

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 و التكنولوجيا

**Département D'Électrotechnique**

## **Mémoire**

Présenté en vue de l'obtention du diplôme

**Master en Électrotechnique**

Option : Commande Electrique

## **Thème**

**Amélioration des performances d'une source de tension à base  
d'une pile à combustible à l'aide d'un réglage PI**

Réalisé par :

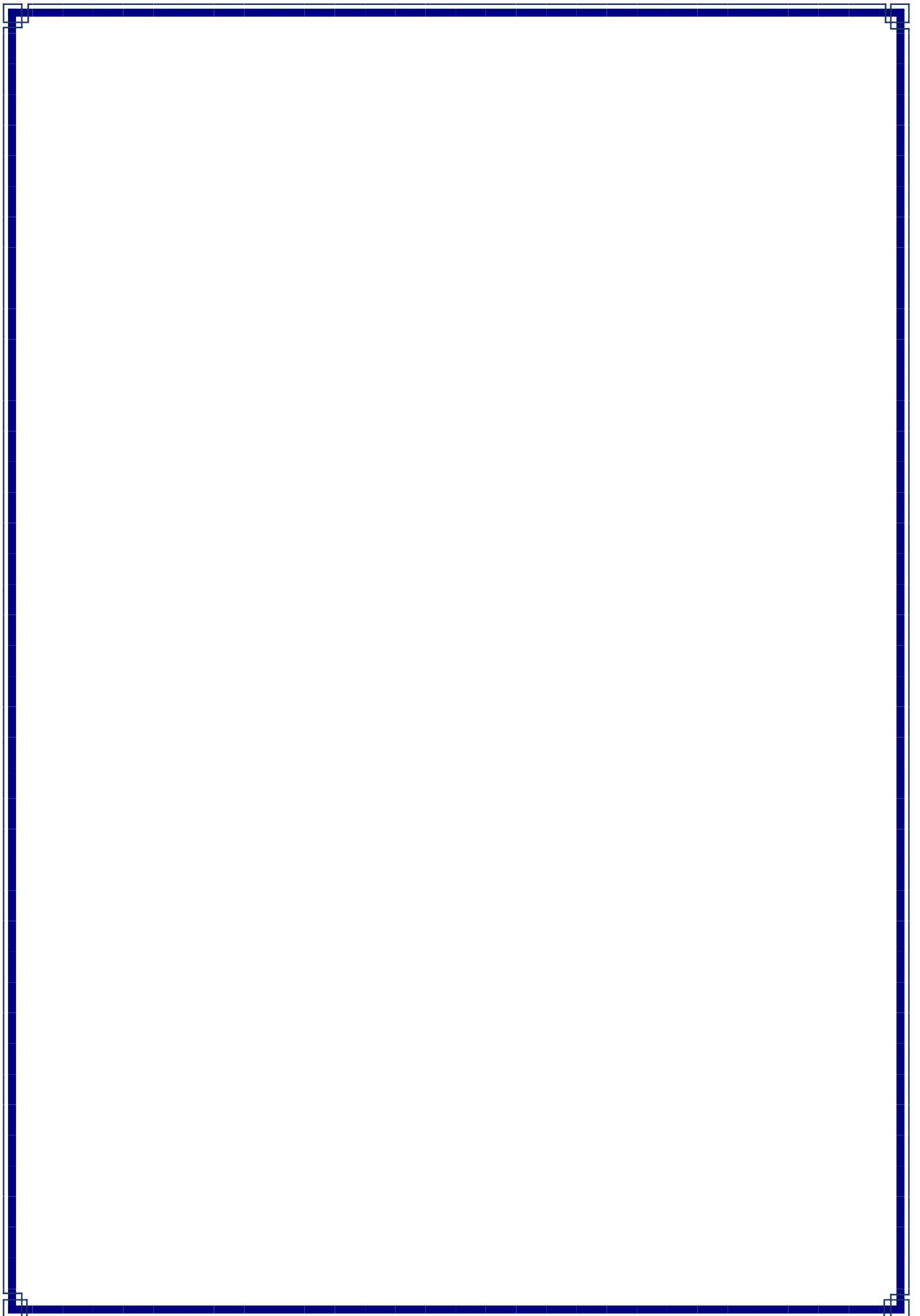
**MOHAMEDI Anis**

Travail proposé et dirigé par :

**Pr. BOUDJERDA Nasserline**

**Promotion 2021**

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**

*Je remercie Dieu tout puissant pour m'avoir donné la force et la patience pour mener ce travail à terme.*

*J'exprime ma profonde gratitude à monsieur N. BOUDJERDA pour avoir assumé la responsabilité de m'encadrer, m'orienter me conseiller tout au long de la réalisation de ce travail ainsi que pour la confiance qu'il m'a accordé.*

*Je remercie vivement tous ceux qui m'ont apporté, de près ou de loin, orientation, soutien et aide dans la réalisation et la concrétisation de ce travail.*

*Mes vifs remerciements à tous mes enseignants du primaire à l'université.*

*Merci !*

# *Dédicace*

*A mes chers parents pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de ma période d'études, en particulier mon cher père, que Dieu ait pitié de lui et le mette en paix,*

*A ma chère mère, autant de phrases aussi expressives soient-elles ne sauraient montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi,*

*A mon cher frère pour son soutien et ses encouragements,*

*A tous les membres de ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,*

*A tous mes amis, chacun en son nom,*

*Que cette œuvre soit l'accomplissement de vos désirs, et le fruit de votre soutien indéfectible.*



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

## **Chapitre I : Généralités sur les piles à combustible**

Introduction.....	03
I.1 Description générale d'une pile à combustible .....	04
I.2 Aperçu historique de la pile à combustible .....	04
I.3 Présentation de la pile à combustible .....	05
I.3.1 Classification des piles à combustible .....	05
I.3.2 Domaines d'application .....	06
I.3.2.1 Applications dans les transports .....	06
I.3.2.2 Applications stationnaires .....	07
I.3.2.3 Applications portables.....	07
I.3.2.4 Applications militaires et spatiales .....	07
I.3.2.5 Utilisation de la pile à combustible dans différent capteurs .....	07
I.3.3 Avantages et inconvénients des piles à combustible .....	07
I.3.3.1 Avantages des piles à combustible .....	07
I.3.3.2 Inconvénients des piles à combustible .....	08
I.4 Principe de fonctionnement d'une pile à combustible .....	09
I.5 Constitution d'une pile à combustible .....	09
Conclusion .....	12

## **Chapitre II : Fonctionnement d'une pile à combustible de type PEM**

Introduction .....	13
II.1 Pile à combustible de type PEM .....	14
II.1.1 Principe de fonctionnement de la pile a combustible de type PEM .....	14
II.2 Modèle d'Amphlett et al .....	15
II.2.1 Potentiel thermodynamique .....	16
II.2.2 Pertes d'activation .....	16
II.2.3 Phénomènes ohmiques.....	17
II.2.3.1 Conduction électronique .....	17
II.2.3.2 Conduction protonique .....	17
II.2.4 Pertes de concentration .....	18

II.2.5	Courbe de polarisation .....	18
II.3	Simulation d'une pile à combustible de type PEMFC.....	19
II.3.1	Présentation du modèle Simulink de la pile PEMFC.....	19
II.3.2	Fonctionnement nominal.....	20
II.4	Quelques caractéristiques de la pile à combustible de type PEM .....	21
II.4.1	Effet de la pression de l'hydrogène .....	21
II.4.2	Effet de la pression de l'air (oxygène) .....	23
II.4.3	Effet de la température.....	24
II.5	Simulation du fonctionnement d'une pile à combustible de type PEM.....	24
II.5.1	Alimentation d'une charge( RL connectée directement à la pile à combustible)...	24
II.5.2	Alimentation d'une charge avec un Convertisseur.....	26
II.5.2.1	Convertisseur abaisseur de tension (Buck).....	26
II.5.2.2	Alimentation d'une charge avec un hacheur série (Convertisseur abaisseur de tension(Buck)).....	26
II.5.2.3	Convertisseur élévateur de tension (boost).....	28
II.5.2.4	Alimentation d'une charge avec un hacheur parallèle (Convertisseur élévateur de tension: Boost).....	28
	Conclusion.....	30
<b>Chapitre III : Réglage de la tension de sortie</b>		
	Introduction .....	31
III.1	Régulateur à action proportionnelle et intégrale (PI) .....	32
III.1.1	Structure de la commande PI .....	32
III.2	Régulateur PID (Proportionnel Intégral Dérivé) .....	34
III.3	Réglage PI de la tension de la PAC par utilisation d'un hacheur série (Buck)...	36
III.4	Réglage PI de la tension de la PAC par utilisation d'un hacheur parallèle (Boost)	38
	Conclusion .....	41
	<b>Conclusion générale</b> .....	42
	Bibliographie .....	43

### Nomenclature :

#### Abréviations :

PAC : Pile à combustible.

MCFC : Pile à combustible à carbonate fondu.

SOFC : Pile à combustible à oxyde solide.

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.

Convertisseur DC-AC : convertisseur courant continue – alternatif.

#### Symboles :

$V_{cellule}$  : tension d'une cellule de pile à combustible.

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

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

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

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

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

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

$K_{cell}$  : constant d'une cellule.

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

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

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

$\chi_{H_2O}^{sat}$  : 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 ( $\mu m$ ).

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

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

$\lambda_{H_2O/SO_3^-}$  : Est le taux d'hydratation (teneur en eau dans la membrane).



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

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

$T_n$  : 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).

$R$  :  $R_1$  :  $R_2$  : charge résistive ( $\Omega$ ).

$C_1$  : charge capacitive (F).

$L_1$  :  $L_2$  : charge inductive (H).

$V$  : la tension (V).

$I$  : le courant (A).

$P$  : la puissance (W).

$\tau$  : La constante de temps.

$G(s)$  : fonction de transfert.

$E(s)$  : grandeur d'entrée.

$S(s)$  : grandeur de sortie.

$E(t)$  : signald'entrée.

$K_p$  : gain Proportionnel.

$K_i$  : gain Intégral.

$\varepsilon(t)$  : erreur.

## Introduction générale

Les questions énergétiques recouvrent à l'heure actuelle deux enjeux. L'un est lié au risque d'épuisement des ressources fossiles et fissiles, l'autre est environnemental. Les sources utilisées aujourd'hui sont en effet à réserves finies, aussi bien pour les combustibles fossiles (hydrocarbures, charbon...) que pour les combustibles fissiles (uranium). L'utilisation de ces sources d'énergie engendre en outre des effets secondaires indésirables : émission de gaz à effet de serre dans le cas des hydrocarbures, et production de déchets difficiles à traiter dans le cas du nucléaire.

Face à la diminution des ressources énergétiques, il est devenu indispensable de trouver des alternatives énergétiques possédant les mêmes propriétés que les hydrocarbures en termes de stockage et de transport. Dans ce contexte, l'hydrogène s'avère être un candidat très sérieux, même s'il ne constitue qu'un vecteur énergétique et non une ressource primaire. De plus, l'hydrogène peut apporter une réponse aux enjeux climatiques en permettant de rationaliser l'utilisation des énergies renouvelables par nature dispersées et aléatoires.

L'hydrogène, qui n'existe pas à l'état naturel, peut en effet être synthétisé à partir des énergies renouvelables. Outre sa fonction de vecteur énergétique, est alors exploité son caractère stockable permettant d'une part, de s'affranchir du côté aléatoire de ces modes de production, et d'autre part, de répondre aux exigences fixées par les consommateurs d'énergie.

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 présentons un état de l'art sur les piles à combustible, les différents types existants, ainsi que leur classification.

- Le deuxième chapitre est consacré aux caractéristiques de la pile à combustible de type PEM et à son fonctionnement, ainsi qu'à la connaissance d'un de ses modèles (Modèle d'Amphlett et al). En plus de cela, nous effectuons quelques simulations de la pile à combustible de type PEMFC en utilisant le modèle d'Amphlett 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 par utilisation de deux convertisseurs (buck et boost).
- Le troisième chapitre est réservé à un réglage de tension de la PAC par utilisation d'un régulateur PI. Nous commençons par quelques notions sur les régulateurs PID classiques suivis d'une explication de deux méthodes pour déterminer ses paramètres. En dernier, un réglage de la tension de sortie de la PAC est effectué à l'aide d'un régulateur PI. Ce réglage est effectué dans deux configurations de convertisseurs : la configuration basée sur le hacheur série (abaisseur de tension) qui nous permet d'obtenir une tension inférieure ou égale à la tension nominale de la PAC et la configuration basée sur le hacheur parallèle (élévateur de tension) qui nous permet d'obtenir une tension supérieure ou égale à la tension nominale de la PAC.

Enfin nous allons terminer ce mémoire par une conclusion générale.

# **Chapitre I :**

## **Généralités sur les piles à Combustible**

### Introduction

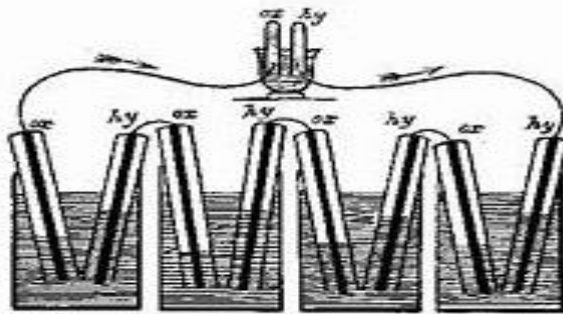
Les piles à combustibles (PAC) font valoir des arguments forts qui pourraient leur permettre de s'imposer dans les applications de production d'énergie. Dans un marché en constant changement (ouverture à la concurrence) et face à une demande croissante en électricité, les piles à combustibles représentent des sources de production d'énergie très intéressantes. Tout d'abord les piles à combustibles sont très efficaces dans la conversion du combustible en électricité. D'autre part elles ne dégagent que de l'eau et de la chaleur qui peut être valorisée pour chauffer les maisons et commerces. De plus, les piles à combustibles sont silencieuses. Finalement la pile à combustibles se révèle intéressante pour les besoins simultanés en électricité et en chaleur. Mais on peut aussi envisager des demandes uniquement en électricité ou en chaleur ou distinguer selon que les besoins dominants seront en électricité ou en chaleur. Les deux étant produits par une pile (dans un ratio dépendant du type de pile). Dans ce chapitre, nous allons passer en revue un état de l'art sur les piles à combustibles, leur classification, leur mode de fonctionnement, ainsi que leur application, sans oublier les avantages et les inconvénients de ces dernières.

### I.1. Description générale d'une pile à combustible

Une pile à combustible est un générateur d'énergie électrique. Elle transforme directement l'énergie chimique du combustible en énergie électrique. C'est un système qui ne produit pratiquement pas de nuisances sonores, puisqu'il ne comporte pas de composants mécaniques en mouvement, comme les turbines et les moteurs. De plus, le courant électrique est produit tant que la pile est alimentée conjointement en combustible (hydrocarbures, alcools, biomasse, gaz naturel, hydrogène) et en comburant (oxygène de l'air). C'est ce qui la différencie des batteries, accumulateurs et autres piles, où se trouve stockée sous forme chimique une quantité limitée d'énergie électrique et qui doivent soit être rechargés lorsque c'est possible (batterie de véhicule), soit être remplacés (piles pour poste de radio)[1].

### I.2. Aperçu historique de la pile à combustible

L'histoire des piles à combustible a commencé en 1839, lorsque William Robert Grove réalisa l'expérience de l'électrolyse inverse de l'eau, qui a donné naissance à la batterie à gaz (**Figure I.1**), qui est devenue plus tard une pile à combustible.



**Figure I.1.** Expérience de Sir William Grove

Durant l'année 1889, des améliorations sont portées sur le système existant, par L. Mond et C. Langer en lui introduisant un catalyseur en platine, dans ce cas-là, l'électrolyte pouvait être contenu dans des matrices poreuses en plâtres ou en amiante [2].

Après 1945, trois groupes de chercheurs (Etats Unis, Allemagne et URSS) reprennent les études sur les principaux types de générateur, en apportant les améliorations technologiques nécessaires à un développement " industriel ". Ces travaux ont débouché sur les concepts actuels. Les premières applications des piles à combustible sont les programmes spatiaux (NASA : Années 60, APOLLO : Année 1968) [3].

