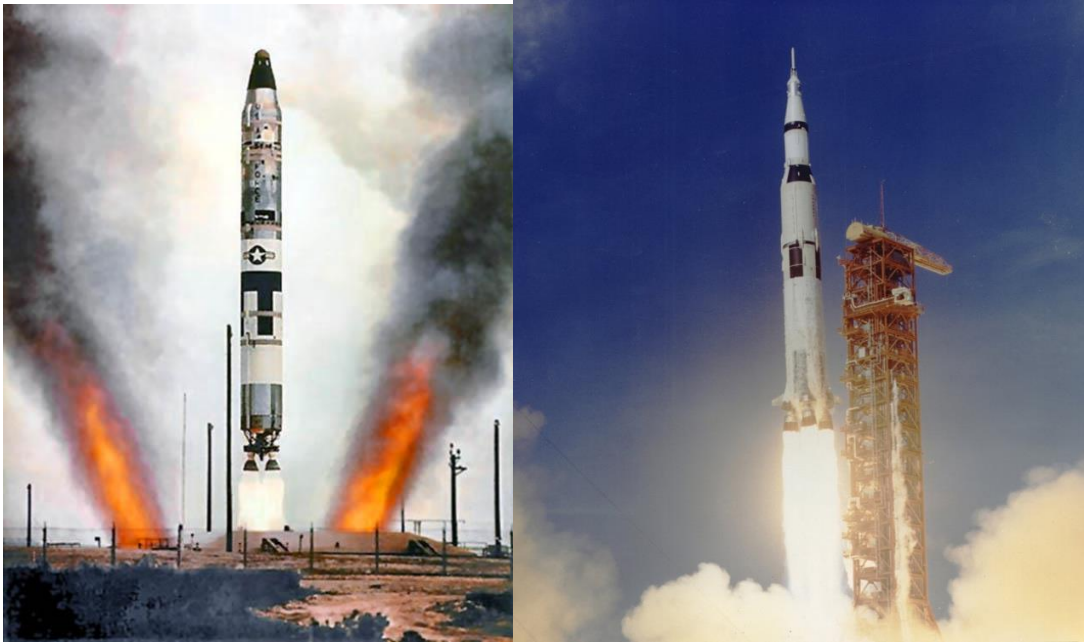
*Figure I.11: Le Dimona transformé par Boeing [14]*

Par la suite, un avion à hydrogène entièrement électrique dont l'énergie est produite par une pile à combustible du nom de HY4 de DLR Institute of Engineering Thermodynamiques qui a décollé le 29 septembre 2016 de l'aéroport de Stuttgart. Cet engin à un moteur électrique de 80 kW. Au décollage, une batterie de lithium-ion fournit de l'électricité à l'avion mais en vol, il s'agit de la pile à combustible qui en fournit à l'aide de l'oxygène de l'air.

#### **d. Spatial :**

D'après une présentation sur la pile à combustible pour les 50 ans de la mission Apollo 11, présentée par David BOUQUIN, le jeudi 9 mai 2019 La NASA a utilisé 2 types de piles à combustible pour deux programmes avec l'aide d'ingénieurs de General Electric.

Pour les missions Gemini, ils ont créé une pile AFC en hybridation avec des batteries, il y avait 6 stacks pour 707 h d'autonomie reliés à plusieurs batteries (Figure I.12). Cependant, ils ont trouvé une pile plus adaptée pour les missions Apollo, afin d'avoir moins de soucis quant aux niveaux d'eau dans les piles et aussi avec une durée de vie plus longue que l'AFC. Ils ont donc utilisé des piles PEMFC durant ces missions Apollo (Figure I.13).



*Figure I.12 : Décollage Titan2(Gemini) [15] Figure I.13 : Décollage Saturn V (Apollo) [16]*

**e. Naval :**

Dans le domaine naval, nous avons deux types d'applications, les bateaux et les sous-marins. Nous avons par exemple les sous marins allemands Type 212, et Type 214 développés par Howaldtswerke-Deutsche Werft AG (HDW), utilisant comme la pile à combustible de type PEMFC (Figures I.14 et I.15). [18]



*Figure I.14 : Sous-marin allemand - Type 212 [17]*



Figure I.15 : Sous-marin allemand - Type 214 [19]

### I.6.2. Stationnaires

Dans le domaine stationnaire, on peut parler de domaine de cogénération, où nous utilisons des piles à combustible comme source d'énergies délocalisées.

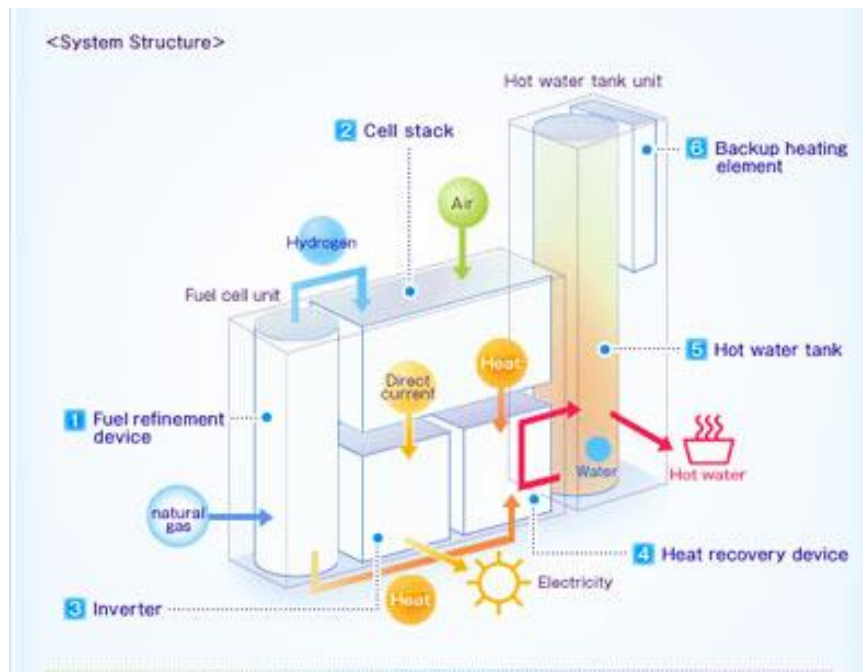


Figure I.16 : Principe de fonctionnement d'une PAC en cogénération [21]

Les deux principaux domaines d'application sont la production collective, d'une puissance de 200 kW à quelques MW, et la production individuelle, d'une puissance de 2 à 7kW. Son rendement varie en fonction de sa taille. En plus de pouvoir fournir de l'électricité, la pile à combustible peut nous fournir de l'eau chaude, ce qui peut être utilisée pour le chauffage domestique par exemple. De plus, le rendement total de la pile utilisée à des fins de cogénération peut s'élever à 80%.[20]

### **I.6.3. Nomades**

Les piles à combustibles sont de plus en plus utilisées comme alternative aux générateurs et recharge des batteries servant comme alimentation de secours, assurant une grande autonomie et restant fiable aux démarrages. Les PEMFC sont le plus souvent utilisés comme alimentation. De même pour les téléphones mobiles et ordinateurs portables, qui connaissent tous deux, une très forte croissance mais sont limitées par l'autonomie de leur batterie. [22]

### **I.7. Conclusion**

Ce chapitre est consacré à quelques généralités sur les piles à combustible. Nous avons commencé par donner la définition d'une pile à combustible. En deuxième lieu nous donnés une historique assez détaillée de son évolution. En troisième lieu nous avons expliqué le principe général de fonctionnement puis nous avons cité les différents types existants actuellement avec une comparaison de leurs caractéristiques et performances. Finalement, nous avons détaillé les domaines d'application de chaque type de la pile à combustible.

# **Chapitre II :**

## **Modélisation de la pile à combustible de type PEMFC**

## II.1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à la modélisation de pile à combustible de type PEMFC qui est la plus utilisée actuellement. Le but de toute modélisation de processus est de construire un modèle ou une représentation mathématique qui illustre le fonctionnement.

L'objectif poursuivi est la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu. Il existe différentes classifications de modèles en fonction de leur mode de conception ou de leur mode d'utilisation, généralement il existe plusieurs modèles mathématiques pour les piles à combustibles les plus communs sont donnés ci-après.

## II.2. Quelques modèles de la pile à combustible PEMFC :

A priori, il n'existe pas de bons ou de mauvais modèles. Le modèle choisi doit être adapté à la fonction que nous voulons lui faire remplir et doit permettre de tester différentes utilisations ou choix des paramètres [25].

Dans la littérature, il existe plusieurs modèles, on distingue les **modèles à électrodes non dissociées** et les **modèles à électrodes dissociées**.

### II.2.1. Modèles à électrodes non dissociées

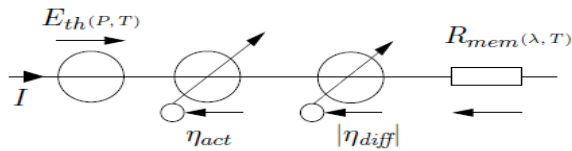
La tension d'une cellule PEM peut être donnée en statique par l'expression :

$$V_{cellule} = E_{th} - \eta_{act} - R_{mem}I - \eta_{conc} \quad (II.1)$$

Avec :

- $E_{th}$ : Potentiel théorique fonction de la température et de la pression,
- $\eta_{act}$ : Pertes par activation,
- $\eta_{conc}$ : Pertes par diffusion,
- $R_{mem}I$ : Pertes ohmiques principalement dues à la membrane.

La Figure II-1 présente un modèle circuit à électrodes non dissociées d'une cellule PEM en statique.

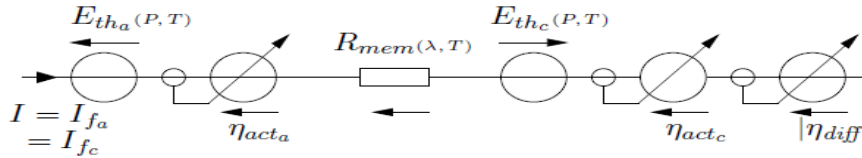


**Figure II-1:** Modèle statique en circuit à électrodes non dissociées d'une cellule PEM



### II.2.2. Modèles à électrodes dissociées :

La Fig. II-2 présente un modèle en circuit à électrodes dissociées d'une cellule PEM en statique.