Dans les années 1960 et 1970, les PAC ont fait l'objet de nombreux travaux qui ont abouti aux applications spatiales : alimentation en énergie électrique des capsules Gemini

(pile à membrane échangeuse de protons "PEM: Proton Exchange Membrane"), Apollo (pile alcaline) et de la navette spatiale. Mais c'est surtout depuis le premier choc pétrolier qu'elle est prise en considération à travers de nombreuses recherches de développement sur l'automobile électrique [2].

Actuellement, on trouve de nombreux prototypes utilisant des PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) dans le domaine des transports. Daimler-Chrysler en collaboration avec Ballard commence, à partir de 1994, à fabriquer des prototypes de véhicules à pile à combustible. En parallèle, un bus à pile à combustible (NEBUS) fonctionnant à l'hydrogène est lancé en 1997 en Allemagne [2].

D'autres producteurs de véhicules à pile à combustible se font remarquer: Renault présente le prototype FEVER en 1996 et PSA le modèle HydroGen en 2001. General Motors propose également en 2001, via Opel, un prototype HydroGen 3. Toyota lance en 2002 les modèles FCHV-3,4 et 5 et Honda sort la FCX-V3. Ford et Ballard construisent une Ford Focus à pile à combustible en 2000 [4].

### I.3. Présentation de la pile à combustible

On peut dire que le fonctionnement de toutes les piles à combustible, quelque soit leur technologie (alcaline, carbonate fondu, polymère, céramique, etc.), repose sur le même principe, à savoir qu'elles sont alimentées en Hydrogène et en Oxygène qui, en se combinant dans le cœur de la pile donne lieu à des dégagements de chaleur, d'eau et d'électricité [5].

#### I.3.1. Classification des piles à combustible

Il existe différents types de piles à combustible qui se différencient essentiellement par la nature de l'électrolyte utilisé et par la température de fonctionnement [6] :

- La Pile à Membrane Electrolyte Polymérique (PEMFC: Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell ou encore Proton Exchange Membrane Fuel Cell).
- La Pile A Méthanol Direct (DMFC: Direct Methanol Fuel Cell).
- La Pile A Electrolyte Alcalin (AFC: Alcalin Fuel Cell).
- La Pile A Acide Phosphorique (PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cell).
- La Pile A Oxyde Solide (SOFC: Solid Oxyd Fuel Cell).
- La Pile A Carbonates Fondus (MCFC: Molten-Carbonate Fuel Cell).

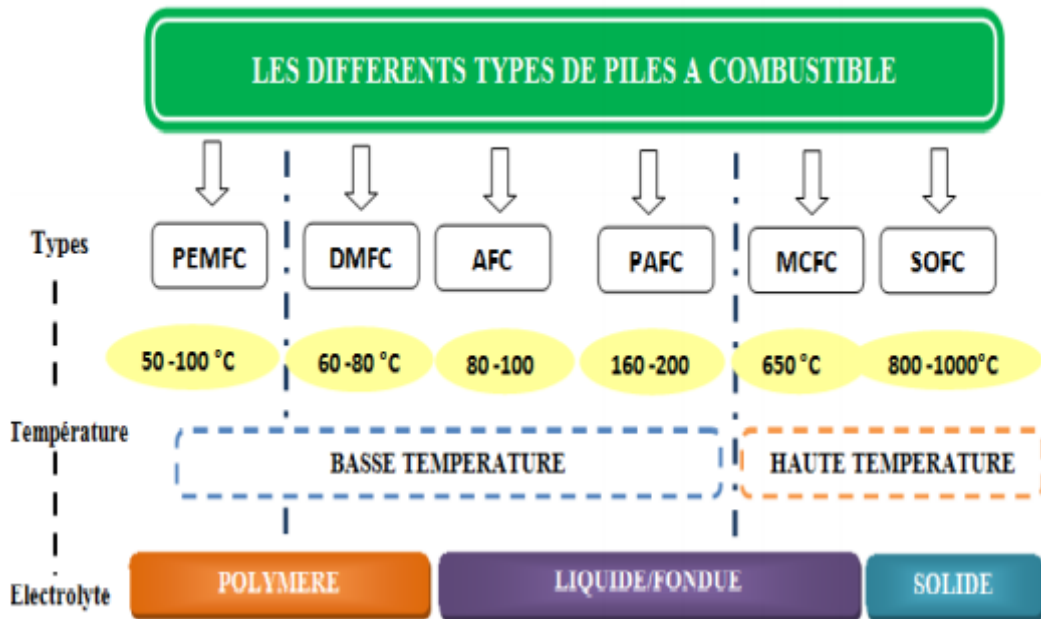


Figure I.2. Classification des piles à combustible

### I.3.2. Domaines d'application

Les piles à combustibles sont utilisées dans une large gamme de domaines qui seront présentés ci-dessous:



Figure I.3. Domaines d'application des piles à combustible

#### I.3.2.1. Applications dans les transports

Parmi les applications des piles à combustible dans le domaine de l'automobile, on peut citer la PEMFC pour la propulsion du véhicule (20 à 50 kW) et les piles alcalines pour l'alimentation en électricité des appareils de bord (climatisation, appareils électroniques) [7].



### I.3.2.2. Applications stationnaires

L'avantage des piles à combustible dans ce domaine est la production simultanée de l'électricité et de la chaleur, les types SOFC et MCFC sont mieux adaptées à la cogénération d'électricité et de chaleur. La pile à combustible commence à intéresser de nombreux industriels de ce secteur, en particulier en France, Japon, Etats-Unis, etc. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications [8]:

- La production collective (200 kW à quelques MW).
- La production domestique ou individuelle (2 à 7 kW).

### I.3.2.3. Applications portables

Pour des applications portables, les piles à combustible sont en concurrence avec les batteries. On espère gagner en temps d'autonomie et pouvoir recharger plus vite des réserves d'énergie épuisées. Les piles utilisées dans ce domaine doivent être extrêmement robustes et peu sensibles aux conditions extérieures, seulement deux types de piles sont susceptibles d'avoir des applications portables, les PEMFC et les DMFC, qui sont caractérisées par leur faible température de fonctionnement variable entre 60 et 80°C, ce qui diminue les problèmes de gestion thermique et fonctionnent à température ambiante [9].

### I.3.2.4. Applications militaires et spatiales

La NASA a utilisé des piles à combustible de type AFC pour alimenter en électricité les circuits de navettes spatiales notamment au cours du programme GEMINI et des missions APPOLO. Il est maintenant question de choisir les PEMFC dans des applications futures. L'armée allemande a aussi développé un sous marin fonctionnant grâce à des PAC [10].

### I.3.2.5. Utilisation de la pile à combustible dans différent capteurs

Il y a plusieurs utilisés par la pile à combustible comme une source d'énergie: capteurs de terrains, capteurs électrochimiques, capteurs optiques, Capteurs biologiques...[11].

## I.3.3. Avantages et inconvénients des piles à combustible

Les avantages et inconvénients des piles à combustible dépendent bien entendu du type de pile considéré et donc de l'application envisagée.

### I.3.3.1. Avantages des piles à combustible

Les avantages les plus importants sont les suivants :

- Très bon rendement énergétique (supérieur à 50 %) : en comparaison avec les moteurs à combustion interne (25-30%). L'énergie non convertie en énergie électrique est émise sous forme de chaleur et est évacuée sous forme d'eau chaude ou de vapeur. Ceci est un point fort dans le cas des applications domestiques, car la pile à combustible est capable de fournir de l'électricité et également de l'eau chaude qui pourra être utilisée pour le chauffage domestique, ce qui va augmenter le rendement de la pile à combustible jusqu'à 80-90%.
- Protection de l'environnement: 99% moins de monoxyde de carbone en comparaison avec un véhicule à essence [12].
- Efficacité : les piles à combustible sont généralement plus efficaces que les moteurs à combustion à piston ou turbine fondée. Un autre indice pour cela est que les petits systèmes peuvent être tout aussi efficaces que les grands.
- Modulabilité : Les piles à combustible ont la caractéristique importante d'être très modulables dans le sens où elles peuvent être facilement de tailles différentes. La taille d'une pile à combustible peut facilement être augmentée ou réduite et le rendement électrique est relativement indépendant de la taille de la pile [13].
- Silence: Les piles à combustible sont très calmes, même ceux qui ont d'importantes transformations au carburant supplémentaire équipement. Ceci est très important tant dans les applications portables que dans les productions combinées locales d'énergie et de chaleur [3].

### I.3.3.2. Inconvénients des piles à combustible

Les inconvénients associés aux piles à combustible sont liés à leur manque de développement [14]:

- Coût trop élevé de production et de maintenance: Le coût qui est très élevé à cause de l'utilisation des métaux nobles comme le platine au niveau des électrodes et à cause du prix de fabrication de la membrane et des plaques bipolaires.
- Le poids et le volume.
- La durée de vie : La plupart des piles sont encore des prototypes, on a donc peu de renseignements sur la durée de vie des piles. Les contraintes diffèrentes selon l'application : 1/ Automobile : quelques milliers d'heures et 2/ Stationnaire : au moins 40 000 heures.
- Le manque d'infrastructures au niveau de l'approvisionnement en carburant (hydrogène, méthane). Ceci nécessite la mise en place de systèmes de production, de transport et de

distribution. Cependant, la mise en place de tels systèmes ne peut se faire avant la commercialisation de la PAC.

### I.4. Principe de 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 :

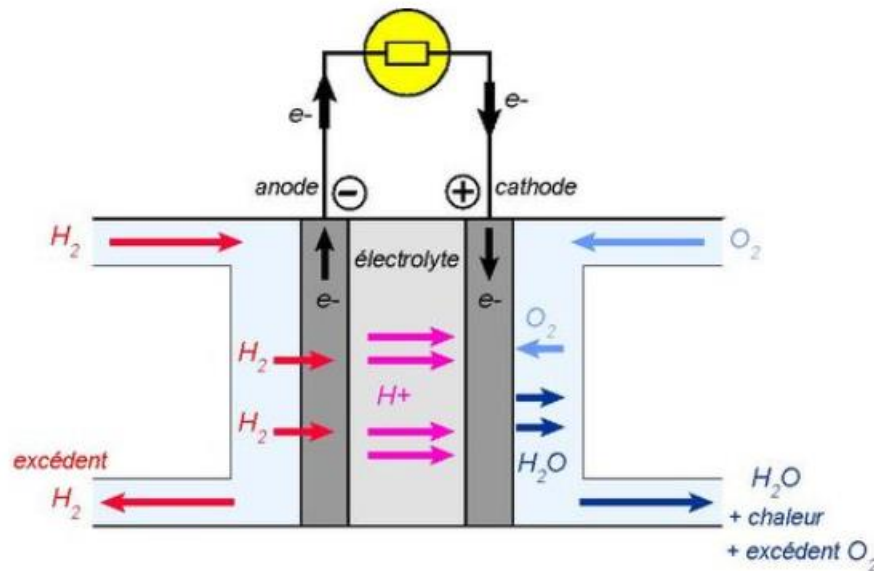
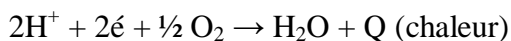
- Une grande quantité d'électrons libres à la borne -.
- Une grande quantité d'ions positifs à la borne +.

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**), [15], [16].

Nous avons donc à l'anode, la formule suivante :



Et à la cathode, la formule suivante :



**Figure I.4.** Conception d'une pile à combustible

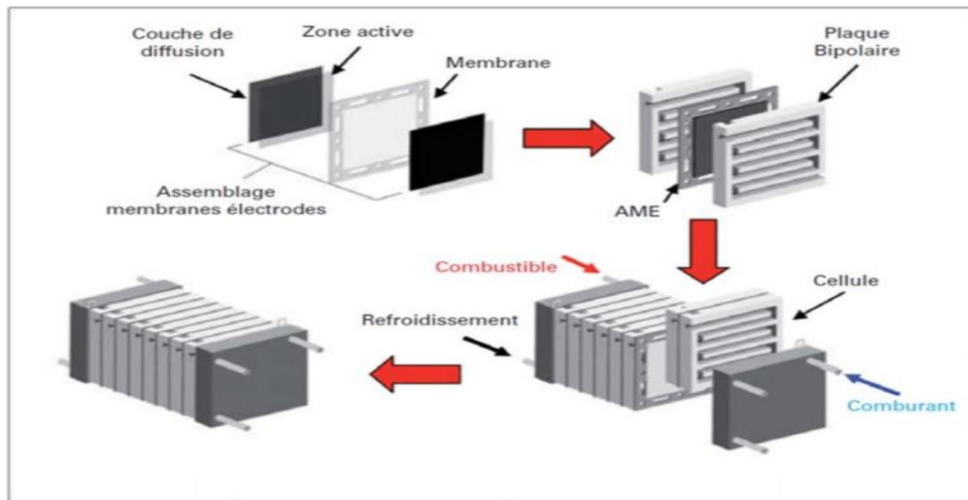
### I.5. Constitution d'une pile à combustible

D'après une pile à combustible, il y a différents composants chimiques et mécaniques qui interviennent, parmi eux nous avons, (Figure I.5) [17]:

- 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** : C'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 (+).
- 2. Le stack** : il représente un assemblage de cellules élémentaires d'une pile telles que. Il 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 et la tension dépend du nombre de cellules mises en série donc plus la pile possède de « stacks » plus on gagne en intensité et en tension pour par la suite avoir une puissance plus élevée.

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.

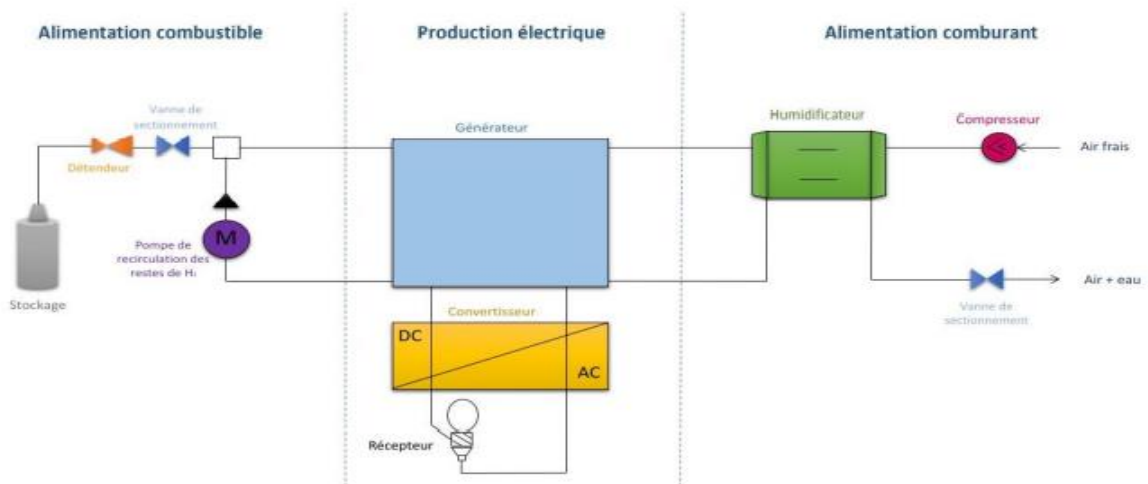


**Figure I.5.** Vue éclatée et assemblée d'une pile à combustible

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, [18], [19].

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



**Figure I.6.** Schéma technique d'une pile à combustible

### 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 avons donné une historique assez détaillée de son évolution. En troisième lieu nous avons détaillé les domaines d'application de chaque type de la pile à combustible puis nous avons cité les avantages et les inconvénients des piles à combustible. Finalement, nous avons expliqué le principe général de fonctionnement.

## **Chapitre II :**

### **Fonctionnement d'une pile à combustible de type PEM**

### Introduction

Ce chapitre est consacré au fonctionnement d'une pile à combustible de type PEM (Proton Exchange Membrane). Nous commençons par expliquer son principe de fonctionnement. Ensuite, nous donnons le modèle mathématique d'Anphlett et al, qui est parmi les modèles les plus utilisés car il est assez complet et permet de prendre en compte les effets de différents paramètres comme la température et la pression. En troisième lieu, nous allons effectuer des simulations basées sur le modèle disponible sous SIMULINK. Certaines caractéristiques sont alors discutées. En quatrième lieu, l'alimentation d'une charge à travers un convertisseur DC-DC est simulée pour les deux cas: hacheur série (abaisseur de tension) et hacheur parallèles (élevateur de tension). Enfin une conclusion termine ce chapitre.



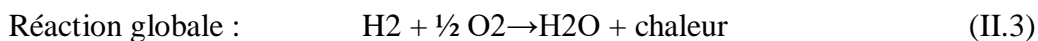
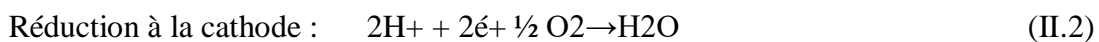
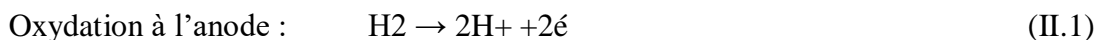
### II.1. Pile à combustible de type PEM

Parmi toutes les familles existantes, la pile à combustible de type PEM suscite de nombreux travaux de recherche et développement à travers le monde. La technologie évolue vite, d'autant plus qu'elle est poussée par la volonté des constructeurs des piles de proposer le plus rapidement possible des produits économiquement viables et fiables. Nous ne nous intéresserons qu'à la pile à combustible de type PEM, parce que cette technologie semble effectivement être la plus proche de la commercialisation dans le domaine du transport. En comparaison avec d'autres types des piles à combustibles, la pile de PEM a plusieurs caractéristiques attractives comme [20] :

- Densité de puissance plus élevée.
- Fort rendement de transformation d'énergie chimique en énergie électrique.
- Basses températures, rapide et facile à démarrer.
- Polymère solide ce qui réduit les soucis liés à la construction, au transport et à la fiabilité.
- Plus compacte et légère : une meilleure densité de puissance volumique.
- Modulaire donc facile à installer.

#### II.1.1. Principe de fonctionnement de la pile a combustible de type PEM

Une pile à combustible fonctionne sur le principe inverse de l'électrolyse de l'eau. Des réactifs chimiques permettent la production d'énergie électrique. La pile à combustible d'électrolyte à membrane polymère convertit l'hydrogène et oxygène en énergie électrique. Cette réaction d'oxydoréduction correspond à l'électrolyse de l'eau inversée :



**Remarque:** L'électricité est produite par les deux électrons libérés par la molécule d'hydrogène.

Les protons d'hydrogène traversent la membrane séparant l'anode de la cathode et se recombinent à la cathode avec les électrons et les atomes d'oxygène. Idéalement, les seuls produits secondaires de la réaction sont de l'eau et de la chaleur. Le schéma de principe d'une cellule élémentaire de pile à combustible est présenté en (**Figure II.1**) . La membrane est le cœur de la cellule élémentaire : il s'agit d'un électrolyte en polymère qui est perméable aux

protons d'hydrogène et imperméable aux gaz. Pour garantir la perméabilité aux protons, la membrane doit être en permanence humidifiée [21], [22].

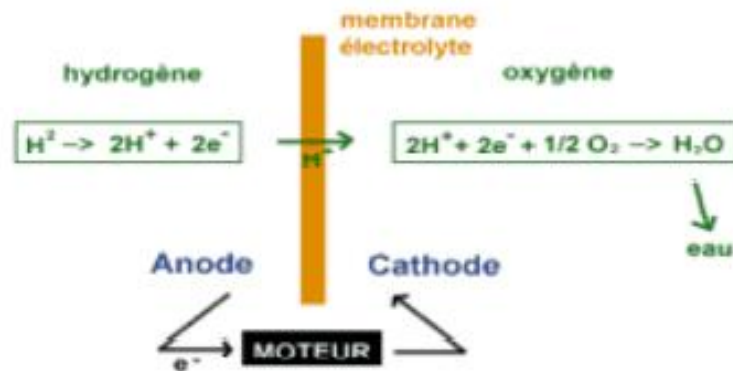


Figure II.1. Principe d'une pile PEM

### II.2. Modèle d'Amphlett et al.

Le modèle de stack de PAC (Pile à Combustible) 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.

A partir de ce modèle, la tension d'une cellule est donnée par l'équation (II.4) suivante:

$$V_{cellule} = E_{th} - \eta_{act} - R_{mem}I - \eta_{conc} \quad (II.4)$$

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.

Dans ce qui suit, 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.2.1. Potentiel thermodynamique

Le potentiel thermodynamique est défini en fonction de la température  $T$  exprimée en Kelvin, et des pressions partielles  $P_{H2}$  et  $P_{O2}$  par l'équation empirique de Nernst comme suit [23] :

$$E_{th} = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3}(T - 298.15) + 4.3085[\ln(P_{H2}) + 1/2 (P_{O2})] \quad (II.5)$$

**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.2.2. 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 [24], soit par une diode [25].

L'expression simple proposée par J.C. Amphlett et al pour toute la surtension d'activation est exprimée dans l'équation (II.6).

$$\eta_{act} = \xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T \ln(C_{O_2}^*) + \xi_4 T \ln(I) \quad (II.6)$$

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 [26] à savoir :

$$\xi_1 = -0.948$$

$$\xi_2 = K_{cell} + 0.197 \cdot 10^{-3} \ln(A_{fc}) + 4.3 \cdot 10^{-5} \ln(C_{H_2}) \quad (II.7)$$

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

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

Avec :

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

$K_{cell}$  : constant.

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

$C_{O_2}^*$ : Représente les concentrations de l'oxygène ( $mol/cm^3$ ) 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 [27].

$$C_{O_2}^* = \frac{P_{O_2}^*}{5.08 \times 10^6 e^{-(498/T)}} \quad (II.8)$$

$$P_{O_2}^* = P_{cath} \cdot [1 - x_{H_2O}^{sat}] \quad (II.9).$$

$P_{cath}$ : 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 :

$$P_{O_2}^* = \frac{1}{2} \cdot P_{cath} \quad (II.10)$$

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

$$P_{H_2}^* = P_{anode} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot x_{H_2O}^{sat}\right] \quad (II.11)$$

$P_{anode}$ : La pression de l'hydrogène à l'anode, et ( $x_{H_2O}^{sat}=0.5$ ), L'équation (II.11) devient :

$$P_{H_2}^* = \frac{3}{4} \cdot P_{anode} \quad (II.12)$$

### II.2.3. Phénomènes ohmiques

Les pertes ohmiques sont généralement modélisés par des résistances [24], [25]. Ils sont liés essentiellement à deux types de conduction : la conduction électronique (dans les électrodes) et la conduction ionique (conduction protonique dans l'électrolyte).

#### II.2.3.1. 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.2.3.2. Conduction protonique

Elle constitue l'essentiel des pertes ohmiques. Ces pertes sont les plus importantes et peuvent être réduites en diminuant l'épaisseur de l'électrolyte et en améliorant sa conductivité ionique [28], [29]. On peut les exprimer par l'équation (II.13) suivante :

$$V_{ohm} = I \cdot (R_m + R_c) \quad (II.13)$$

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 :

$$R_m = \frac{r_M \cdot l}{A_{fc}} \quad (\text{II.14})$$

Où :

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

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

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

$$r_M = \frac{181.6 + \left[ 1 + 0.03 \left( \frac{I}{A_{fc}} \right) + 0.062 \left( \frac{T}{303} \right)^2 \left( \frac{I}{A_{fc}} \right)^{2.5} \right]}{\left[ \lambda_{\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_3^-} - 0.634 - 3 \cdot \frac{I}{A_{fc}} \right] \cdot \exp \left[ 4.18 \left( \frac{T-303}{T} \right) \right]} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

- T en Kelvin, désigne la température de la pile.
- Le terme  $[181.6/\lambda_{\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_3^-} - 0.634]$  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  $30^\circ\text{C}$ .
- $\lambda_{\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_3^-}$  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 [30].

### II.2.4. 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 :

$$V_{con} = -B \left( 1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \quad (\text{II.16})$$

Avec :

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

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

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

### II.2.5. Courbe de polarisation

Afin de comprendre le phénomène intérieur de la 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.2). 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 stoeichométrie des gaz.

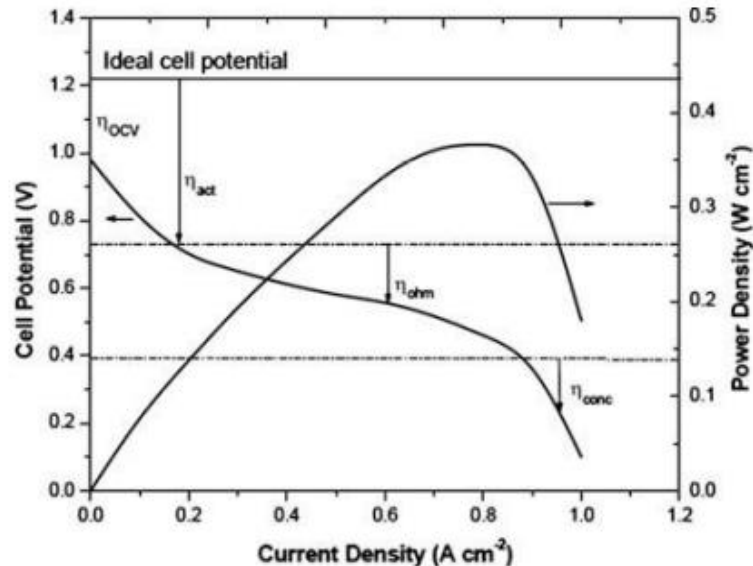
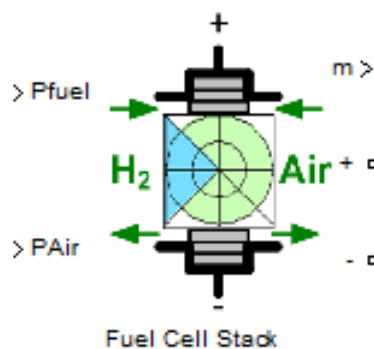


Figure II.2. Caractéristiques (V-I) et (P-I) d'une cellule élémentaire PEMFC [24]

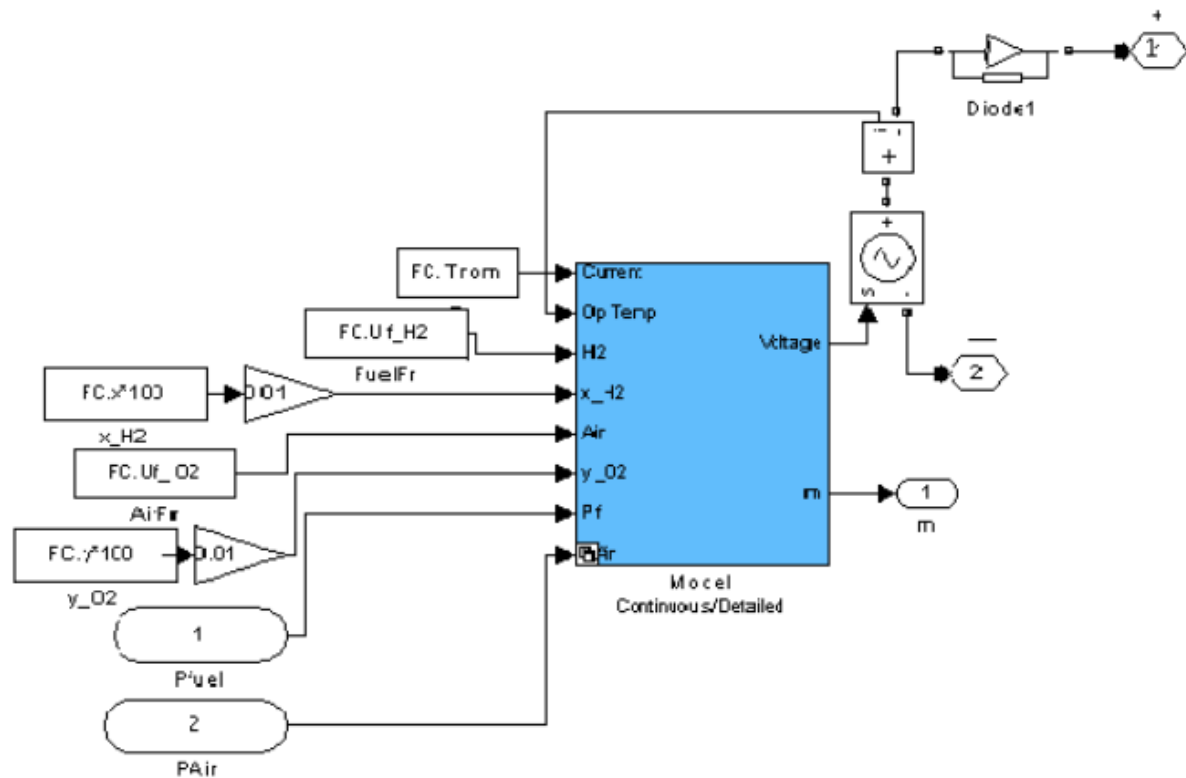
### II.3. Simulation d'une pile à combustible de type PEMFC

#### II.3.1. 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 et al [28]. 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 II.4). Le modèle Simulink choisi pour les simulations correspond à 42 cellules en série avec une puissance totale nominale de 1.26 kW.



a. Modèle général



b. Modèle développé

Figure II.4. Modèle Simulink de la pile de type PEMFC

II.3.2. 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 II.5). Les résultats obtenus pour le point nominal (tension et courant) sont donnés en (figure II.6).

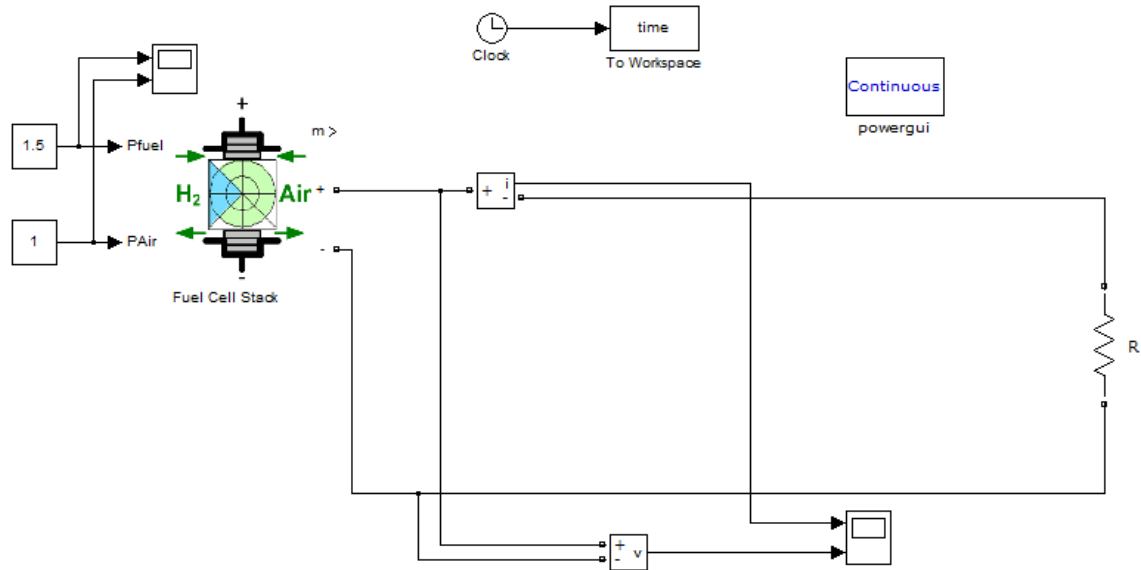
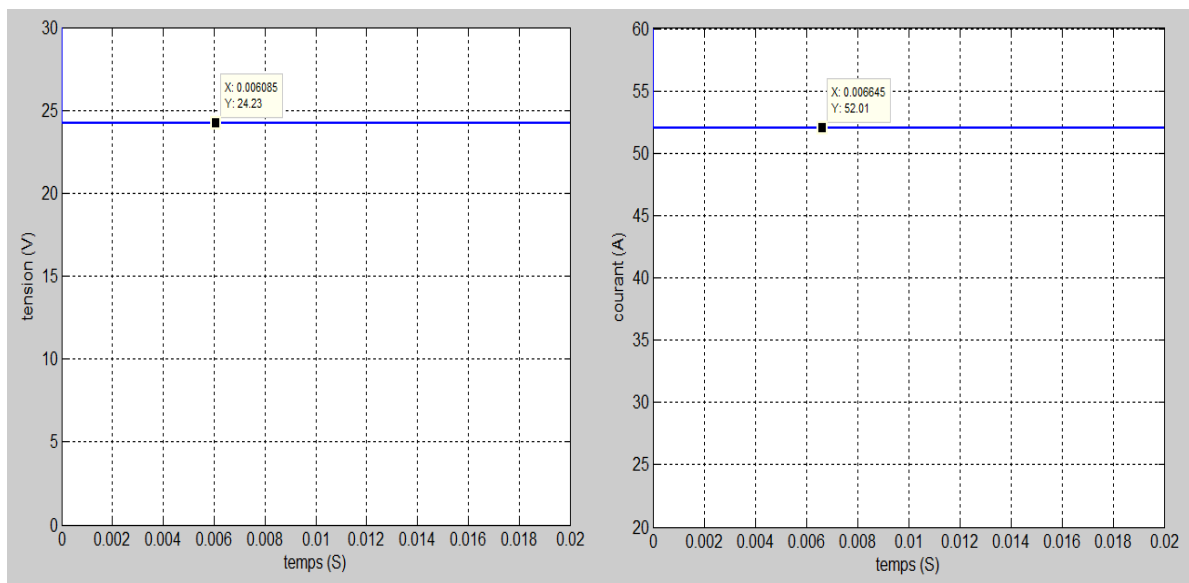


Figure II.5. Schéma de montage PAC-charge



a. tension aux bornes de la PAC

b. courant de la PAC

Figure II.6. Fonctionnement à tension et courant nominaux.