**Figure II-2 :** Modèle statique en circuit à électrodes dissociées d'une cellule PEM

En dissociant les électrodes, la tension cellule peut s'exprimer par :

$$V_{cellule} = E_{th_c} - E_{th_a} - \eta_{act_c} - \eta_{act_a} - R_{mem}I - \eta_{conc} \quad (II.2)$$

Avec :

- $E_{th_c}$  et  $E_{th_a}$ : potentiels théoriques respectivement à la cathode et à l'anode, fonction de la température et de la pression,
- $\eta_{act_c}$  et  $\eta_{act_a}$ : pertes par activation,
- $\eta_{conc}$ : Pertes par diffusion,
- $R_{mem}I$ : Pertes ohmiques principalement dues à la membrane.

Les pertes par diffusion et les pertes ohmiques dépendent des mêmes expressions que dans le modèle à électrodes non dissociées.

Dans la suite de ce chapitre, les modèles en circuit à électrodes non dissociées seront pris en compte. A savoir, le modèle Amphlett, le modèle de Larminie-Dicks et le modèle de Chamberlin-Kim.

### II.3. Modèle d'Amphlett et al.

Le modèle de stack de PAC présenté par J. C. Amphlett et al. est un modèle électrochimique semi-empirique simple et complet qui peut être utilisé pour décrire le comportement dynamique d'un stack de PAC. Il permet de prendre en compte les effets de différents paramètres dont les définitions sont essentielles pour décrire un comportement proche de la réalité. Ce modèle est largement cité dans la littérature, il est basé sur les équations de Nernst et de Tafel. Les paramètres physiques du système pris en compte sont :

- Les pressions effectives de l'oxygène et de l'hydrogène,
- La température au bord,
- La concentration de l'oxygène,
- La concentration de l'hydrogène.

Dans ce qui suit, nous reprenons l'équation (II.1), nous allons définir le potentiel thermodynamique ainsi que toutes les chutes de tension dues aux pertes pour ce modèle, à savoir les pertes par activation, les pertes ohmiques et les pertes par diffusion.

### II.3.1. Potentiel thermodynamique

Le potentiel thermodynamique est défini en fonction de la température  $T$  exprimée en Kelvin, et des pressions partielles  $P_{H_2}$  et  $P_{O_2}$  par l'équation empirique de Nernst comme suit [30] :

$$E_{th} = 1.229 - 0.85 * 10^{-3}(T - 298.15) + 4.3085[\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2}(P_{O_2})] \quad (II.3)$$

**Remarque :** En pratique, la tension réelle aux bornes d'une cellule est inférieure à la tension en circuit ouvert à cause des différents types de pertes.

### II.3.2. Pertes d'activation

Les phénomènes d'activation engendrent des pertes. Dans la littérature, la modélisation des phénomènes d'activation par circuits électriques se fait généralement en utilisant la loi de Tafel, dans laquelle ces pertes sont modélisées soit par une résistance non linéaire [23], soit par une diode [24].

L'expression simple proposée par J.C. Amphlett et al pour toute la surtension d'activation est exprimée dans l'équation (II.4).

$$\eta_{act} = \xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T \ln(C_{O_2}^*) + \xi_4 T \ln(I) \quad (II.4)$$

Où  $I$  est le courant de fonctionnement de la pile en Ampère (A),  $\xi_1$ ,  $\xi_2$ ,  $\xi_3$  et  $\xi_4$  sont des coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de PAC. Dans notre travail, nous utilisons les paramètres identifiés dans le modèle développé dans [28] à savoir :

$$\xi_1 = -0.948$$

$$\xi_2 = K_{cell} + 0.197 * 10^{-3} \ln(A_{fc}) + 4.3 * 10^{-5} \ln(C_{H_2}) \quad (II.5)$$

$$\xi_3 = 6.3 * 10^{-5}$$

$$\xi_4 = 0.72 * 10^{-4}$$

Avec :

$A_{fc}$  : Surface active de la pile à combustible (cm<sup>2</sup>)

$K_{cell}$  : ??????

$C_{H_2}$  : Représente les concentrations d'hydrogène (mol/cm<sup>3</sup>)

$C_{O_2}^*$  : Représente les concentrations de l'oxygène (mol/cm<sup>3</sup>) dissout dans un film d'eau à l'interface de la membrane gaz/liquide sur la surface catalytique de la cathode, elle est exprimée en fonction de sa pression par la loi de Henry [29] :

$$C_{O_2}^* = \frac{P_{O_2}^*}{5.08 * 10^6 e^{-(498/T)}} \quad (II.6)$$

$$P_{O_2}^* = P_{cath} \times [1 - X_{H_2O}^{sat}] \quad (II.7)$$

$P_{cath}$  : Pression de l'oxygène à la cathode,

$X_{H_2O}^{sat}$  : Fraction molaire de saturation de l'eau dans le gaz humidifié et supposée  $\approx 50\%$ , on obtient alors :

$$P_{O_2}^* = \frac{1}{2} P_{cath} \quad (II.8)$$

A l'anode, on utilise de l'hydrogène pur, qui ne contient pas du monoxyde de carbone.

$$P_{H_2}^* = P_{anode} \times [1 - X_{H_2O}^{sat}] \quad (II.9)$$

$P_{anode}$  : La pression de l'hydrogène à l'anode, et ( $X_{H_2O}^{sat} = 0.5$ ), L'équation (II.9) devient :

$$P_{H_2}^* = \frac{3}{4} P_{anode} \quad (II.10)$$

### II.3.3. Phénomènes ohmiques

La pile présente des pertes ohmiques, aussi bien dans l'électrolyte que dans les électrodes. Ces phénomènes sont généralement modélisés dans les approches par circuits électriques par des

résistances constantes et linéaires [23], [24]. Ils sont liés essentiellement à deux types de conduction : la conduction électronique et la conduction ionique (protonique).

### II.3.3.1. Conduction électronique

Il s'agit de la conduction dans les électrodes, les plaques bipolaires et les connexions. Peu d'informations quantitatives au sujet de ces pertes sont disponibles dans la littérature. Nous négligerons ces pertes dans notre modèle.

### II.3.3.2. Conduction protonique

La conduction protonique constitue l'essentiel des pertes ohmiques. Cependant, les pertes apparaissant au niveau de l'électrolyte sont les plus importantes et peuvent être réduites en diminuant l'épaisseur de l'électrolyte et en améliorant sa conductivité ionique [26]. L'électrolyte et les électrodes obéissant à la loi d'Ohm, il s'agit, dans la membrane électrolyte polymère, d'une conduction ionique. Or, les ions ayant une mobilité bien plus faible que les électrons, la résistance de la membrane est bien plus grande [27].

On peut exprimer les pertes ohmiques par l'équation (II.11) suivante :

$$V_{ohm} = I \times (R_m + R_c) \quad (II.11)$$

Où  $R_c$  désigne la résistance équivalente de contact à la conduction des électrons et  $R_m$  désigne la résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons, elle est calculée à partir de la relation suivante :

$$R_m = \frac{r_m \times l}{A_{fc}} \quad (II.12)$$

Où :

$l$  : Épaisseur de la membrane ( $\mu m$ ),

$A_{fc}$  : Surface active de la pile ( $cm^2$ ),

$r_m$  : Résistance spécifique de la membrane (ohm.cm) , obtenue par la relation suivante :

$$r_m = \frac{181.6 \left[ 1 + 0.03 \left( \frac{I}{A_{fc}} \right) + 0.062 \left( \frac{T}{303} \right)^2 \left( \frac{T}{A_{fc}} \right)^{2.5} \right]}{\left[ \lambda_{HO_2/SO_3^-} - 0.634 - 3 \times \frac{T}{A_{fc}} \right] \times \exp \left[ 4.18 \left( \frac{T-303}{T} \right) \right]} \quad (II.13)$$

Avec :

- $T$  en Kelvin, désigne la température de la pile,
- Le terme  $\left[ \frac{181.6}{\lambda_{H_2O_2/SO_3^-}} - 0.634 \right]$  Représente la résistance spécifique de la membrane (ohm.cm) à  $I = 0$  et à une température de  $30^\circ\text{C}$  ( $T = 303^\circ\text{K}$ ). Le terme exponentiel au dénominateur est le facteur de correction de la température si cette dernière n'est pas à  $30^\circ\text{C}$ ,
- $\lambda_{H_2O_2/SO_3^-}$  : Est le taux d'hydratation (teneur en eau dans la membrane), admettant une valeur minimale et maximale respectivement de 0 et de 22, une valeur de 7 correspond à une membrane assez sèche, 14 à une membrane bien hydratée, et 22 à une membrane noyée [32].

### II.3.4. Pertes de concentration

Lorsque, à une électrode il y a une perte de potentiel dû à l'incapacité du système à maintenir la concentration initiale des réactants, on a alors la formation d'un gradient de concentration. Ces pertes sont données par la relation suivante :

$$V_{con} = -B \left( 1 - \frac{I}{I_{max}} \right) \quad (\text{II.4})$$

Avec :

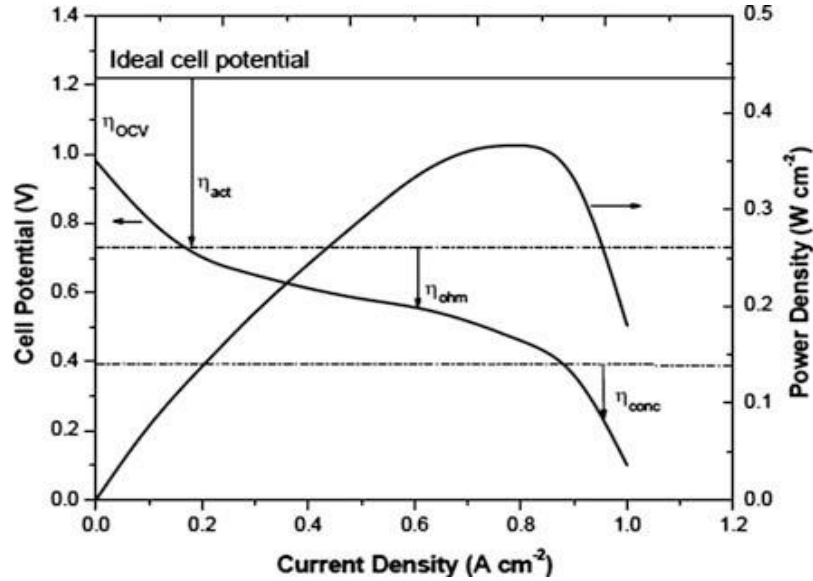
$B$  : est une constante empirique qui dépend du type de pile et de son état de fonctionnement.