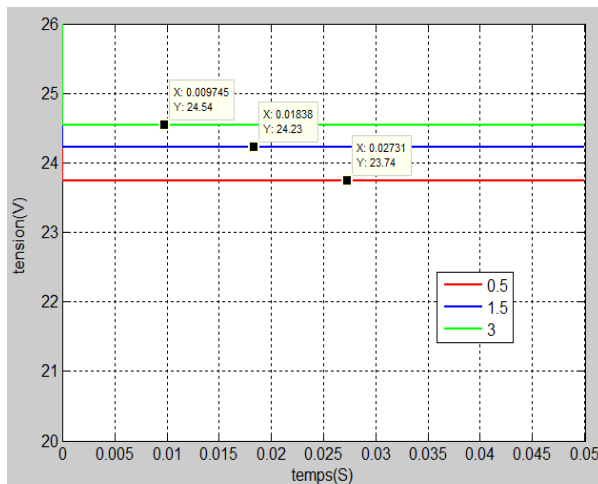
## II.4. Quelques caractéristiques de la pile à combustible de type PEM

### II.4.1. Effet de la pression de l'hydrogène

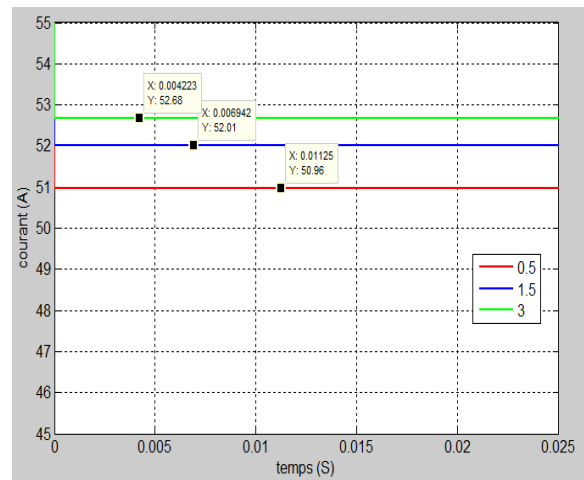
Pour observer l'effet de la pression du fuel (Hydrogène) en gardant la charge constante (nominale), nous avons comparé le régime statique pour différentes valeurs de la pression  $P_{H_2}$  ( $P_{H_2} = 0.5, 1.5$  puis 3 Bars). La tension et le courant obtenus sont donnés en (figure II.7). Plus  $P_{H_2}$  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 II.7).



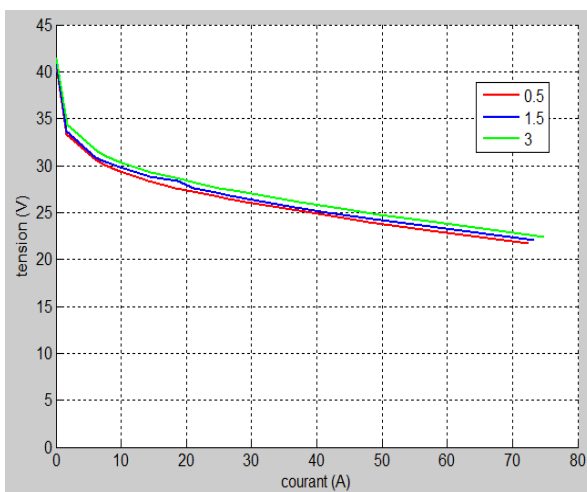
a. Effet sur la tension



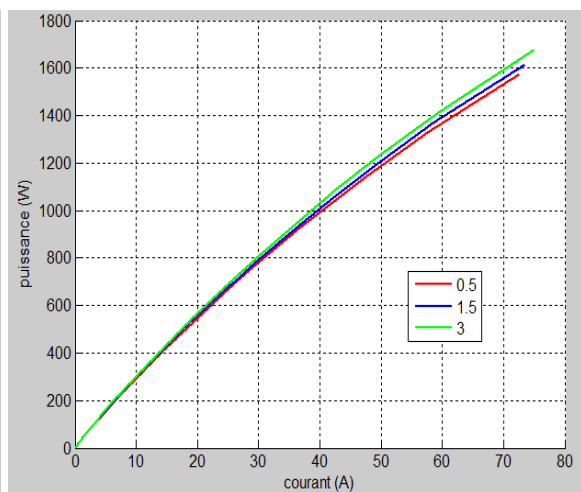
b. Effet sur le courant

**Figure II.7.** Effet de PH<sub>2</sub> sur la tension et sur le courant

Nous montrons aussi l'effet de la pression d'hydrogène sur les caractéristiques bien connues "Tension-courant V(I)" et "puissancecourant P(I)" en (Figure II.8), que nous avons obtenues par simulation en considérant plusieurs points de fonctionnement. Ce résultat est en accord avec ceux de la littérature.



a. Effet sur V(I)



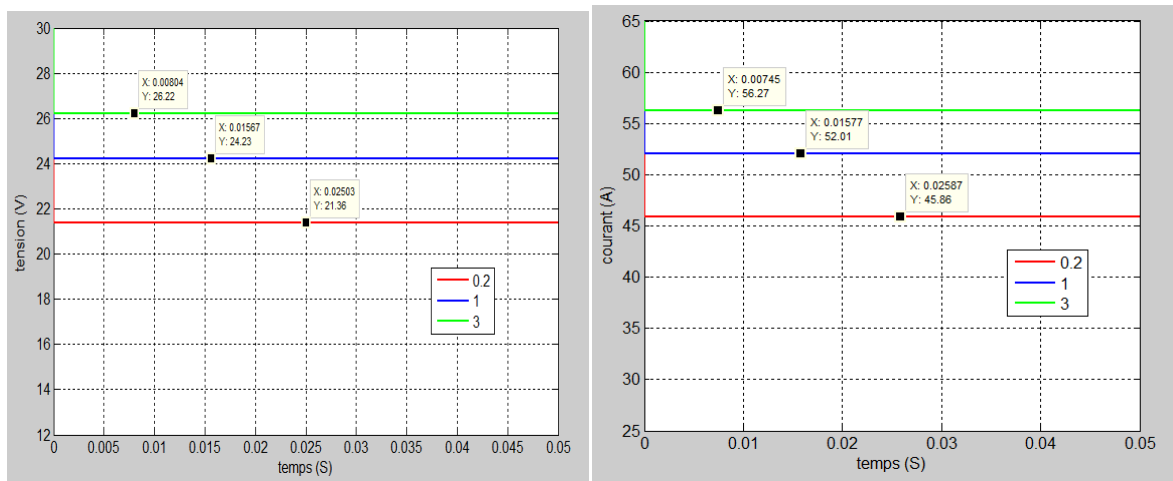
b. Effet sur P(I)

**Figure II.8.** Effet de PH<sub>2</sub> sur les caractéristiques V(I) et P(I)

II.4.2. 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.9) 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 II.9).

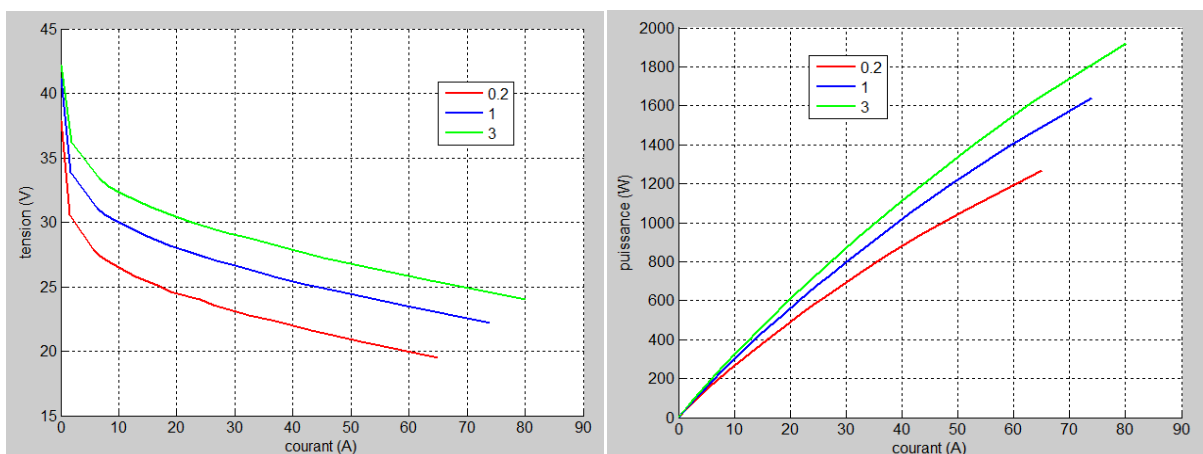
Nous montrons aussi les caractéristiques bien connues "Tension-courant  $V(I)$ " et "Puissance- courant  $P(I)$ " en fonction de  $P_{O_2}$  en considérant plusieurs points de fonctionnement en (figure II.10). Ces résultats sont en accord avec la littérature.



a. Effet sur la tension

b. Effet sur le courant

Figure II.9. Effet de  $P_{O_2}$  sur la tension et sur le courant



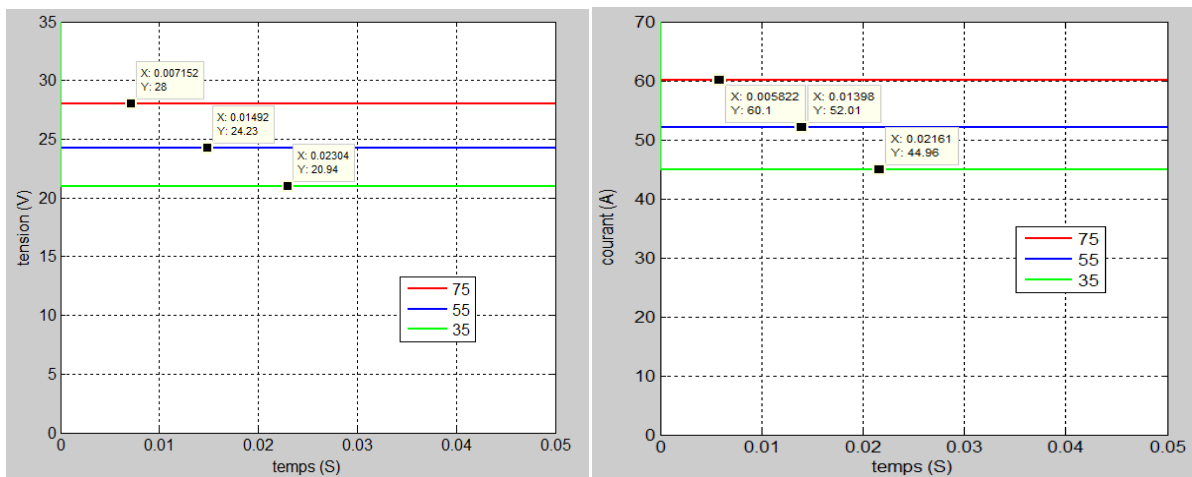
a. Effet sur  $V(I)$

b. Effet sur  $P(I)$

Figure II.10. Effet de  $P_{O_2}$  sur les caractéristiques  $V(I)$  et  $P(I)$

II.4.3. Effet de la température

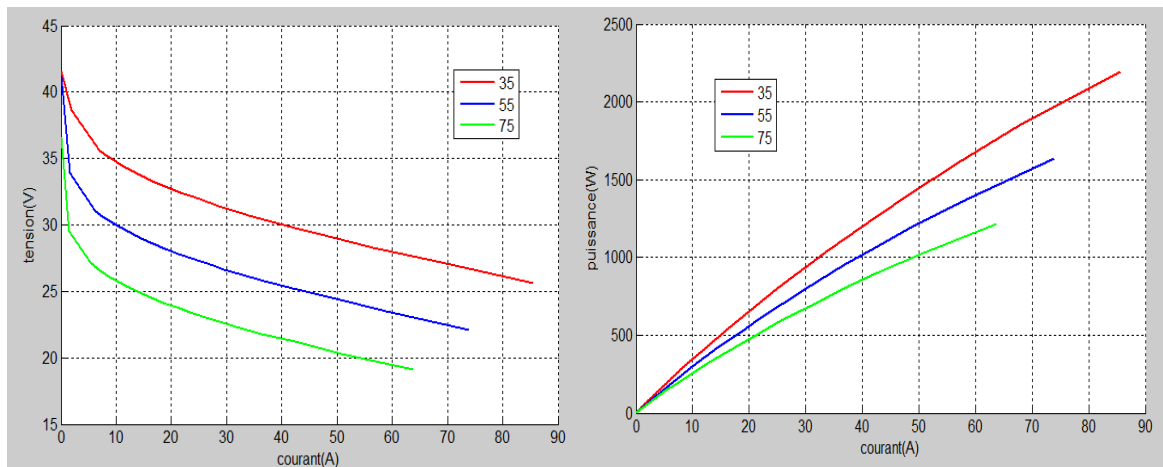
L'effet de la variation de la température est aussi analysé sur la tension et le courant ainsi que sur les caractéristiques V(I) et P(I) (Figures II.11 et II.12). L'augmentation de la température influe positivement sur la tension et le courant de la pile. On note aussi que l'effet de la température est très important.



a. Effet sur la tension

b. Effet sur le courant

Figure II.11. Effet de la température sur la tension et sur le courant



a. Effet sur V(I)

b. Effet sur P(I)

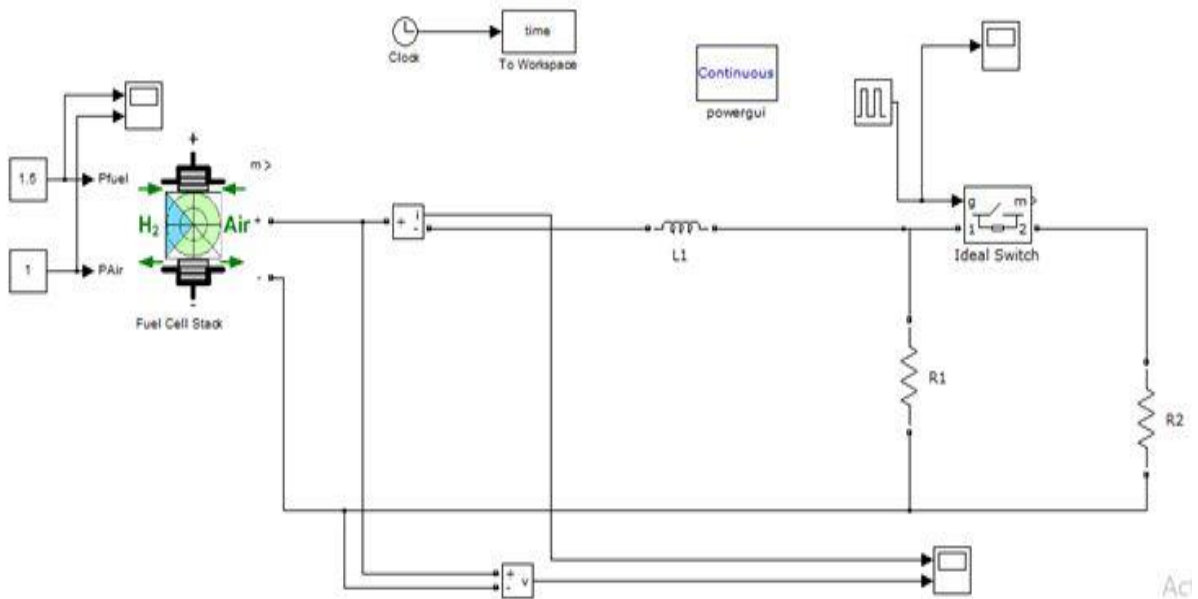
Figure II.12. Effet de la température sur les caractéristiques V(I) et P(I)