$I$  : est la densité de courant du fonctionnement permanente ( $\text{A/cm}^2$ ),

$I_{max}$  : la densité de courant maximale.

### II.3.5. Courbe de polarisation

Afin de comprendre le phénomène intérieur de pile à combustible, différentes méthodes sont utilisées pour développer un modèle de simulation adéquat. La première et la plus simple approche consiste à étudier la caractéristiques tension-courant en régime permanent avec la courbe de polarisation montrée en Figure II-3. Expérimentalement, une charge DC de courant est variée et la tension de la pile est mesurée sous conditions constante, i.e. température, humidité, pression et la stichométrie des gaz.



**Figure II-3:** Caractéristiques ( $V-I$ ) et ( $P-I$ ) d'une cellule élémentaire PEMFC [23]

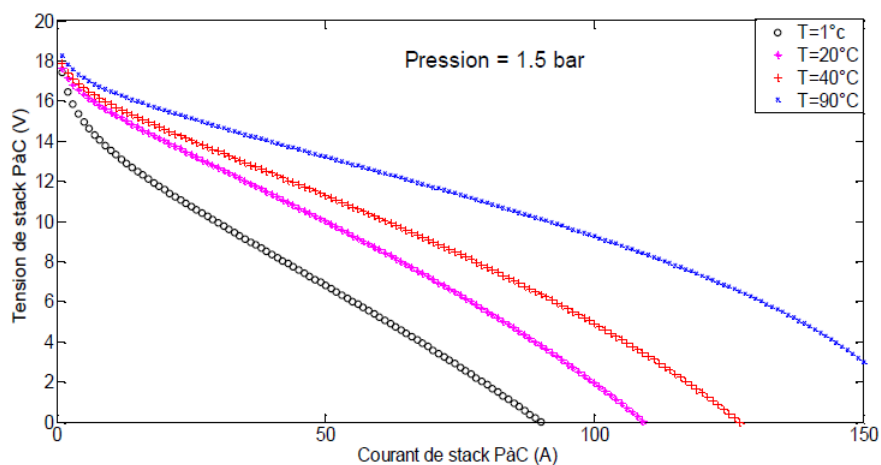
### II.3.6. Influence de la température et de la pression sur les caractéristiques ( $V-I$ ) et ( $P-I$ )

L'augmentation de la température influe positivement sur la tension de la pile, autrement dit si l'on augmente la température aux environs de  $90^{\circ}\text{C}$ , la tension augmente jusqu'à une valeur de 1 volt par cellule environs (Fig. II-4), ce qui entraîne l'augmentation de la puissance fournie par la pile (Fig. II-5).

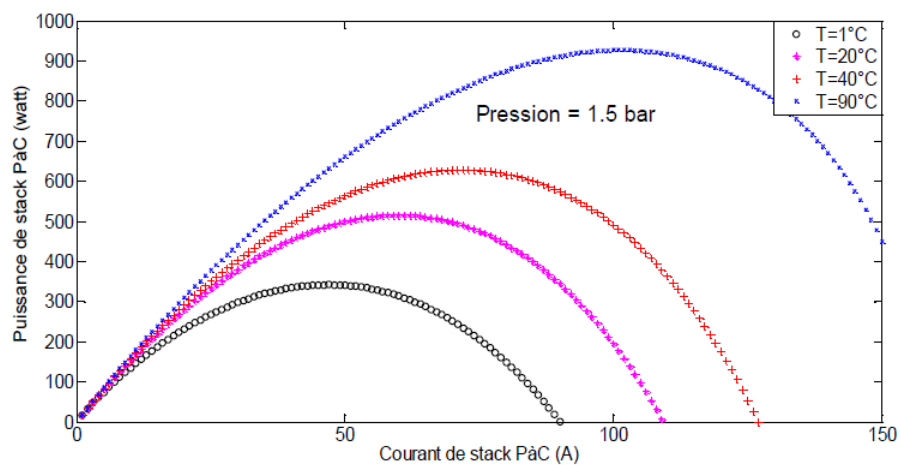
Pour voir l'effet de la pression sur la PEMFC, on fixe la température à  $55^{\circ}\text{C}$  et on varie les pressions d'oxygène et d'hydrogène. L'augmentation des pressions provoque l'augmentation de la tension (Fig. II-6) et la puissance (Fig. II-7) aux bornes de la pile.

#### Notes :

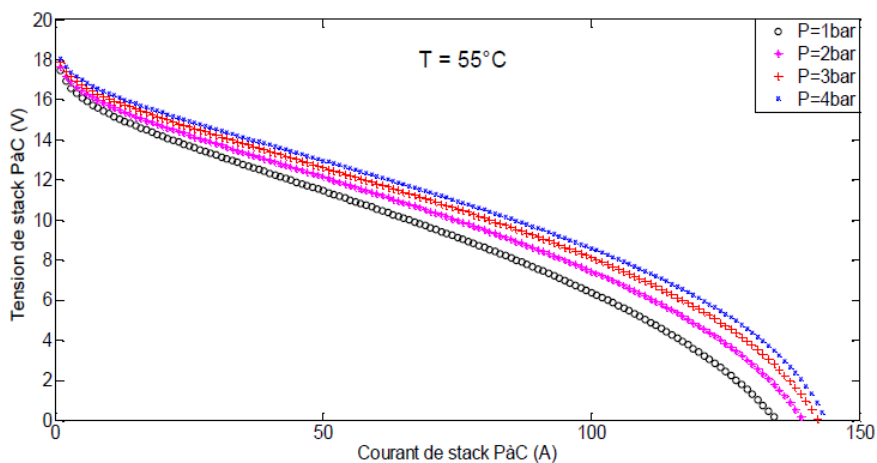
1. Les résultats donnés en figures II.4 à II.7 correspondent à 12 cellules mises en série.
2. Le modèle d'Amphlett donne une grande précision dans la conception des PEMFC quelle que soit la valeur du courant. Il présente la caractéristique en deux zones principales : la première est la perte d'activation à partir de la tension en circuit ouvert, et la seconde est la perte ohmique (Fig. II.3). Parmi les aspects négatifs de ce modèle, il impose la prise en compte de nombreuses données physiques et géométriques provenant de la PAC [25].
3. La pression de l'oxygène et d'hydrogène en même temps.



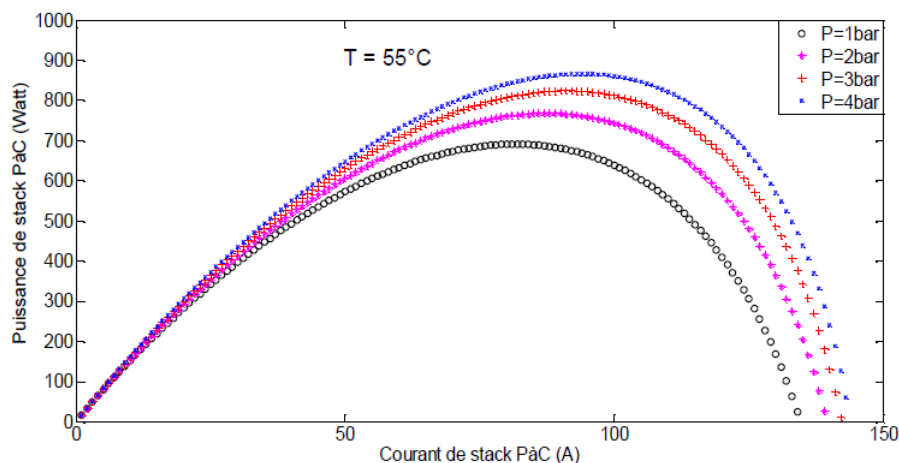
**Figure II-4 :** Effet de la température sur la tension [25]



**Fig. II-5 :** Effet de la température sur la puissance [25]



**Fig. II-6 :** Effet de la pression sur la tension [25]



**Fig. II-7 :** Effet de la pression sur la puissance [25]

#### II.4. Modèle statique de Larminie-Dicks

Certains auteurs utilisent des équations empiriques pour décrire la caractéristique courant tension de la pile en régime permanent. Ce type de modèle ne permet de représenter que l'allure de la tension en fonction du courant débité en régime stationnaire, mais il tient compte du courant limite pour lequel la tension PAC s'effondre. Les paramètres, dans ce cas, sont déterminés en fonction des résultats expérimentaux. Larminie et Dicks utilisent des équations empiriques pour décrire la caractéristique tension-courant de PAC [23]. Dans ce cas, les paramètres sont déterminés par identification des résultats expérimentaux. L'expression de la tension est la suivante :

$$V = E_0 - A \times \log\left(\frac{I+i_n}{i_0}\right) - R_m(I + i_n) - B \times \log\left(1 - \frac{1+i_n}{i_{lim}}\right) \quad (\text{II.15})$$

$E_0$ : Tension réversible sans pertes de la pile à combustible,

$I$ : Courant délivré par la pile,

$i_0$ : Courant de l'échange à laquelle la surtension commence à se déplacer à partir de zéro,

$A$ : Pente de la droite de Tafel,

$i_{lim}$ : Courant limite,

$B$  : Constante de transfert de masse,

$i_n$ : Courant interne,

$R_m$ : Résistance de la membrane et de contact.



Théoriquement,  $A$  et  $B$  sont données par :

$$A = \frac{R.T}{2.\alpha.F} \quad (\text{II.16})$$

$$B = \frac{R.T}{2.F} \quad (\text{II.17})$$

Avec,

$R$ : Constante universelle des gaz,

$T$  : Température (Kelvin),

$F$  : Nombre de Faraday,

$\alpha$ : Coefficient de transfert de charge. Sa valeur dépend de la réaction mise en jeu et du matériau d'électrode, mais il doit être dans la gamme de 0 à 1. Pour l'électrode à hydrogène, la valeur est d'environ 0,5. Pour l'électrode à oxygène, il est compris entre 0,1 et 0,5, plus de détails sur ce modèle sont dans la référence [23].