II.5. Simulation du fonctionnement d'une pile à combustible de type PEM

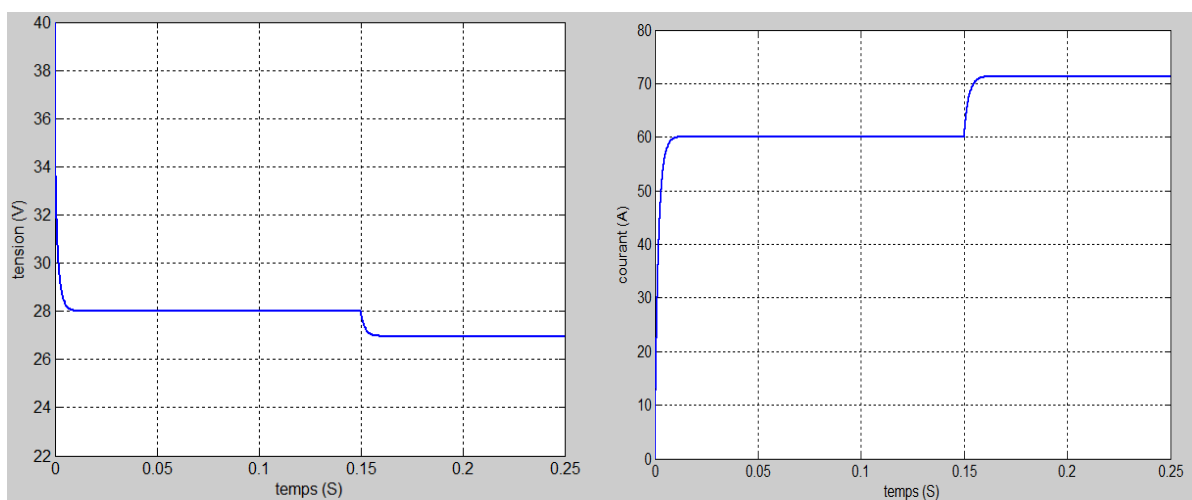
II.5.1. Alimentation d'une charge( RL connectée directement à la pile à combustible)

Le montage est donné en (Figure II.13). 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 ( $T_n = 55^\circ\text{C}$ ,  $V_n = 24.23\text{ V}$ ,  $I_n = 52\text{ A}$ ,  $P_{H_2} = 1.5\text{ Bar}$ ,  $P_{O_2} = 1\text{ Bar}$ ). En premier, la charge ( $R_1 = 0.4659\ \Omega$ ), branchée en parallèle avec ( $L_1 = 1\text{ mH}$ ) est connectée directement à la PAC, puis une deuxième charge ( $R_2 = 2\ \Omega$ ) est déconnectée à  $t = 0.15\text{ s}$  à l'aide d'un interrupteur idéal. Les résultats de simulation sont donnés en ( **Figure II.14**). On voit bien que quand le courant augmente, la tension diminue, 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.



**Figure II.13.** Schémas de montage d'une charge



a. tension de la PAC

b. courant de la PAC

**Figure II.14.** Tension et Courant de la PAC

## II.5.2. Alimentation d'une charge avec un Convertisseur

### II.5.2.1. Convertisseur abaisseur de tension (Buck)

Le convertisseur Buck ou hacheur série permet de convertir une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. Son schéma électrique est donné par la (figure II.15).

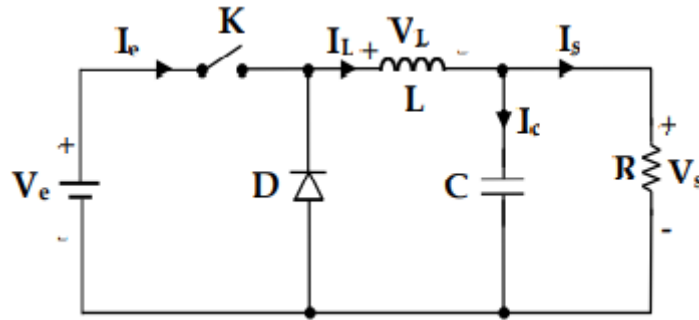


Figure II.15. Schéma d'un convertisseur Buck

### II.5.2.2. Alimentation d'une charge avec un hacheur série (Convertisseur abaisseur de tension (Buck))

Le montage est donné en (Figure II.16). Le convertisseur utilisé est un hacheur série avec un rapport cyclique constant :  $\alpha = 0.6$ . La même charge et les mêmes séquences de conduction que pour le paragraphe II.3.2 sont considérées. Un filtre ( $L1 = 1 \text{ mH}$ ,  $C1 = 1 \text{ mF}$ ) est branché entre la PAC et le convertisseur.

En premier, la charge ( $L2 = 10 \text{ mH}$ ,  $R1 = 6 \Omega$ ) est alimentée à  $t = 0$  à travers le hacheur et son filtre d'entrée. A  $t = 0.15 \text{ s}$ , une deuxième charge ( $R2 = 3 \Omega$ ) est branchée à l'aide d'un interrupteur idéal, (Figure II.16). On voit bien que la tension et le courant de la PAC présentent des pics au début puis ils se stabilisent. La figure II.17 montre le courant et la tension de la PAC et la figure II.18 montre le courant et la tension de la charge. On voit bien que le branchement de  $R2$  provoque une augmentation des courants (courant de la PAC et courant de la Charge) accompagné d'une diminution des tensions (tension de la PAC et tension de la charge). 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.

Enfin, nous voyons bien le comportement abaisseur de tension du convertisseur Buck car la tension de la charge est inférieure à celle de la PAC.

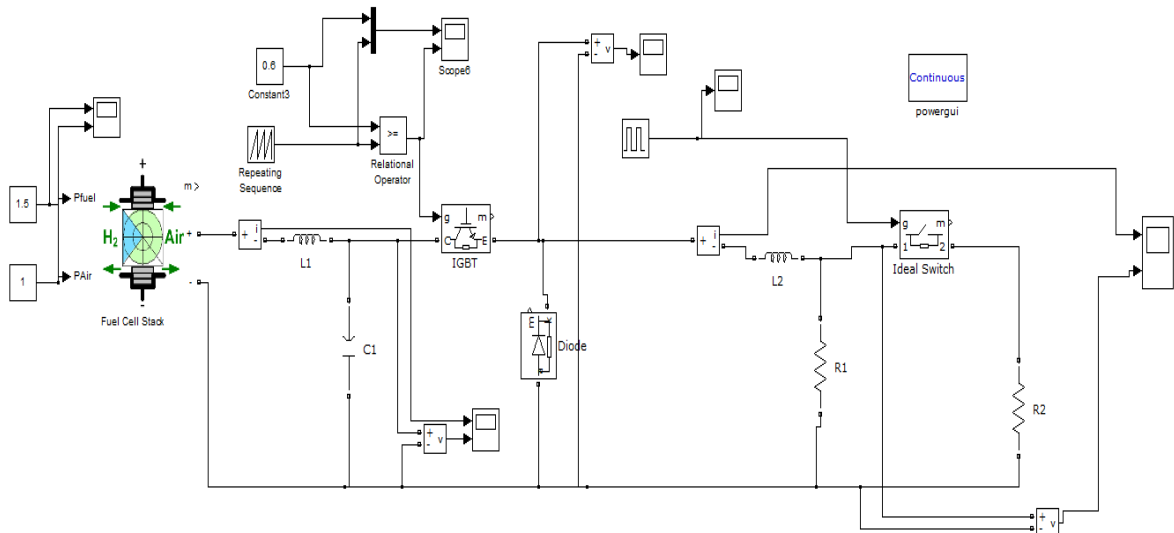
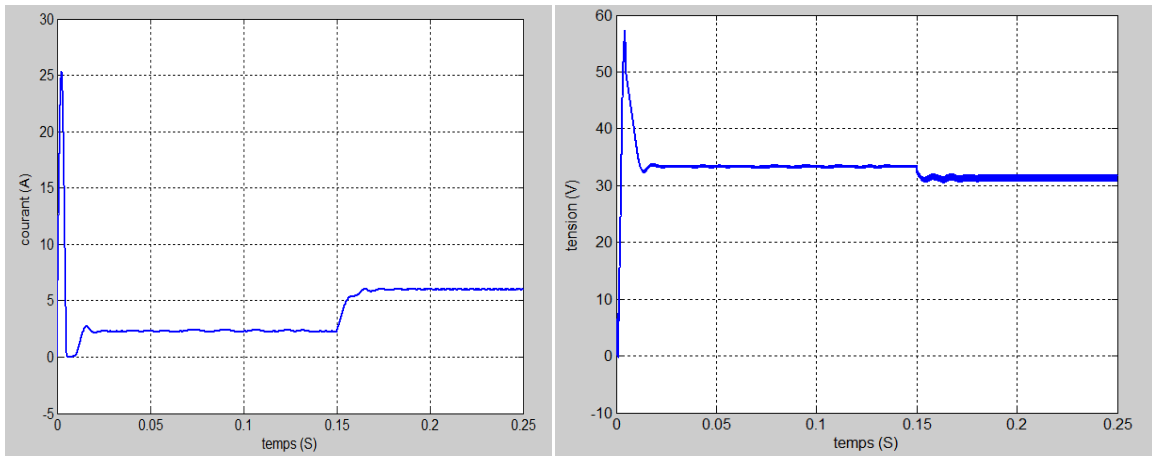


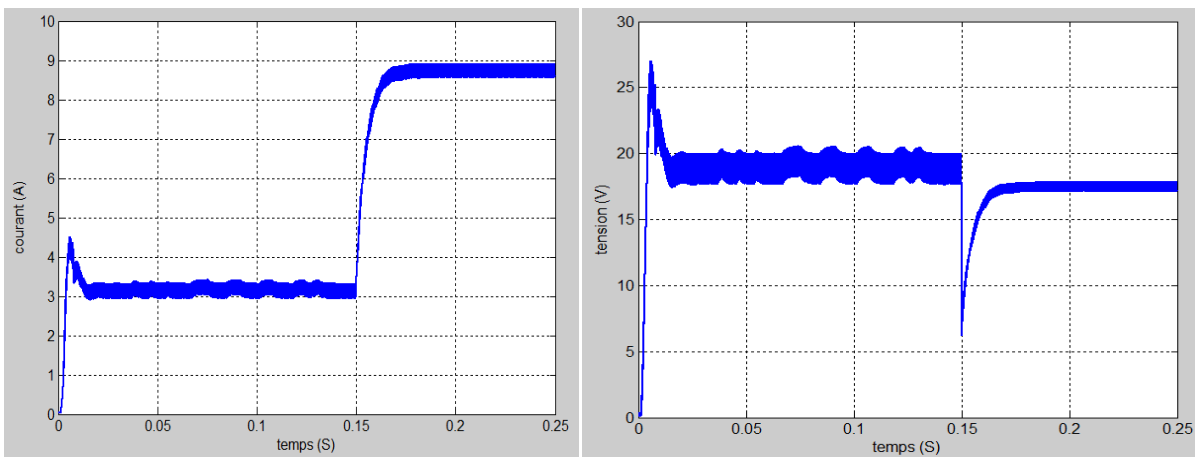
Figure II.16. Schéma de l'alimentation d'une charge avec un hacheur Buck



a. Courant de sortie de la PAC

b. Tension aux bornes de la PAC

Figure II.17. Courant et tension de la PAC



a. Courant dans la charge

b. Tension aux bornes de la charge

Figure II.18. Courant et tension de la charge

### II.5.2.3. Convertisseur élévateur de tension (boost)

Le convertisseur boost ou hacheur parallèle, permet de convertir une tension continue en une autre tension continue de plus grande valeur. Le circuit qui réalise ce convertisseur est montré par la (figure II.19).

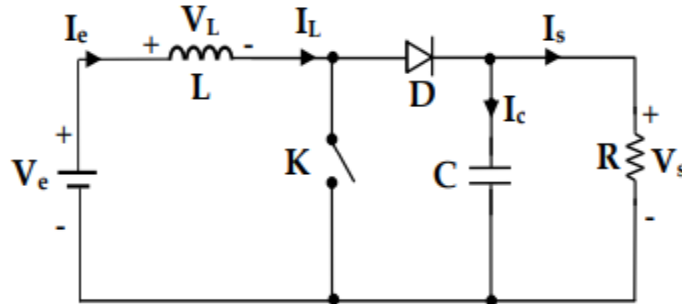


Figure II.19. Schéma d'un convertisseur Boost

### II.5.2.4. Alimentation d'une charge avec un hacheur parallèle (Convertisseur élévateur de tension: Boost)

Le montage est donné en (Figure II.20). Le convertisseur boost fonctionne avec un rapport cyclique constant :  $\alpha = 0.8$ . L'inductance et la capacité de filtrage  $L_1$  et  $C_1$  ont pour valeurs:  $L_1 = 5 \text{ mH}$  et  $C_1 = 10 \text{ mF}$ . Les mêmes séquences de conduction que pour le paragraphe II.3.2 sont considérées. En premier, la charge ( $L_2 = 50 \text{ mH}$  et  $R_1 = 2.5\Omega$ ) est connectée à partir de  $t = 0$ , puis une deuxième charge ( $R_2 = 2.5\Omega$ ) est branchée à  $t = 0.15\text{s}$  à l'aide d'un interrupteur idéal, (Figure II.20).

Les résultats de la tension et du courant de la PAC sont présentés dans la (Figure II.21) tandis que la tension et le courant de la charge sont donnés en (Figure II.22). Comme pour le cas du hacheur série, 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. En pratique ce comportement est inacceptable car en général on veut utiliser la PAC comme une source de tension fixe ne dépendant pas de la charge. Pour fixer la tension de sortie du convertisseur (convertisseur Buck ou bien convertisseur Boost), un fonctionnement en boucle fermée est nécessaire. Ce travail fera l'objet du troisième chapitre.