### II.5. Modèle de Chamberlin-Kim :

En négligeant  $i_n$  (très petite valeur) et la combinaison  $i_0$  de l'équation de Tafel avec le potentiel de Nernst, l'équation (II.15) se simplifie [1]. Le modèle de Chamberlin-Kim décrit la tension de cellule en fonction de la densité de courant, avec cinq paramètres comme indiqué dans l'équation (II.18). Ce modèle s'adapte parfaitement aux résultats expérimentaux [31].

$$V(J) = E_0 - b \times \ln(J) - R_s.J - m. \exp(n.J) \quad (\text{II.18})$$

Avec,

$V$ : La tension de cellule (V),

$J$  : La densité de courant ( $A.cm^{-2}$ ),

$E_0$ : La tension en circuit ouvert (V),

$b$  : Le paramètre de Tafel pour la réduction de l'oxygène (V),

$R_s$  : La résistance,

$\langle m, n \rangle$  : Les paramètres de la diffusion (V et  $A^{-1}$ ).

Chaque terme de l'équation (II.18) est dominant dans l'une des régions de la caractéristique ( $V-J$ ). Dans le modèle de Chamberlin-Kim, les valeurs des constantes dans l'équation (II.18), (cinq paramètres :  $E_0, b, R_s, m, n$ ) varient en fonction de nombreux facteurs, y compris la composition

des assemblées membrane-électrode, le combustible et le comburant utilisés, la température locale, la pression et l'humidité de la EME. Ils dépendent aussi de la pile elle-même, de sorte qu'il ne peut pas être transposé à une autre PAC sans nouvelle identification paramétrique.

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

Dans ce chapitre nous avons présenté trois modèles de la pile à combustible : le modèle d'Amphlett, le modèle de Larminie-Dicks et le modèle de Chamberlin-Kim. Le modèle d'Amphlett est plus compliqué car il tient compte de beaucoup de paramètres physiques et géométriques mais préférable car il est plus précis et permet de donner la main pour manipuler plusieurs de ces des paramètres.

# **Chapitre III :**

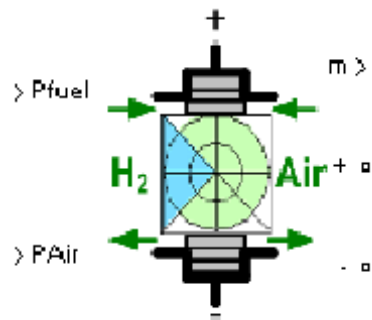
**Etude par simulation de la pile à  
combustible de type PEMFC**

## II.1. Introduction

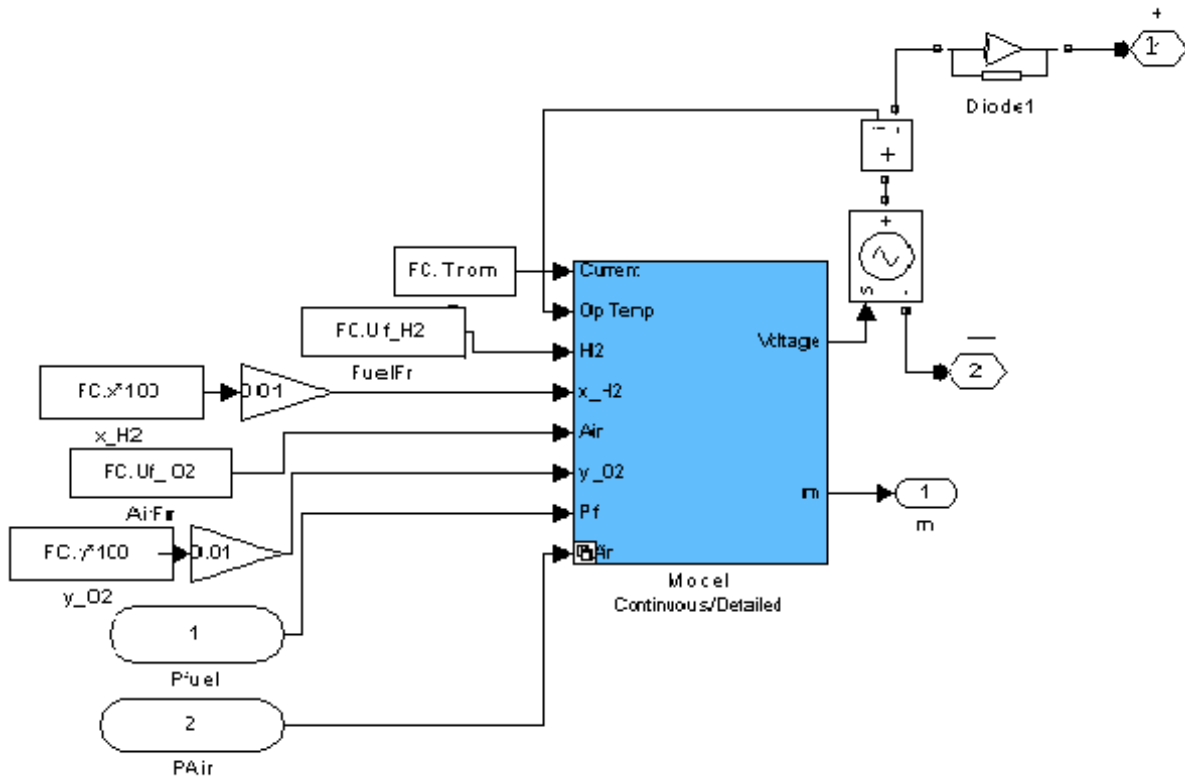
Dans ce chapitre, Nous allons effectuer quelques simulations de la pile à combustible de type PEMFC. Nous commençons par une présentation du modèle, ensuite nous analysons les effets respectifs de la pression de l'hydrogène, de la pression de l'oxygène et de la température sur le fonctionnement en régime établi. Enfin, nous allons effectuer quelques simulations en régime dynamique avec et sans le convertisseur DC-DC à la sortie de la PAC.

## III.2. Présentation du modèle Simulink de la pile PEMFC

Le modèle de Matlab/Simulink de la pile PEMFC est basé sur le modèle mathématique d'Amphlett [29]. Il permet d'obtenir un fonctionnement dynamique et il permet aussi l'accès aux paramètres de la PAC comme la pression de l'air et de l'hydrogène ainsi que la température. Il se présente sous le nom « Fuel cell stack », (Figure III.1). Le modèle Simulink choisi pour les simulations correspond à 42 cellules avec une puissance totale nominale de 1.26 kW.



a. Modèle général



b. Modèle développé

**Figure III.1.** Modèle Simulink de la pile de type PEMFC

### III.3. Fonctionnement nominal

Le modèle que nous utilisons est celui d'une pile PEMFC constituée de 42 cellules et dont la puissance nominale est de 1.26 kW, avec le point de fonctionnement nominal correspondant à ( $T_n = 55^\circ\text{C}$ ,  $V_n = 24.23 \text{ V}$ ,  $I_n = 52 \text{ A}$ ,  $P_{H2} = 1.5 \text{ Bar}$ ,  $P_{O2} = 1 \text{ Bar}$ ). Pour obtenir le point de fonctionnement nominal, nous avons utilisé une charge résistive pure  $R = 0.4650 \Omega$ , (Figure III.2). Les résultats obtenus pour le point nominal (tension et courant) sont donnés en figure III.3.

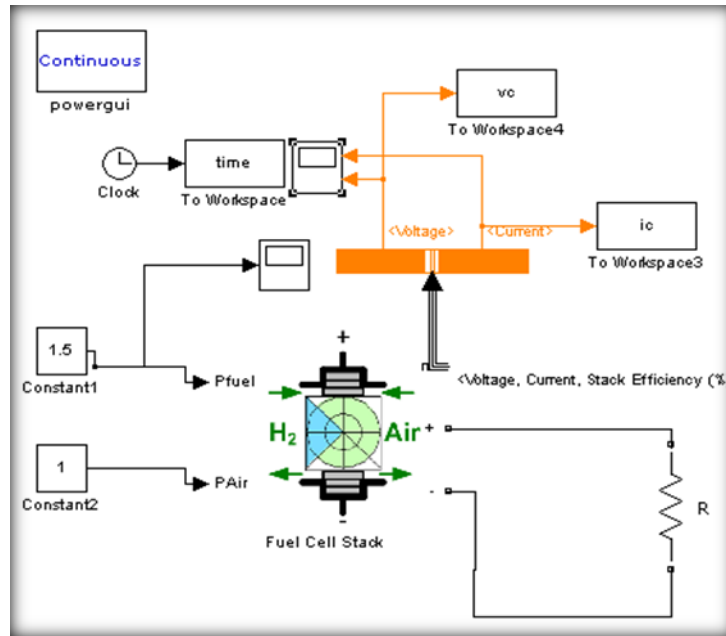


Figure III.2 : Schéma de le montage PAC-charge

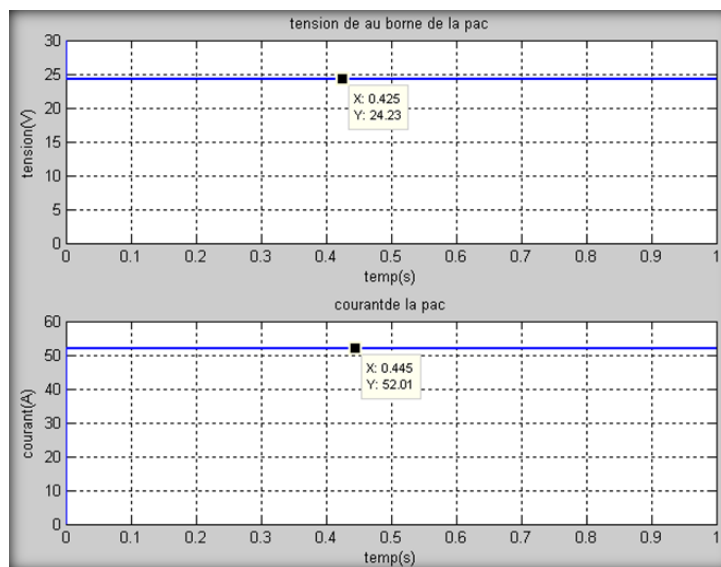


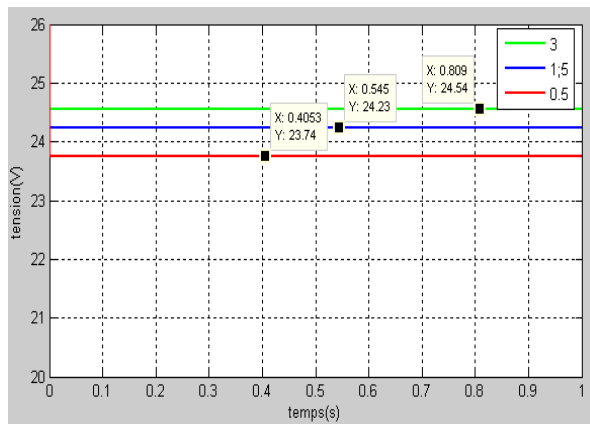
Figure III.3 : Fonctionnement à tension et courant nominaux.