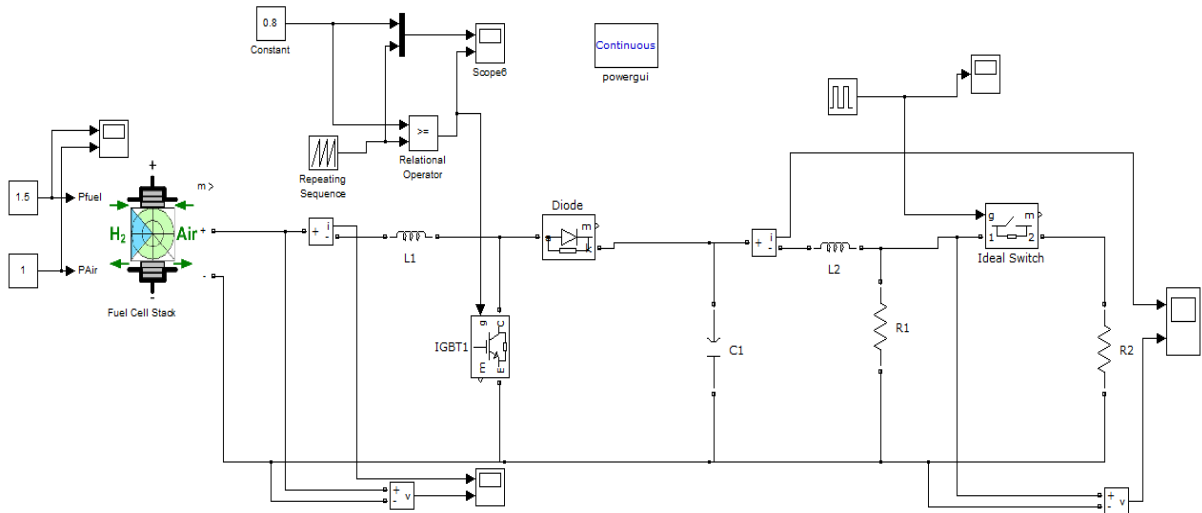
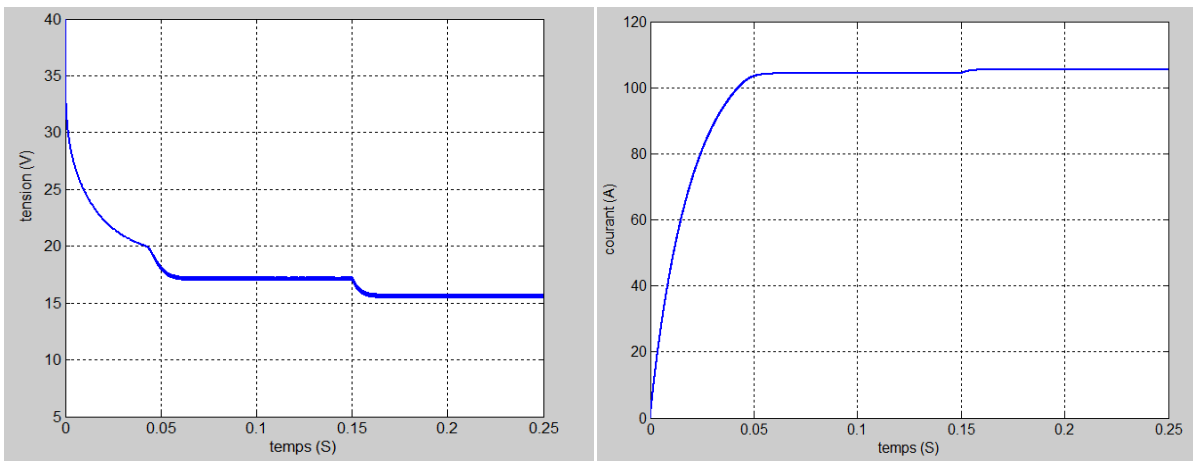


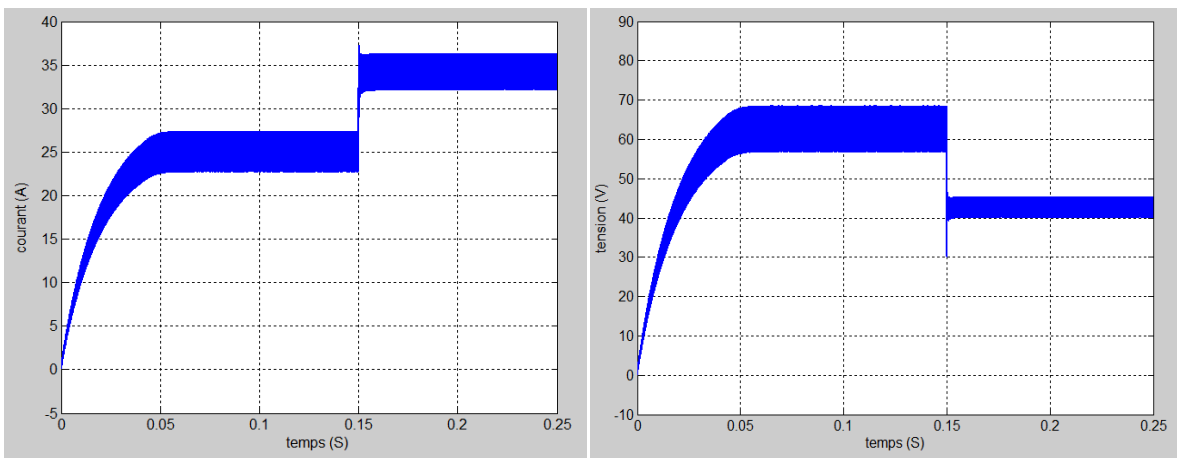
figure II.20. Schéma d'Alimentation d'une charge avec un hacheur boost



a. Tension aux bornes de la PAC

b. Courant de sortie de la PAC

Figure II.21. Courant et tension de la PAC



a. Courant dans la charge

b. Tension aux bornes de la charge

Figure II.22. Courant et tension de la charge



### Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre à la modélisation et à la simulation du fonctionnement de la pile à combustible de type PEM. Après un bref aperç sur son principe de fonctionnement, nous avons donné le modèle mathématique d'Amphlett et al qui permet de simuler le régime dynamique et permet aussi de prendre en considération certains paramètres comme la température et la pression. Nous avons ensuite effectué quelques simulations qui nous ont permis de faire ressortir certaines caractéristiques de la PAC. Parmi ces caractéristiques, nous avons montré qu'une variation de la charge entraîne une variation de la tension de la PAC avec un comportement non linéaire. Pour résoudre ce problème, la PAC est utilisée en association avec un convertisseur électronique de puissance afin de régler la tension aux bornes de la charge en boucle fermée pour obtenir une tension aux bornes de la charge sensiblement constante.

## **Chapitre III :**

### **Réglage de la tension de sortie**

### Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons expliqué brièvement le modèle mathématique et nous avons vu quelques caractéristiques d'un type de pile à combustible (type PEMFC) . Ensuite, nous avons essayé de savoir si c'est une bonne source de tension, nous l'avons donc simulé en utilisant deux types de convertisseurs : Le convertisseur abaisseur de tension (Buck) et le convertisseur élévateur de tension (boost). Nous avons montré par simulation que la tension de sortie diminue avec l'augmentation de la charge, nous ne pouvons pas dire que c'est une bonne source de tension et devons effectuer un réglage de celle-ci pour améliorer ses performances, c'est ce que nous allons traiter dans ce chapitre.

Nous allons commencé par présenter les régulateurs classiques à actions proportionnelle, intégrale et dérivée (PID) en particulier le régulateur PI et le régulateur PID puis nous allons donner quelques méthodes pour les utiliser. Ensuite, nous allons effectuer la simulation le réglage de la tension de sortie du convertisseur DC-DC associé à la PAC en utilisant le régulateur PI et dans les deux cas : Convertisseur Buck et convertisseur Boost.

### III.1. Régulateur à action proportionnelle et intégrale (PI)

L'intérêt de la correction de type intégrale est de permettre une erreur statique nulle. En effet, si le système comporte un intégrateur et se stabilise à un point d'équilibre, tous les signaux sont constants. Or, pour que la sortie d'un intégrateur soit constante, il est nécessaire que son entrée soit nulle. Si l'entrée de l'intégrateur est reliée à l'erreur de régulation, l'effet du terme intégral sera bien d'annuler cette erreur. Notons que l'erreur est annulée même en présence d'une perturbation. Annuler l'erreur en régime permanent est une chose, mais le faire rapidement en est une autre. Il convient donc d'être capable de régler le correcteur de manière adéquate.  $K_i$

Le correcteur à actions proportionnelle et intégrale (PI) est défini par l'équation différentielle suivante :

$$K_I \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + K_P \varepsilon(t) = \frac{du(t)}{dt} \quad (III.1)$$

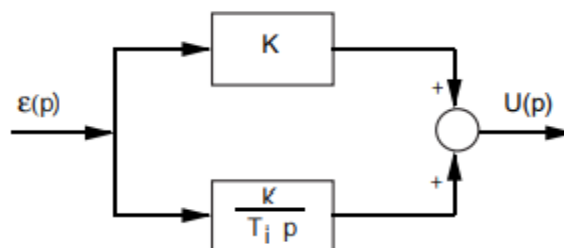
où  $\varepsilon(t)$  est le signal d'entrée du correcteur (ou signal d'erreur) et  $u(t)$  est le signal de sortie du correcteur (ou signal de commande).

On peut naturellement écrire la fonction de transfert de ce correcteur PI comme suit :

$$C(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = Kp + \frac{K_i}{p} = K \left( 1 + \frac{1}{T_i p} \right) = \frac{K}{T_i p} (1 + T_i p) \quad (III.2)$$

Avec :  $K = K_p$  et  $T_i = \frac{K_p}{K_i}$

Ce correcteur (de classe 1) représente l'association de deux actions (P et I) et est représenté par le schéma fonctionnel de la (**Figure III.1**)[31].



**Figure III.1.** Schéma fonctionnel d'un correcteur PI

#### III.1.1. Structure de la commande PI

La boucle de régulation est dotée d'un régulateur proportionnel intégral PI classique, (**Figure III.2**). Le régulateur PI comporte une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité avec laquelle la régulation doit avoir lieu et une action intégrale qui sert à éliminer l'erreur statique entre la grandeur régulée et sa propre consigne [32].

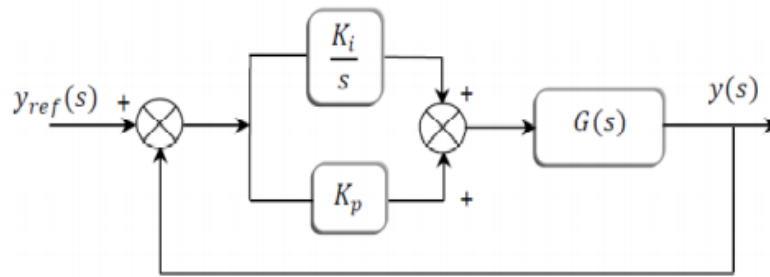


Figure III.2. Schéma de commande utilisant la structure PI

Considérons  $G(s)$  un système de premier ordre qui peut être donné par une des fonctions suivant :

$$\begin{cases} G(s) = \frac{G_1}{s + \tau_1} \\ G(s) = \frac{G_0}{1 + \tau s} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Avec :  $\tau_1 = 1/\tau$

On considère deux méthodes pour déterminer les paramètres  $K_p$  et  $K_i$  du régulateur PI :

**a. La méthode de placement des pôles** [33]

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$F(s) = \frac{G_1 K_p s + G_0 K_i}{s^2 + (\tau_1 + G_1 K_p) s + G_1 K_i} \quad (\text{III.4})$$

Le calcul des paramètres  $K_p$  et  $K_i$  ne peut être fait que par la méthode de placement des pôles.

La fonction de transfert en boucle fermée, peut être mise sous la forme de celle d'un modèle de second ordre standard de l'équation suivante :

$$H(s) = \frac{W_n^2}{s^2 + 2\varepsilon W_n s + W_n^2} \quad (\text{III.5})$$

A partir de l'équation caractéristique, on impose les pôles du système en boucle fermée de sorte que le système soit sous-amorti ( $0.7 \leq \varepsilon < 1$ ),

Les pôles de  $H(s)$  sont :

$$\begin{cases} S_1 = W_n(-\varepsilon + j\sqrt{1 - \varepsilon^2}) = -\frac{1}{\tau_p} + jW_a \\ S_1 = W_n(-\varepsilon - j\sqrt{1 - \varepsilon^2}) = -\frac{1}{\tau_p} - jW_a \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Ou :

$$\tau_p = \frac{1}{W_n} \quad \text{et} \quad W_a = W_n \sqrt{1 - \varepsilon^2}$$

La réponse transitoire est alors donnée par l'oscillation de pseudo-période  $\frac{2\pi}{Wn}$  amortie par une exponentielle de constante de temps.

$$\begin{cases} \tau 1 + G1Kp = 2\varepsilon Wn \\ G1Ki = Wn^2 \end{cases}$$

Les paramètres du régulateur sont alors donnés par :

$$\begin{cases} Kp = \frac{2\varepsilon Wn - \tau 1}{G1} \\ Ki = \frac{Wn^2}{G1} \end{cases} \quad (III.7)$$

### b. La méthode de compensation des pôles

L'apport d'un zéro par le régulateur PI dans la fonction de transfert en boucle fermée peut modifier le régime transitoire du système. Pour remédier à ce problème, la méthode de compensation des pôles est plus adaptée pour le calcul des paramètres  $Kp$  et  $Ki$ . Elle consiste à imposer le zéro du régulateur égal à un pôle de la fonction de transfert du système à commander et une constante du temps  $\tau_{bf}$  répondant aux objectifs fixés.

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$F(s) = \frac{G0Ki \left( \frac{Kp}{Ki}s + 1 \right)}{(\tau s + 1) \left( s + (Kp s + Ki) \frac{G0}{\tau s + 1} \right)} \quad (III.8)$$

D'où,

$$\begin{cases} \left( \left( \frac{Kp}{Ki}s + 1 \right) \right) = (\tau s + 1) \Rightarrow \tau = \frac{Kp}{Ki} \\ F(s) = \frac{G0 Ki}{s + G0 Ki} \Rightarrow \tau_{bf} = \frac{1}{G0 Ki} \end{cases} \quad (III.9)$$

Les paramètres du régulateur sont alors donnés par :

$$\begin{cases} Kp = \frac{1}{G0 \tau_{bf}} \\ Ki = \frac{\tau}{G0 \tau_{bf}} \end{cases} \quad (III.10)$$

## III.2. Régulateur PID (Proportionnel Intégral Dérivé)

C'est un organe de contrôle permettant d'effectuer une régulation en boucle fermée d'un système industriel. C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie, et il permet de

contrôler un grand nombre de procédés. L'erreur observée est la différence entre la consigne et la mesure, et permet 3 actions en fonction de cette erreur :

**Une action Proportionnelle :** L'erreur est multipliée par un gain  $G$ .

**Une action Intégrale :** L'erreur est intégrée sur un intervalle de temps (divisée par l'opérateur  $s$ ), puis divisée par un gain  $T_i$ .

**Une action Dérivée :** l'erreur est dérivée suivant un temps (multipliée par l'opérateur  $s$ ), puis multipliée par un gain  $T_d$ .

Il existe plusieurs architectures possibles pour combiner les 3 effets (série, parallèle ou mixte).

Ce type de correcteur est défini par la fonction de transfert suivante :

$$C(p) = \frac{U(p)}{\xi(p)} = Kp + \frac{K_i}{s} + K_d s = K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (III.11)$$

Le schéma général de la boucle fermée de PID est donné en (Figure III.3).

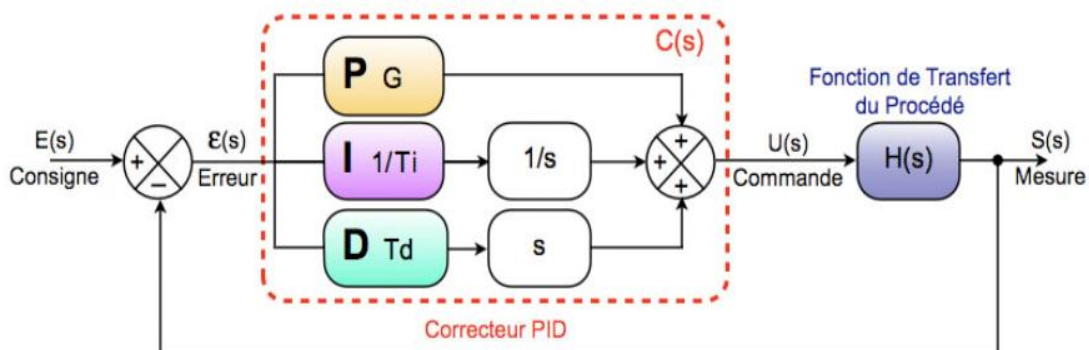


Figure III.3. Correction proportionnelle-intégrale-dérivée

Le réglage d'un PID consiste à déterminer les coefficients  $G$ ,  $T_d$  et  $T_i$  afin d'obtenir une réponse adéquate du procédé et de la régulation. L'objectif est d'être robuste, rapide et précis. Il faut pour cela limiter le ou les éventuels dépassements.

- **La robustesse** est sans doute le paramètre le plus important et délicat. On dit qu'un système est robuste si la régulation fonctionne toujours même si le modèle change un peu. Un régulateur doit être capable d'assurer sa tâche même avec ces changements afin de s'adapter à des usages non prévus/testés (dérive de production, vieillissement mécanique, environnements extrêmes...).

- **La rapidité** du régulateur dépend du temps de montée et du temps d'établissement du régime stationnaire.

- **Le critère de précision** est basé sur l'erreur statique.

**Remarque :** Ces régulateurs classiques sont basés sur des modèles linéaires des systèmes. En pratique la majorité des systèmes sont non linéaires et l'utilisation de ces régulateurs nécessite une linéarisation du modèle du système à régler, ce qui limite un peu les performances de ces systèmes de plus le dimensionnement de leur paramètres reste un précis et nécessite un ajustement par la méthode dite 'essai et erreur'. Dans ce travail la méthode essai et erreur a été utilisée.