#### II.4. Effet de la pression de l'hydrogène

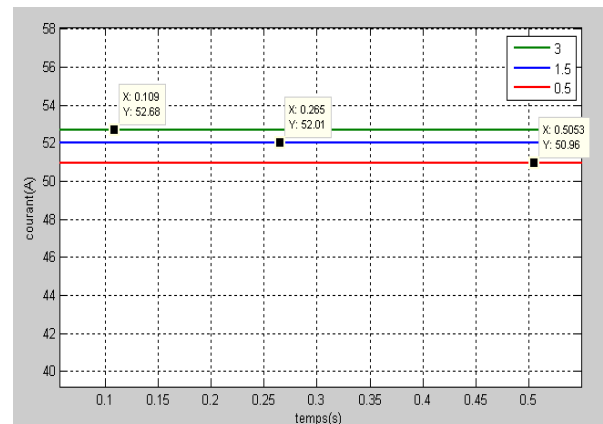
Pour observer l'effet de la pression du fuel (Hydrogène) en gardant la charge constante (nominale), nous avons comparé le régime statique pour différentes valeurs de la pression  $P_{H_2}$  ( $P_{H_2} = 0.5, 1.5$  puis 3 Bars). La tension et le courant obtenus sont donnés en figure III.4. Plus  $P_{H_2}$

augmente, plus la tension et le courant augmentent, ce qui entraîne une augmentation de la puissance. Ceci est tout à fait normal car il ya plus de consommation du fuel. Nous remarquons aussi que les augmentations du courant et de la tension ne sont pas linéaires avec l'augmentation de la pression car l'augmentation de la pression entre 0.5 et 1.5 Bars provoque des augmentations du courant et de la tension supérieures à celles obtenues lorsque la pression augmente entre 1.5 et 3 Bars (Figure III.4).

Nous montrons aussi les caractéristiques bien connues "Tension-courant V(I)" et "puissance-courant P(I)" en figure III.5 que nous avons obtenue par simulation en considérant plusieurs points de fonctionnement. Ce résultat est en accord avec ceux de la littérature.

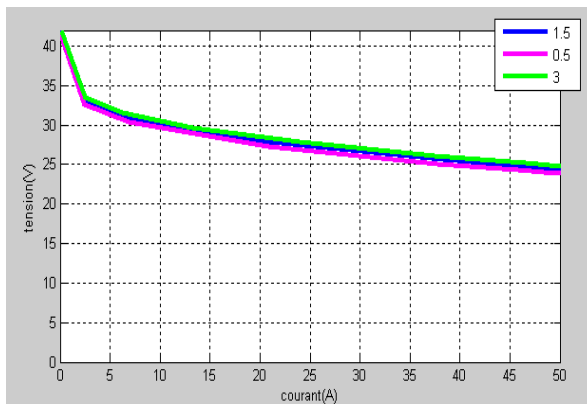


a. Effet sur la tension

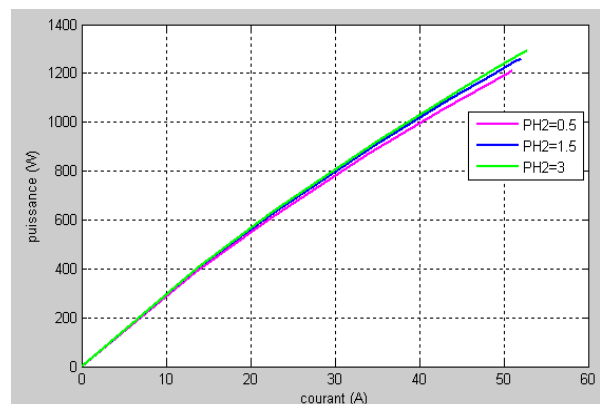


b. Effet sur le courant

**Figure III.4:** Effet de  $P_{H_2}$  sur la tension et sur le courant.



a. Effet sur V(I)

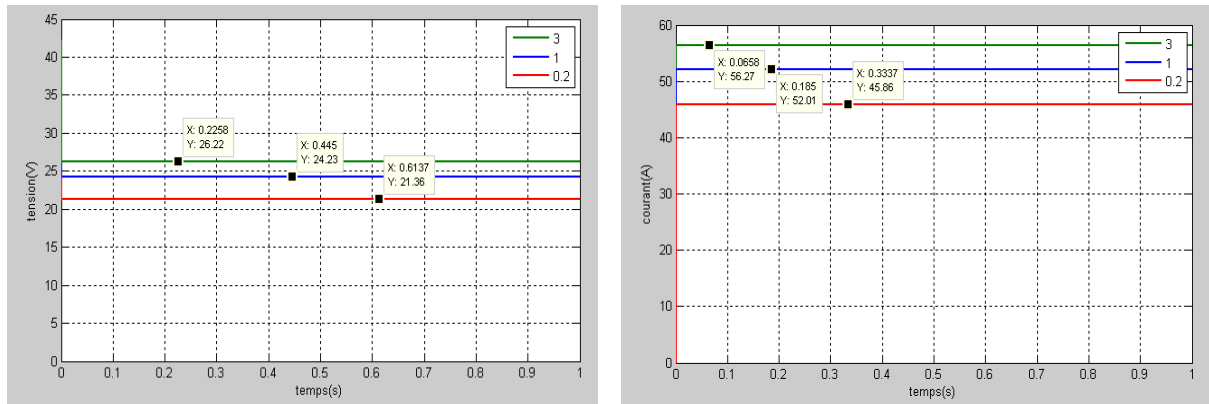


b. Effet sur P(I)

**Figure III.5:** Effet de  $P_{H_2}$  sur les caractéristiques V(I) et P(I).

### III.5. Effet de la pression de l'air (oxygène)

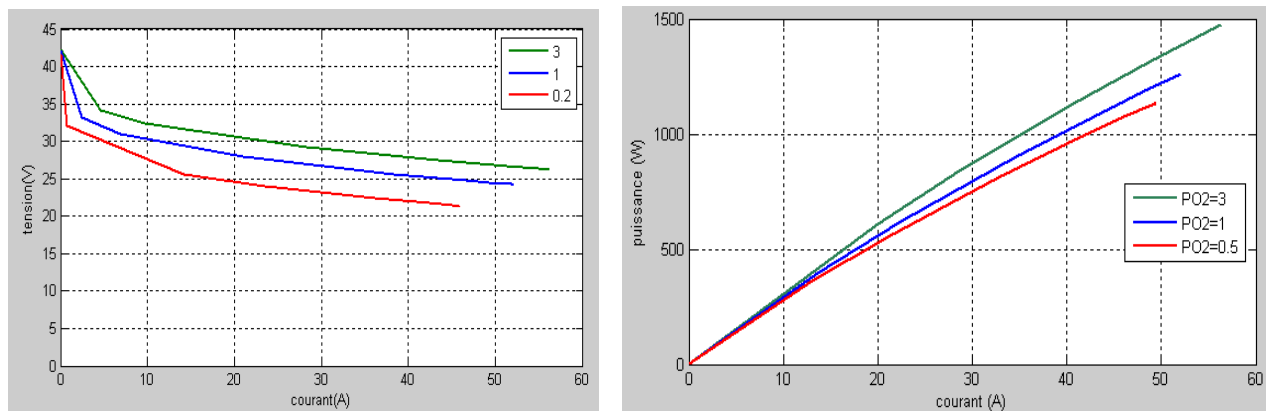
Pour analyser l'effet de la pression de l'air (oxygène), les mêmes résultats (courant et tension) sont donnés en figure II.6 pour différentes valeurs de la pression  $P_{O_2}$  ( $P_{O_2} = 0.2, 1$  puis  $3$  Bars). Plus  $P_{O_2}$  augmente, plus la tension et le courant augmentent, ce qui entraîne une augmentation de la puissance. Nous remarquons aussi que les augmentations du courant et de la tension ne sont pas linéaires avec l'augmentation de la pression car l'augmentation de  $P_{O_2}$  entre  $0.2$  et  $1$  Bars provoque des augmentations du courant et de la tension supérieures à celles obtenues lorsque la pression augmente entre  $1$  et  $3$  Bars (Figure III.6). Nous montrons aussi les caractéristiques bien connues "Tension-courant V(I)" et "Puissance- courant P(I)" en fonction de  $P_{O_2}$  en considérant plusieurs points de fonctionnement en figure III.7. Ces résultats sont en accord avec la littérature.



a. Effet sur la tension

b. Effet sur le courant

**Figure III.6.** Effet de  $P_{O_2}$  sur la tension et sur le courant



a. Effet sur V(I)

b. Effet sur P(I)

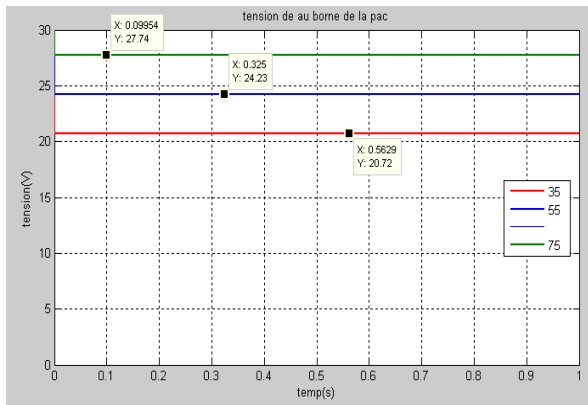
**Figure III.7:** Effet de  $P_{O_2}$  sur les caractéristiques V(I) et P(I).



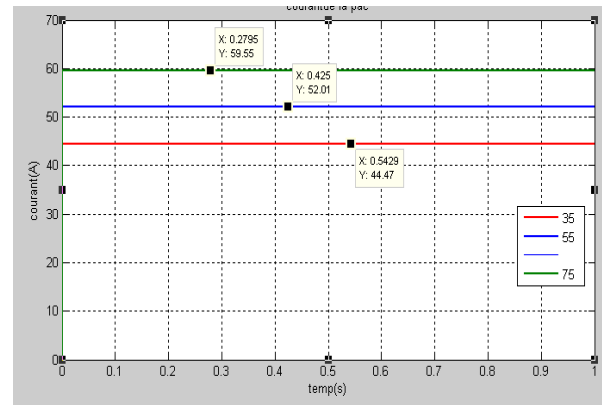
### III.6. Effet de la température

L'effet de la variation de la température est aussi analysé sur la tension et le courant ainsi que sur les caractéristiques V(I) et P(I) (Figures III.8 et III.9).

L'augmentation de la température influe positivement sur la tension et le courant de la pile. On note aussi que l'effet de la température est très important.

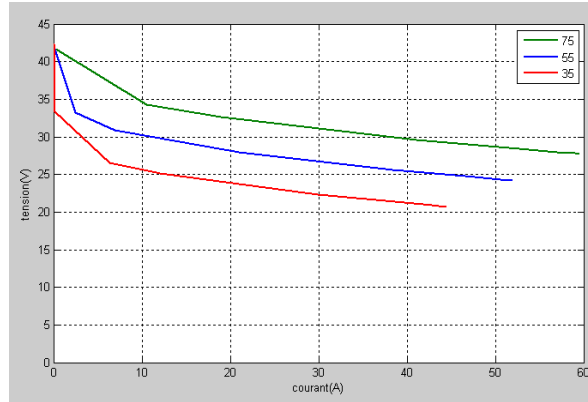


a. Effet sur la tension

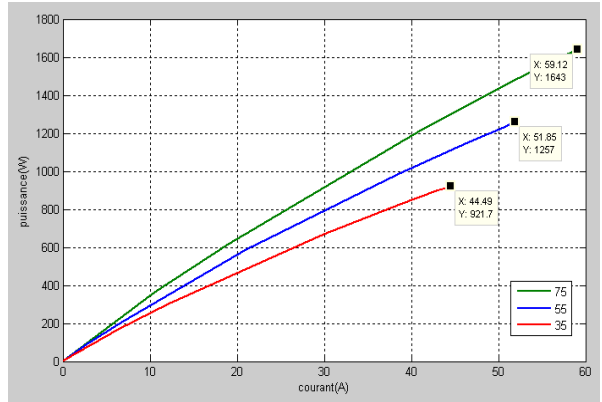


b. Effet sur le courant

**Figure III.8.** Effet de la température sur la tension et sur le courant



a. Effet sur V(I)



b. Effet sur P(I)

**Figure III.9:** Effet de la température sur les caractéristiques V(I) et P(I).

### III.7. Régime Dynamique

Pour l'analyse du régime dynamique, nous allons effectuer des simulations du débit de la pile à combustible sur une charge variable. Dans un premier temps, la charge est directement

connectée à la pile et dans un deuxième temps, la charge est connectée à la pile à travers un hacheur parallèle (boost).

### III.7.1. Cas d'une charge RL connectée directement à la pile à combustible

Le montage est donné en figure III.10. En premier, la charge ( $R1= 5 \Omega$ ,  $L1= 1 \text{ mH}$ ) est connectée directement à la PAC, puis une deuxième charge ( $R2 = 0.5 \Omega$ ) est branchée à  $t = 0.05\text{s}$  pour enfin être déconnectée à  $t = 0.15\text{s}$  à l'aide d'un interrupteur idéal.

Les résultats de simulation sont donnés en figures III.11 et III.12. On voit bien que quand le courant augmente, la tension diminue (Figure III.11). Pour garder la tension de sortie constante, il est nécessaire d'utiliser un convertisseur et d'effectuer un réglage en boucle fermée de la tension de sortie du convertisseur. De plus, les variations brusques de la charge provoquent des pics de courant et de la tension (Figure III.12); ce comportement n'est pas bon pour la PAC car les changements brusques provoquent une détérioration des performances de la PAC à long terme et entraînent une réduction de sa durée de vie.

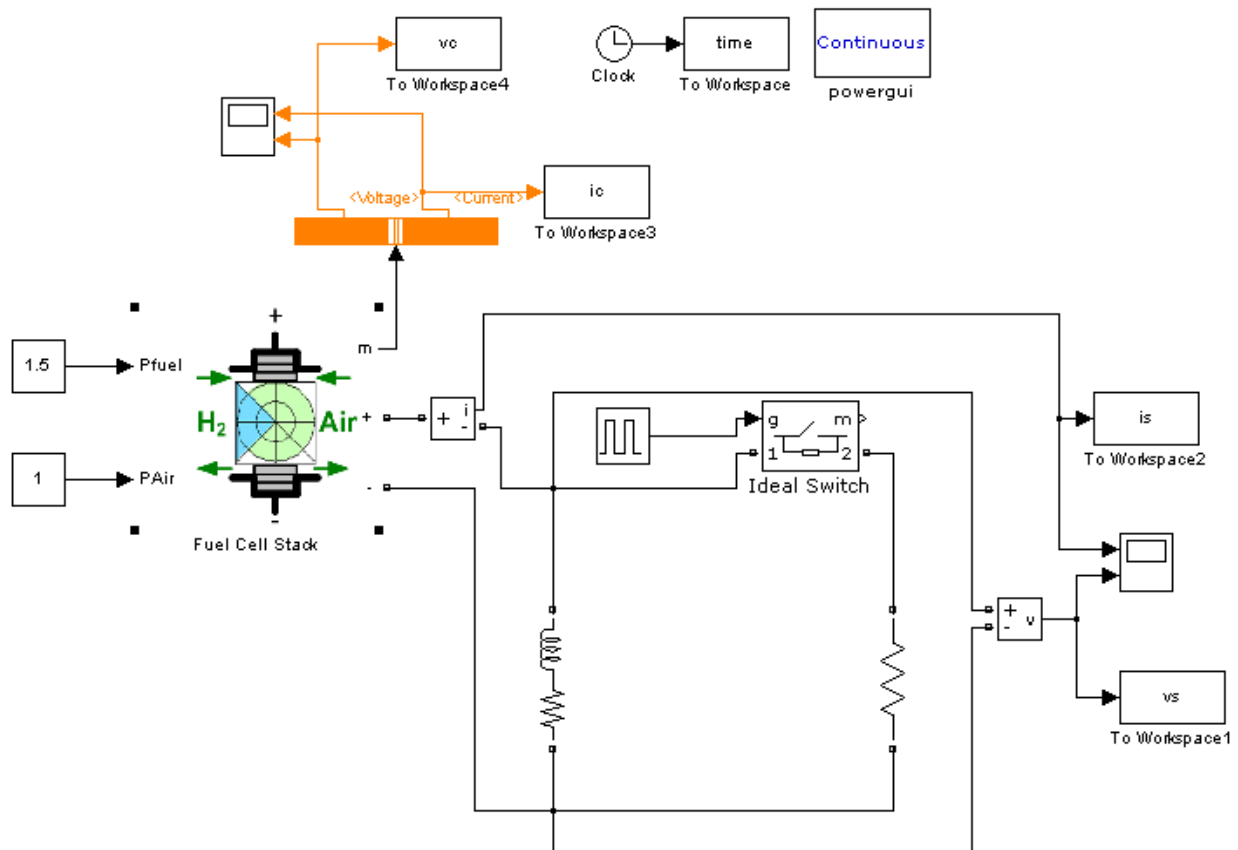
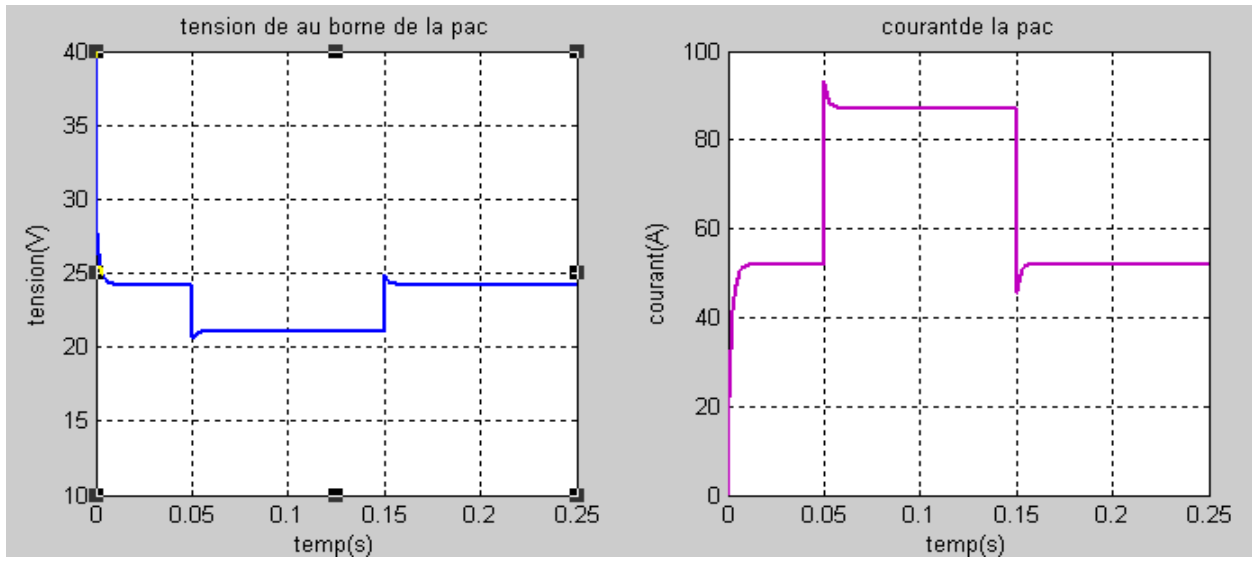
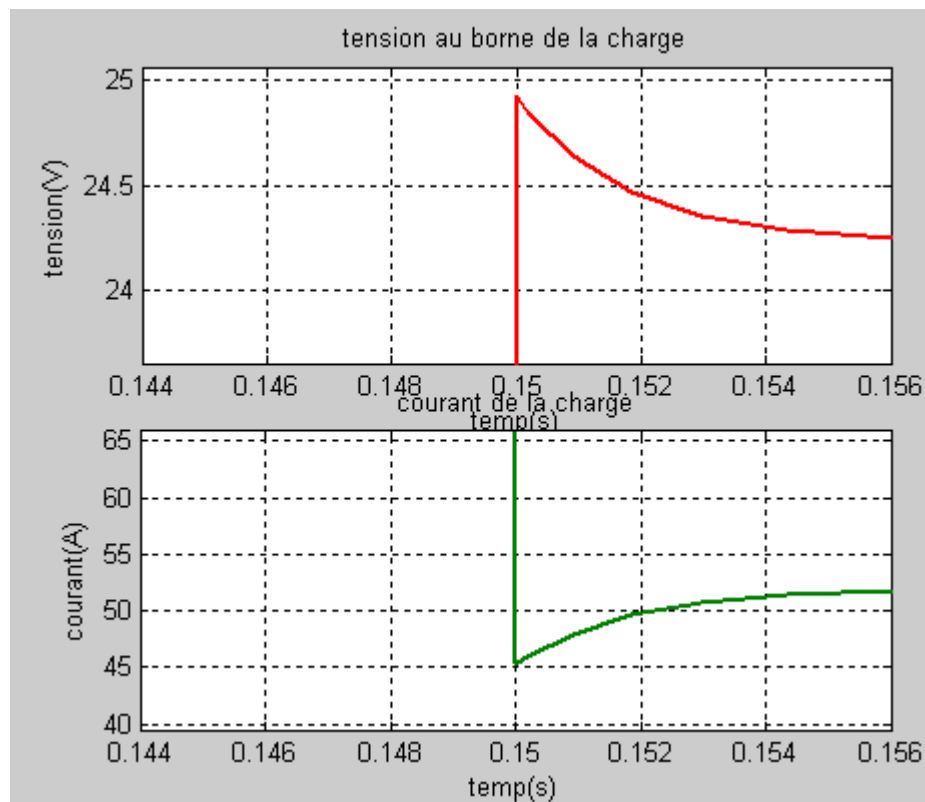