### III.3. Réglage PI de la tension de la PAC par utilisation d'un hacheur série (Buck)

Le montage est donné en (**Figure III.4**). Le convertisseur utilisé est un hacheur série. La même charge et les mêmes séquences de conduction que pour le paragraphe II.5.2.2 sont considérées à savoir : La charge ( $L_2 = 10\text{mH}$ ,  $R_1 = 6\Omega$ ) est alimentée à  $t = 0$ . A l'instant  $t = 0.15\text{ s}$ , une deuxième charge ( $R_2 = 3\Omega$ ) est branchée à l'aide d'un interrupteur idéal. Le hacheur PI qui est donné dans la (**Figure III.5**) avec les paramètres : ( $K_p = 0.25\text{ e}^{-3}$  et  $K_i = 1$ ). La valeur de consigne de la tension est :  $V_{\text{réf}} = 15\text{ V}$ .

Les résultats de Simulation sont donnés comme suit :

- la (**Figure III.6**) présente le courant et la tension à la sortie de la PAC (entrée du hacheur Buck).
- La (**Figure III.7**) montre que le courant et la tension de la charge (sortie du hacheur Buck).

On note que la tension aux bornes de la charge suit bien la tension de référence et rejète la perturbation avec un transitoire et un pic donnés.



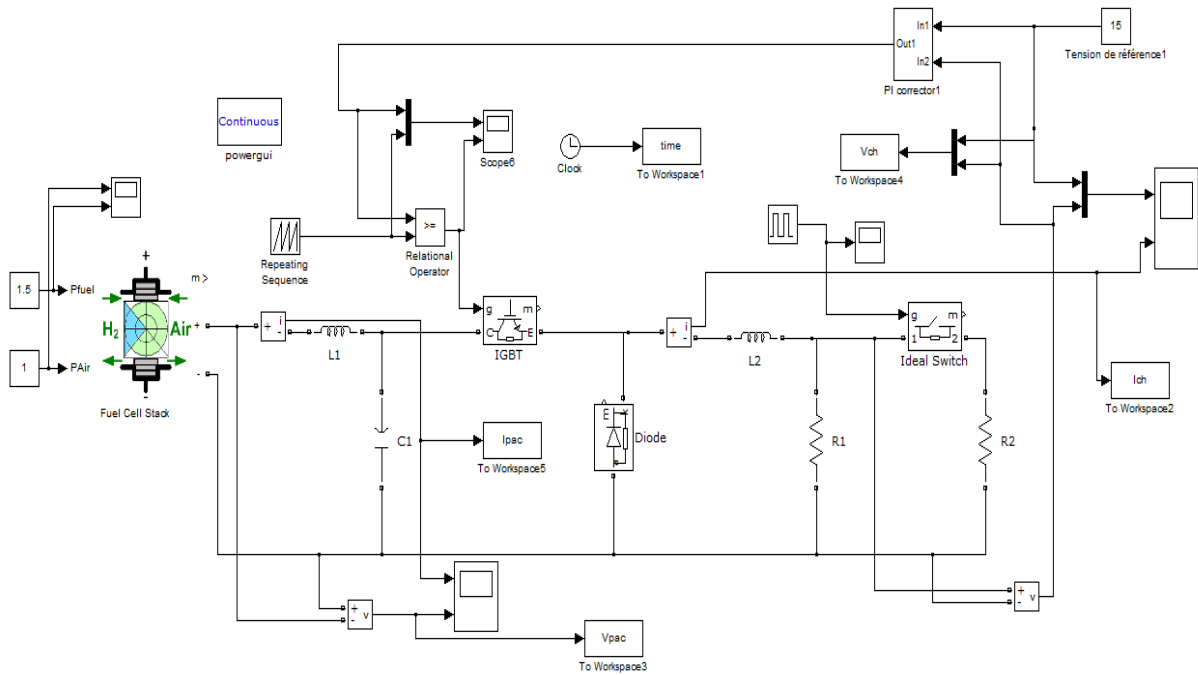


Figure III.4. Schéma d'un réglage PI avec un hacheur série

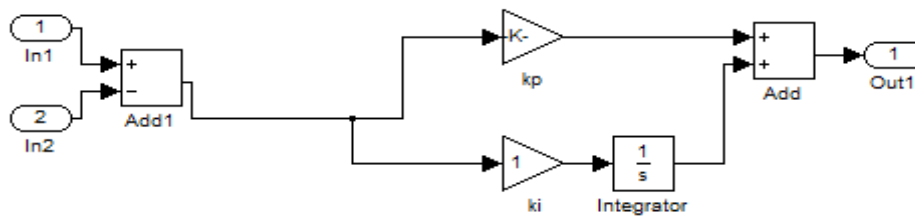
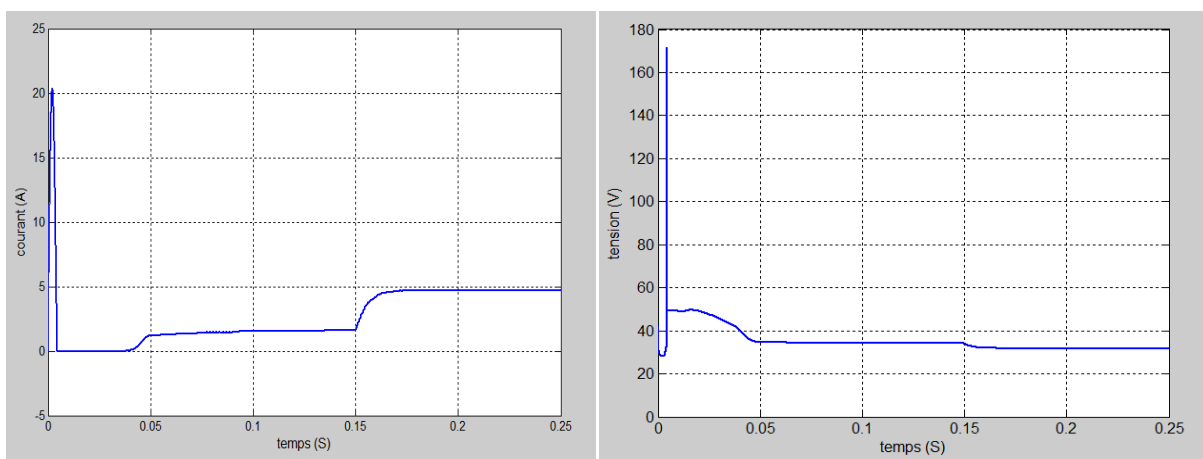


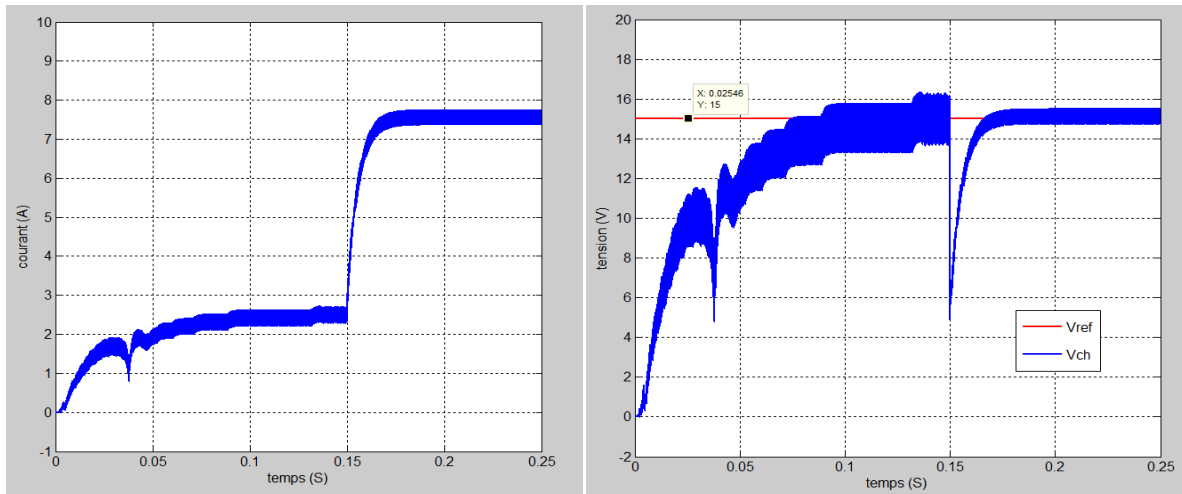
Figure III.5. Modèle Simulink d'un correcteur PI



a. Courant de sortie de la PAC

b. Tension aux bornes de la PAC

Figure III.6. Courant et tension de la PAC

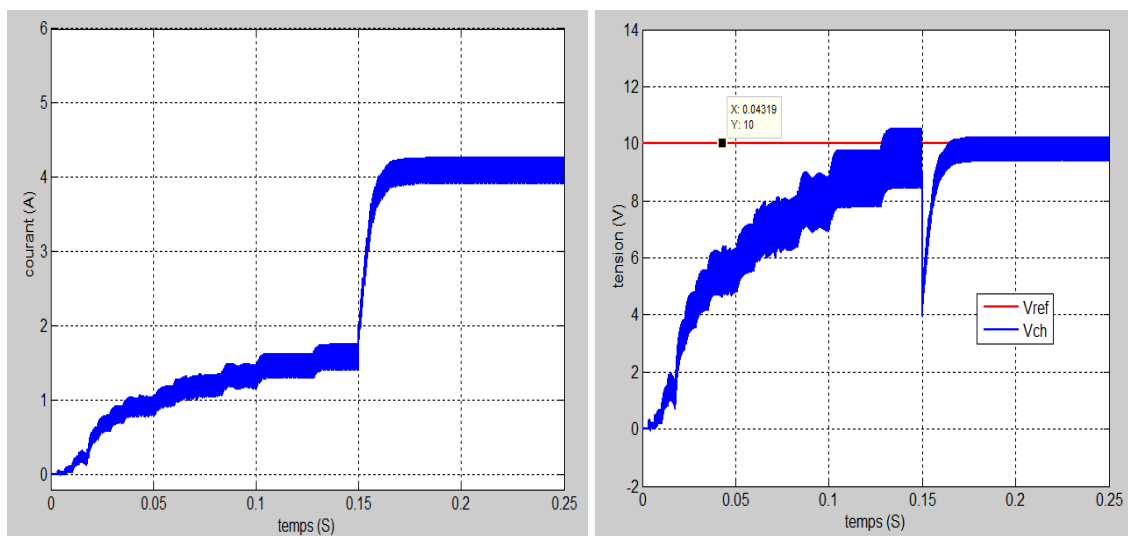


a. Courant dans la charge

b. Tension aux bornes de la charge

**Figure III.7.** Courant et tension de la charge

La figure III.8 montre les memes résultats que la figure III.7 pour une consigne de la tension  $V_{ref} = 10\text{ V}$ . On voit bien que la tension est bien réglée à sa valeur de consigne.



a. Courant dans la charge

b. Tension aux bornes de la charge

**Figure III.8.** Courant et tension de la charge pour  $V_{ref} = 10\text{ V}$

#### III.4. Réglage PI de la tension de la PAC par utilisation d'un hacheur parallèle (Boost)

Le montage est donné en (Figure III.9). Le convertisseur utilisé est un hacheur. La même charge et les mêmes séquences de conduction que pour le paragraphe II.5.2.4 sont considérées, à savoir : La charge ( $L_2 = 50\text{ mH}$  et  $R_1 = 2.5\Omega$ ) est connectée à partir de  $t = 0$ , puis une deuxième charge ( $R_2 = 2.5\Omega$ ) est branchée à  $t = 0.15\text{ s}$  à l'aide d'un interrupteur

idéal. Les paramètres du régulateur PI sont : ( $K_p = 0.5 e^{-3}$  et  $K_i = 0.5$ ). La tension de consigne est :  $V_{réf} = 35$ ).

Les résultats de Simulation sont montrées comme suit :

- La (Figure III.10) présente le courant et la tension de sortie de la PAC.
- La (Figure III.11) montre la tension et le courant de la charge.

On note que la tension aux bornes de la charge suit la tension de référence et rejette la perturbation avec une rapidité donnée et un pic donné.

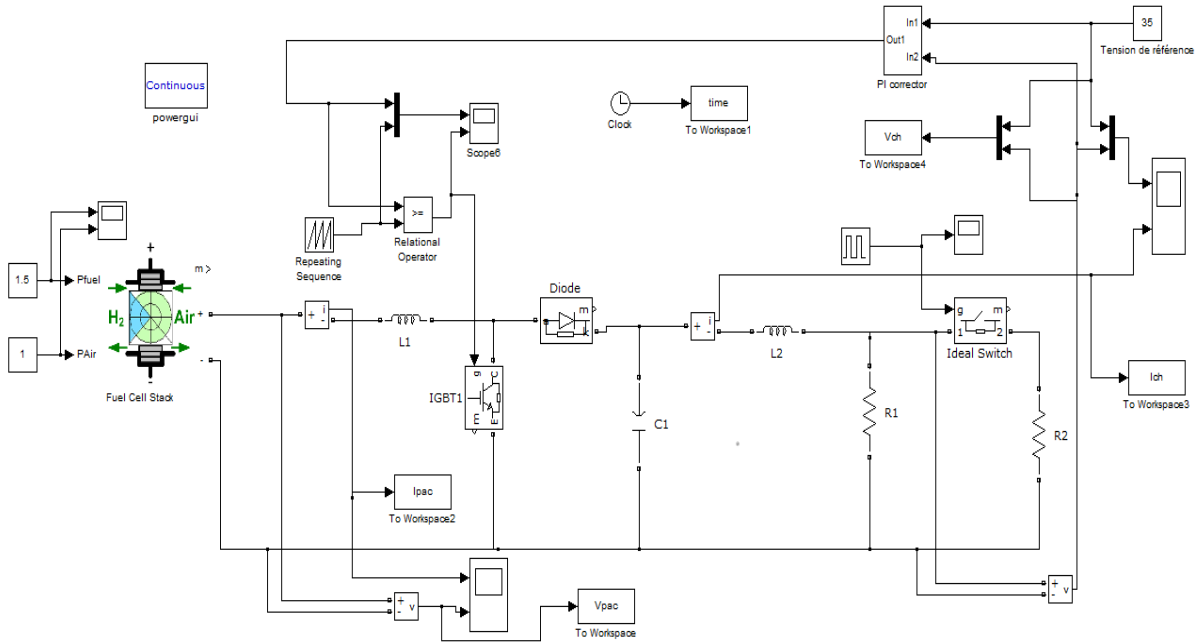
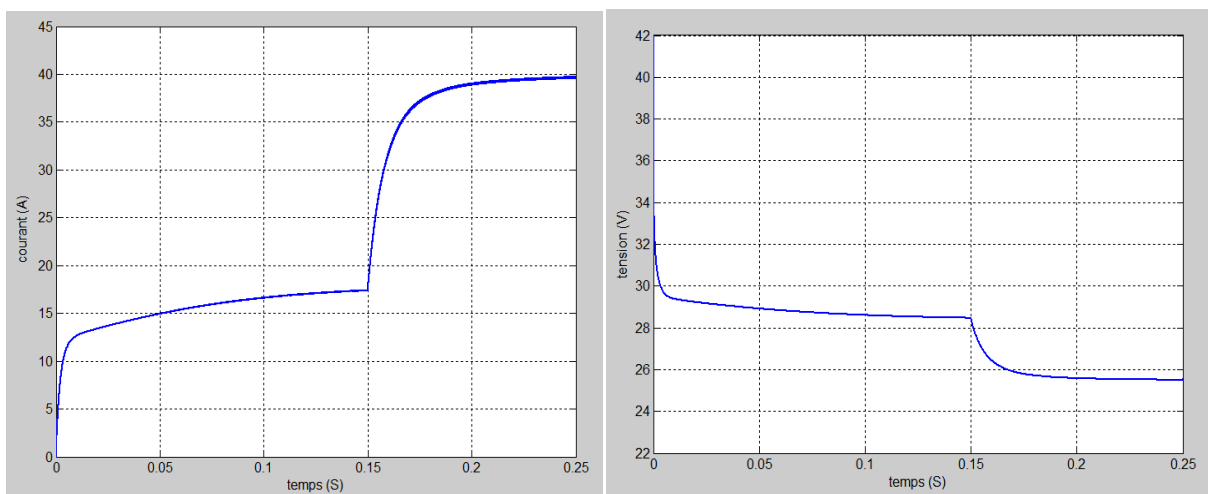