Figure III.10: Schémas de montage pour l'analyse du régime dynamique.



**Figure III.11:** Tension et courant de la PAC



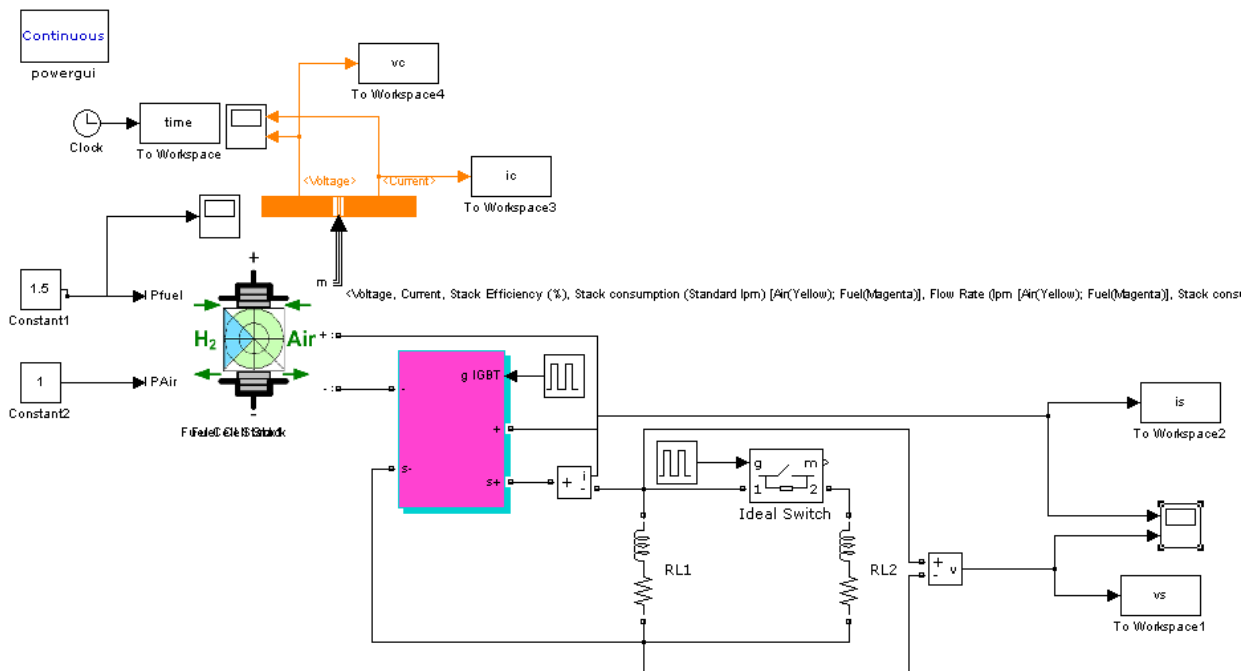
**Figure III.12:** Zoom sur la tension et le courant en régime dynamique

### III.7.2. Cas d'une charge RL connectée à la pile à combustible par l'intermédiaire d'un hacheur boost (élevateur)

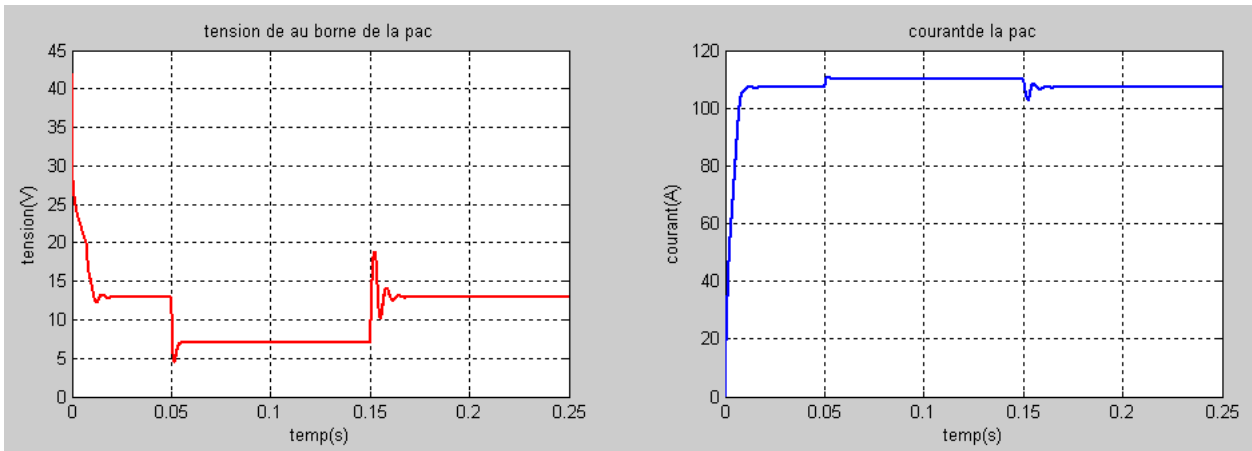
Le montage est donné en figure III.13. Le convertisseur utilisé est un hacheur élevé avec un rapport cyclique constant :  $\alpha = 0.5$ . La même charge et les mêmes séquences de conduction que pour le paragraphe III.7.1 sont considérées. En premier, la charge ( $R1= 5 \Omega$ ,  $L1= 1 \text{ mH}$ ) est connectée à la PAC, puis une deuxième charge ( $R2 = 0.5 \Omega$ ) est branchée à  $t = 0.05\text{s}$  pour enfin être déconnectée à  $t = 0.15\text{s}$  à l'aide d'un interrupteur idéal, toutes les charges sont connectées à travers le hacheur boost (Figure III.13).

On voit bien que la tension et le courant de la PAC présentent des pics qui sont mauvais pour le bon fonctionnement de celle-ci (Figure III.14). Pour faire éviter à la PAC ces régimes dynamiques sévère, on peut lui en parallèle ajouter une deuxième source plus rapide afin de fournir le courant en régime dynamique.

Dans la figure III.15, on voit bien que la tension de sortie du convertisseur change avec la charge; ceci est tout à fait normal car la tension délivrée par la PAC change. Pour fixer la tension de sortie du convertisseur, un fonctionnement de celui-ci en boucle fermée est nécessaire.



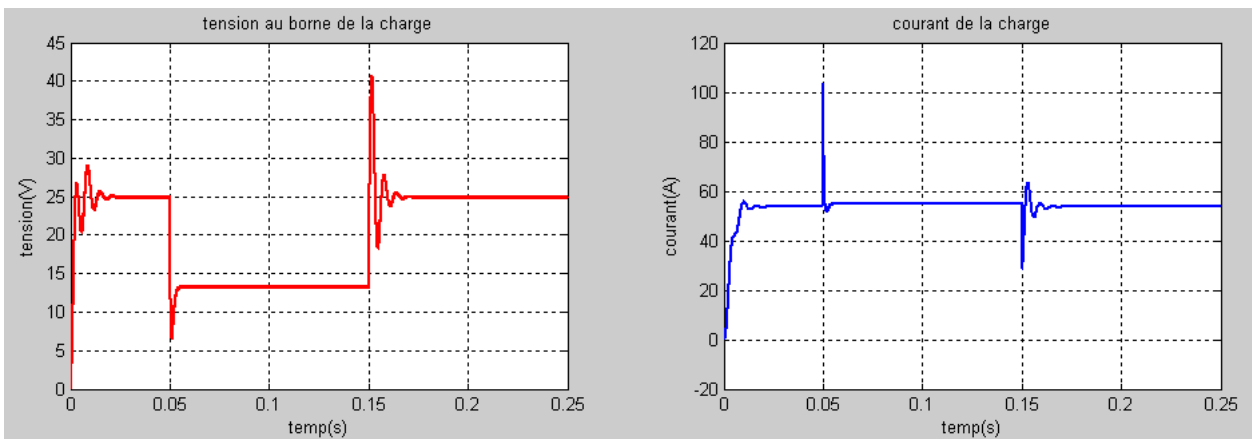
**Figure III.13:** Montage pour l'analyse du régime dynamique avec utilisation de l'hacheur boost.



a. Tension aux bornes de la PAC

b. Courant de sortie de la PAC charge

**Figure III.14:** Courant et tension de la PAC



a. Tension aux bornes de la charge

b. Courant dans la charge

**Figure III.15:** Courant et tension de la charge

### III.8. Conclusion

En conclusion, nous pouvons dire que dans ce chapitre, nous avons effectué des simulations qui nous ont permis de faire ressortir les caractéristiques statiques et dynamiques de la PAC. En effet, elle nécessite une source plus rapide (super condensateur ou bien batterie) pour lui faire éviter les régimes dynamiques sévères et un convertisseur électronique de puissance à la sortie pur régler la tension de sortie.

## Conclusion générale

En conclusion, nous pouvons dire que dans cette étude sur les PAC, nous avons commencé par donner quelques généralités comme la définition, un petit historique, le principe de fonctionnement, puis nous avons cité les différents types des piles à combustibles ainsi que leurs caractéristiques et leurs applications (transport, stationnaire relié au réseau ou nomade "off grid") pour chaque type, puis nous avons donné et discuté les modèles mathématiques de la pile de type PEMFC, à la fin nous avons fait une étude par simulation basée sur le modèle le plus complet d'une pile de type PEMFC à savoir le modèle d'Amphlett disponible sous MatLab/Simulink. Cette étude par simulation nous nous sommes intéressés au comportement statique et dynamique, de plus nous avons effectué une association de la PAC avec un convertisseur Boost (hacheur parallèle élévateur) et nous avons fait ressortir le comportement dynamique de l'ensemble. A noter que l'utilisation de ce type de convertisseur à la sortie permet à la fois d'élever la tension de sortie et de la régler à une valeur donnée quelque soit la charge.

Après l'étude et la simulation nous pouvons conclure que nous avons pu faire ressortir les caractéristiques statiques et dynamiques de la PAC. Nous avons montré cette dernière présente un comportement global non linéaire de plus la tension de sortie varie fortement avec la charge en ce qui nécessite le réglage de cette tension par utilisation d'un convertisseur électronique de puissance, en l'occurrence un convertisseur boost (non réversible et permettant d'élever le niveau de tension).

Dans le régime dynamique nous avons remarqué des pics du courant et de la tension, il est connu que les PACs ne supportent pas ces pics donc il faut utiliser une deuxième source électrique plus rapide que la PAC pour assurer les régimes dynamiques et éviter aux PAC les variations brusques du courant et de la tension qui sont dangereux et risquent de réduire leur durée de vie.

---

**Bibliographie**

- [1]. Modèle dynamique non linéaire de la pile à combustible du type PEM : application à la régulation de l'humidité dans la membrane électrolytique, Ahmad Haddad ,2011, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00608632>
- [2]. Photo de Francis Thomas Bacon et sa pile à combustible, tpe-pille-lla.e-monsite.com, « Francis T.Bacon et son prototype de pile à combustible, bacon.jpg », <http://tpe-pille-lla.e-monsite.com/pages/pile-a-combusstibles/-.html>
- [3]. Photo , George WAND, « A battery of batteries under the bonnet (hood) of the Austin A40 ; the Allis Chalmers D-12, Austin.png ; tracteur électrique.png », dans FuelCell History, Part 2, sur le site ogniwa paliwowe, [http://ogniwa-paliwowe.info/Fuel\\_Cell\\_History\\_2.pdf](http://ogniwa-paliwowe.info/Fuel_Cell_History_2.pdf)
- [4]. La pile à combustible, Guide technique, www.edipa.fr, Coprotec Colmar.
- [5]. Connaissance des Énergies, 2014, « Fonctionnement d'une pile SOFC (basique), pile-sofc\_zoom.png », <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/pile-a-combustible>.
- [6]. Maxime BALVA , Novembre 2017, « vue éclatée et assemblée d'une pile à combustible », [https://www.researchgate.net/figure/2-vue-eclatee-et-assemblee-dune-pile-a-combustible-3\\_fig2\\_325675492](https://www.researchgate.net/figure/2-vue-eclatee-et-assemblee-dune-pile-a-combustible-3_fig2_325675492).
- [7]. Gaetan DELACHEZE, « La Pile à Combustible », <http://gaetan.delacheze.free.fr/pile-combustible/pile.html>.
- [8]. La pile à combustible, Guide technique, [www.edipa.fr](http://www.edipa.fr).
- [9]. Dinh An Nguyen, « Modélisation dynamique du "cœur" de pile à combustible de type PEM » 29 Mar 2018. Disponible sur: <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01748865>
- [10]. A. Saadi « Modélisation et commande du circuit d'air d'une pile à combustible PEMFC », thèse de doctorat, université de Biskra, décembre 2014.
- [11]. CoradiaiLint « le premier train à hydrogène au monde », septembre 2016, <https://www.alstom.com/fr/nos-solutions/materiel-roulant/coradia-ilint-le-premier-train-hydrogene-au-monde>
- [12]. Audric DOCHE, « Hydrogène : Toyota persiste et signe », 28 mai 2018, <https://www.caradisiac.com/hydrogene-toyota-persiste-et-signe-168534.htm>
- [13]. Michaël TORREGROSSA, « Mercedes GLC F-Cell : le SUV à hydrogène en version définitive à Francfort, mercedes-glc-f-cell-iaa-2017.jpg », 13 septembre 2017, <https://www.automobile-propre.com/mercedes-glc-f-cell-suv-a-hydrogene-version-definitive-a-francfort/>

- [14]. Wolfgang BREDOW, « Diamond HK36 Super Dimona, dimona.jpg », [http://www.bredow-web.de/ILA\\_2008/Sportflugzeug/Super\\_Dimona\\_Brennstoffzellenflugzeug/super\\_dimona\\_brennstoffzellenflugzeug.html](http://www.bredow-web.de/ILA_2008/Sportflugzeug/Super_Dimona_Brennstoffzellenflugzeug/super_dimona_brennstoffzellenflugzeug.html)
- [15]. NASA, « LGM-25C Titan II, Titan2\_color\_silo.jpg », 12 mars 1962, [https://fr.wikipedia.org/wiki/LGM-25C\\_Titan\\_II](https://fr.wikipedia.org/wiki/LGM-25C_Titan_II)
- [16]. NASA on The Commons, « Apollo 11 Launched Via Saturn V Rocket, 4858567248\_3eec79e7ec\_o.jpg », 16 juillet 1969, <https://www.flickr.com/photos/nasacommons/4858567248>
- [17]. Type 212 submarine, 25 mai 2019, « Type 212, Salvatore\_Todaro\_(S-526).jpg », [https://fr.wikipedia.org/wiki/Type\\_212](https://fr.wikipedia.org/wiki/Type_212)
- [18]. Vincent Groizeleau, « DCNS relève le défi des piles à combustible de seconde génération », 30 mai 2016, <https://www.meretmarine.com/fr/content/dcns-releve-le-defi-des-piles-combustible-de-seconde-generation>
- [19]. Wikipédia, « Type 214, S-120\_Papanikolis\_1.jpg », 8 mai 2019, [https://fr.wikipedia.org/wiki/Type\\_214](https://fr.wikipedia.org/wiki/Type_214)
- [20]. « La pile à combustible d'Energy Observer », 9 janvier 2019, <http://www.energy-observer.org/actu/fr/la-pile-a-combustible-denergy-observer/>
- [21]. Enerzine, « Panasonic mise sur les piles à combustible résidentielles, 6 septembre 2011, <http://www.enerzine.com/panasonic-mise-sur-les-piles-a-combustible-residentielles/13353-2011-09>
- [22]. « Domaines d'utilisation de la pile à hydrogène », Université de Caen, 2001. <https://eduscol.education.fr/orbito/pedago/pileh2/pile2.htm>
- [23]. J. Larminie and A. Dicks. « Fuel Cell Systems Explained ». John Wiley Sons 2003.
- [24]. D. Yu et S. Yuvarajan, « Electronic circuit model for proton exchange membrane fuel cells », Journal of Power Sources, vol. 142, pp. 238–242, 2005.
- [25]. A. SAADI, « Modélisation et commande du circuit d'air d'une pile à combustible PEMFC », thèse de doctorat, université de Biskra, décembre 2014.
- [26]. A. LACHICHI, « Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant - Application aux convertisseurs pour pile à combustible », thèse de doctorat, université de Franche-Comté, novembre 2005.
- [27]. M. Mikkola, « Experimental studies on polymer electrolyte membrane fuel cell stacks », Master thesis, Helsinki University of Technology, 2000.



- 
- [28]. A.Saadi, M. Becherif, A. Aboubou, and M. Ayad. « Comparison of proton exchange membrane fuel cell static models ». *Renewable Energy*, Vol. 56, pp. 64\_71, 2013.
- [29]. J. Amphlett, R. Baumert, R. Mann, B. Peppley, P. Roberge, and A. Rodrigues. «Parametric modelling of the performance of a 5-kW proton exchange membrane fuel cell stack». *Journal of Power Sources*, Vol. 49, No. 1-3, pp. 349\_356, 1994. Proceedings of the Third Grove Fuel Cell Symposium The Science, Engineering and Practice of Fuel Cells.
- [30]. J. Amphlett, R. Baumert, R. Mann, B. Peppley, and P. Roberge. «Performance modeling of the Ballard-Mark-IV solid polymer electrolyte fuel cell, I. Mechanistic model development». *Electrochemical Society*, Vol. 142, No. 1, pp. 1\_8, 1995.
- [31]. J. Kim, L. Seong, S. Supramaniam, and C. Chamberlin. « Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance with an Empirical Equationl ». *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 142, No. 8, pp. 2670\_2674, 1995.
- [32]. G. X. Tatsuhiro Okada and M. Meeg. \_Simulation for water management in membranes for polymer electrolyte fuel cells\_. *ElectrochimicaActa*, Vol. 43, No. 14-15, pp. 2141\_2155, 1998.