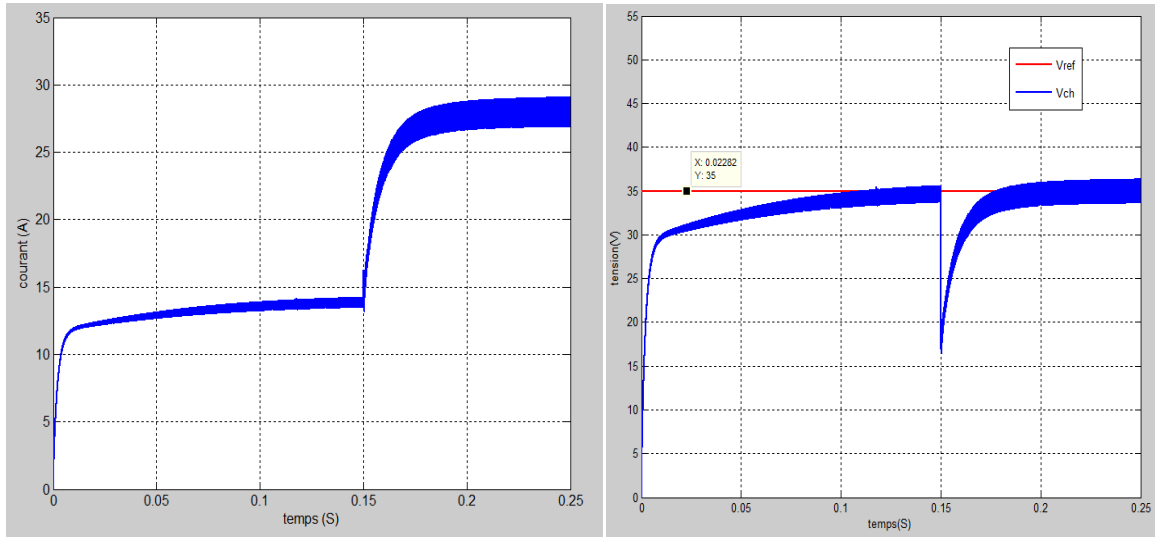
Figure III.9. Schéma d'un réglage PI avec un hacheur parallèle



a. Courant de sortie de la PAC

b. Tension aux bornes de la PAC

Figure III.10. Courant et tension de la PAC

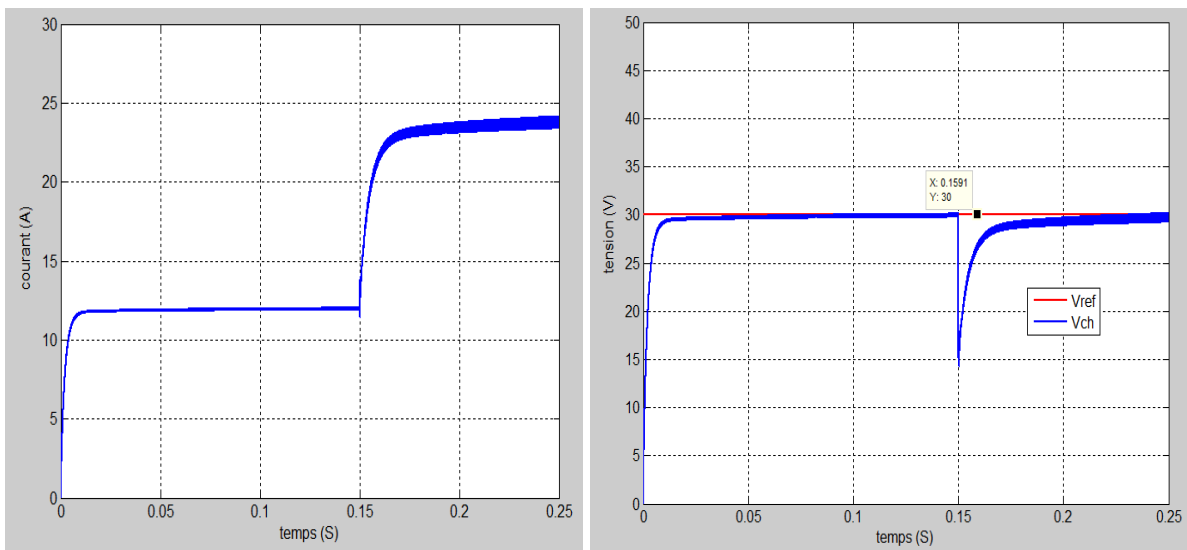


a. Courant dans la charge

b. Tension aux bornes de la charge

**Figure III.11.** Courant et tension de la charge

La figure III.12 montre les memes résultats que la figure III.11 pour une consigne de la tension  $V_{ref} = 30$  V. On voit bien que la tension est bien réglée à sa valeur de consigne.



a. Courant dans la charge

b. Tension aux bornes de la charge

**Figure III.12.** Courant et tension de la charge pour  $V_{ref} = 30$  V

### Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué un réglage PI de la tension de sortie de la PAC à travers un convertisseur DC-DC afin d'obtenir une source de tension de bonne qualité, dans laquelle la tension de sortie est réglable à une valeur de consigne et ne varie pas avec la charge. En premier, nous avons utilisé le hacheur série (abaisseur) afin d'obtenir une tension inférieure ou égale à la tension nominale de la PAC et en second lieu, nous avons utilisé un hacheur parallèle (élevateur) afin d'obtenir une tension supérieure ou égale à la tension nominale de la PAC. Les résultats obtenus montre que pour les deux convertisseurs, la tension suit sa référence et rejete la perturbation avec un certain régime transitoire.

## Conclusion générale

Les piles à combustibles permettent de convertir l'énergie chimique de combustion en énergie électrique grâce à une réaction d'oxydo-réduction. Dans notre travail nous nous sommes intéressés aux piles à membranes protoniques PEMFC.

Nous avons commencé dans le premier chapitre par donner quelques généralités sur les piles à combustibles (description, composition, domaines d'applications, fonctionnement...), ensuite nous avons cerné quelques avantages et inconvénients des piles à combustibles.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté la PEMFC et son principe de fonctionnement, puis nous avons donné et discuté le modèle d'Amphlett et al disponible sur matlab/simulink. Dans 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 Buck (abaisseur de tension) et un convertisseur Boost (élevateur de tension) et nous avons fait ressortir le comportement dynamique de l'ensemble. Nous avons montré que la tension de sortie de la PAC varie fortement avec la charge par un comportement non linéaire. En conclusion, pour obtenir une bonne source de tension un réglage de la tension est nécessaire.

Dans le troisième chapitre, nous avons opté pour un réglage PI de la tension afin d'obtenir une erreur statique nulle. Nous avons commencé par présenter les régulateur PI et PID et quelques méthodes de calcul de leurs paramètres. Nous avons ensuite effectué un réglage PI de la tension pour les deux configurations de convertisseurs DC-DC (buck et boost) pour obtenir une large plage de variation de la tension de sortie : inférieure à la tension nominale de la PAC pour la configuration buck et supérieure à la tension nominale de la PAC pour la configuration boost. Les résultats de simulation sur MATLAB-SIMULINK montrent un bon réglage de la tension aux bornes de la charge pour les deux configurations du hacheur (buck et boost) malgré les variations de la tension de la PAC.

## **Bibliographie**

- [1] **Z. ZHANG (2010)** : Modélisation mécanique des interfaces multi-contacts dans une pile à combustible, thèse de doctorat, Université d'Evry-Val d'Essonne.
- [2] **B. WAHDAME (2006)** : Analyse et optimisation du fonctionnement de piles à Combustible par la méthode des plans d'expériences, thèse de doctorat, Université de technologie de Belfort Montbéliard et de l'Université de France -Comte.
- [3] **S. BELKACEM BOUZIDA (2011)** : Etude des phénomènes des écoulements des gaz dans les canaux dans une pile a combustible de type PEMFC, thèse de magistère, Université El Hadj Lakhdar, Batna.
- [4] **M. RADULESCU (2006)** : Systèmes de cogénération d'électricité et de chaleur avec piles à combustible de type PEMFC ou SOFC et vapore formage externe, thèse de doctorat ; l'Université Henri Poincaré, Nancy 1.
- [5] **E. AGLZIM (2009)** : Caractérisation Par Spectroscopie d'impédance De l'impédance Complexe d'une Pile A Combustible En Charge – Evaluation De l'influence De l'humidité –, thèse de doctorat, Université Henri Poincaré – Nancy1.
- [6] **W. MABROUK (2012)** : Synthèse et caractérisation de nouvelles membranes protoniques. Applications en pile à combustible à membrane échangeuse de protons, thèse de doctorat, Faculté des Sciences de Tunis.
- [7] **E. FRAPPÉ (2012)** : Architecture de convertisseur statique tolérante aux pannes pour générateur pile à combustible modulaire de puissance-traction 30kW, thèse de doctorat, Université Paris-Sud.
- [8] **Y. ABDERRAHIM et R. BELBACHIR (2014)** : Contribution à l'étude des phénomènes ayant lieu dans le catalyseur d'une pile à combustible de type PEMFC, mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen.
- [9] **N. MEDDOUR (2010)** : Simulation numérique du transfert thermique incluant le mode de rayonnement dans une pile à combustible à oxyde solide, thèse de magistère, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [10] **F. BREQUE (2008)** : Modélisation du transport de masse dans une pile à combustible de type pem et étude de l'humidification interne de la pile, thèse de doctorat, Université du Québec A Trois-Rivières.
- [11] **A. BRANGER, M. RICHER et S. ROUSTEL (2007)** : Livre de Microbiochimie et alimentation , Editeur scientifique, Dijon : Éducagri éd., impr. 2007, cop. 2007

- [12] **DANA-MARIA PACLISAN (2013)** : Optimisation par la modélisation de l'expérimentation vibratoire des systèmes pile a combustible pour le transport terrestre, thèse de doctorat, Université de technologie de Belfort-Montbéliard.
- [13] **H. MAHCENE (2012)** : Etude des causes d'augmentation de la température dans une pile à oxyde solide (SOFC): Etude bidimensionnelle du champ de température, thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [14] **A.HADDAD (2009)** : Modélisation dynamique non linéaire de la pile à combustible du type PEM : Application à la régulation de l'humidité dans la membrane électrolytique, thèse de doctorat, Université De Technologie De Belfort-Montbéliard.
- [15] La pile à combustible, Guide technique, [www.edipa.fr](http://www.edipa.fr), Coprotec Colmar.
- [16] **Connaissance des Énergies (2014)**, « Fonctionnement d'une pile SOFC (basique), pilesofc\_zoom.png », <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/pile-acombustible>.
- [17] **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-acombustible-3\\_fig2\\_325675492](https://www.researchgate.net/figure/2-vue-eclatee-et-assemblee-dune-pile-acombustible-3_fig2_325675492).
- [18] **Gaetan DELACHEZE**, «La Pile à Combustible»  
<http://gaetan.delacheze.free.fr/pilecombustible/pile.html>.
- [19] La pile à combustible, Guide technique, [www.edipa.fr](http://www.edipa.fr).
- [20] **P.THOUNTHONG (2005)** : Conception d'une source hybride utilisant une pile a combustible et des supercondensateurs, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine.
- [21] **M. BELATEL \*, F.Z. AISSOUS et F. FERHAT (2012)** : Contribution à l'étude d'une pile à combustible de type PEMFC utilisée pour la production d'énergie électrique verte, Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°1 (2012) 13 – 28.
- [22] **Y.CHATILLON (2013)** : Méthodes électrochimiques pour la caractérisation des piles à combustible de type PEM en empilement, thèse de doctorat, Université De Lorraine.
- [23] **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.
- [24] **J. Larminie and A. Dicks**. «Fuel Cell Systems Explained». John Wiley Sons 2003.
- [25] **D. Yu et S. Yuvarajan**, «Electronic circuit model for proton exchange membrane fuel cells», Journal of Power Sources, vol. 142, pp. 238–242, 2005.



- [26] **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.
- [27] **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.*
- [28] **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.
- [29] **M. Mikkola,** «Experimental studies on polymer electrolyte membrane fuel cell stacks», Master thesis, Helsinki University of Technology, 2000.
- [30] **G. X. Tatsuhiro Okada and M. Meeg,** «Simulation for water management in membranes for polymer electrolyte fuel cells», *Electrochimica Acta*, Vol. 43, No. 14-15, pp. 2141\_2155, 1998.
- [31] **De Larminat P.** «Automatique, Commande des Systèmes linéaires». Hermès,1993.
- [32] **Emmanuel Godol et coll.** «Régulation industrielle, outils de modélisation, méthodes et architectures de commande», Dunod 2014, 2eme EDITION.
- [33] **K.J. A, ström, T. Hägglund, C.C. Hang, W.K. Ho, 1993,** «Automatic Tuning and Adaptation for PID Controllers – a Survey», *Control Eng. Practice*, Vol. 1, No. 4, pp. 699-714.

## Résumé

La pile à combustible (PAC) est connue depuis longtemps comme un convertisseur d'hydrogène en énergie (électrique + thermique) possédant de très bons rendements, les recherches sur cette technologie se développent partout dans le monde de manière considérable. Les raisons sont bien connues: la réponse aux contraintes environnementales, aux problèmes posés par la production centralisée d'électricité, la nécessité d'avoir des alternatives énergétiques et certaines exigences technologiques spécifiques telles que les différentes applications. Il est certain que nous assisterons dans les prochaines décennies à l'émergence de la filière hydrogène dans notre vie quotidienne comme vecteur énergétique. Le choix de la technologie des piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) est implicite vu les performances intéressantes (faible poids, robuste, électrolyte solide, démarrage rapide, etc.). Il est donc important de pousser encore plus loin les efforts de recherche/développement autour de cette technologie pour pouvoir la maîtriser et étendre son application. Ce mémoire présente un réglage (PI) de tension d'une (PEMFC) avec deux convertisseurs qui est permis d'obtenir une source de tension de bonne qualité.

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

PI : Régulateur à action proportionnelle et intégrale.

## Abstract

The fuel cell (PAC) has long been known as a converter of hydrogen into energy (electric + thermal) with very good efficiency, research on this technology is developing considerably all over the world. The reasons are well known: the response to environmental constraints, to the problems posed by centralized electricity production, the need for energy alternatives and certain specific technological requirements such as the different applications. It is certain that in the coming decades we will see the emergence of the hydrogen sector in our daily life as an energy vector. The choice of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) technology is implicit in view of the interesting performances (low weight, robust, solid electrolyte, fast start, etc.). It is therefore important to push research / development efforts around this technology even further in order to be able to master it and extend its application. This memory presents a voltage adjustment (PI) of one (PEMFC) with two converters which is used to obtain a good quality voltage source.

**Keywords:** PEMFC: Proton exchange membrane fuel cell.

PI: Proportional and integral action regulator.

## الملخص

منذ فترة طويلة بأنها محول للهيدروجين إلى طاقة (كهربائية + حرارية) بكفاءة جيدة جدًا ، (PAC) تُعرف خلية الوقود ويتطور البحث في هذه التقنية إلى حد كبير في جميع أنحاء العالم. الأسباب معروفة: الاستجابة للقيود البيئية ، للمشاكل التي يطرحها الإنتاج المركزي للكهرباء ، الحاجة إلى بدائل للطاقة وبعض المتطلبات التكنولوجية المحددة مثل التطبيقات المختلفة. من المؤكد أننا سنرى في العقود القادمة ظهور قطاع الهيدروجين في حياتنا اليومية كناقل للطاقة. إن اختيار تقنية ضمني في ضوء الأداء الممتع (الوزن المنخفض ، القوي ، المنحل (PEMFC) خلية وقود غشاء تبادل البروتونات بالكهرباء الصلب ، البدء السريع ، إلخ). لذلك من المهم دفع جهود البحث / التطوير حول هذه التكنولوجيا إلى أبعد من ذلك مع محولين يستخدمان (PEMFC) لوحد (PI) حتى تتمكن من إتقانها وتوسيع نطاق تطبيقها. تقدم هذه الذاكرة تعديل الجهد للحصول على مصدر جهد عالي الجودة.

**الكلمات المفتاحية:** PEMFC: خلية وقود غشاء التبادل البروتوني

منظم العمل النسبي والمتكامل PI: