



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Republique Algerienne Democratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi – Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de genie électrique



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

En : Génie électrique

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Par : REZAIGUIA Nora

MAHREZ Halima

Sujet

**Etude et Modélisation d'un Système de Stockage
à Hydrogène de l'Energie Electrique**

Présenté et soutenu publiquement, le 22 / 06 /2021, devant le jury composé de :

Mr DJEDDI Abdelghani

MCA

Président

Mr DIB Djalel

Prof

Rapporteur

Mr BOUKADOUM Aziz

MCA

Examineur

Promotion : 2020/2021



REMERCIEMENT

Avant tout, louange à dieu le tout puissant pour nous avoir donné la bonne santé, la volonté et les moyens d'accomplir ce modeste travail.

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, nous ont apporté leurs aides.

Nous citerons tout particulièrement :

- *Notre encadreur professeur **DIB Djalel** , pour avoir accepté d'encadrer ce travail et pour son aide inestimable sur plusieurs plans (documentation, connaissance et orientations).*
- *Nous remercions également Monsieur DJEDDI et Monsieur BOUKADOUM, d'avoir accepté de faire partie du jury.*
- *Tous les enseignants du département génie électrique.*
- *Nous remercions aussi, toutes les personnes qui nous ont fait profiter de leur savoir durant l'élaboration de ce travail*

Enfin, nous tenons à exprimer mon reconnaissance à tous mes amis et collègues pour leur soutien moral



Dédicace

Merci mon dieu (Allah) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et dire « Ya Rahman »

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, ... « A ma mère Fatma »

Je dédie ce travail à mon école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger « A mon père Djamel »

A mon oncle souli

Chère grandmère Medilla

A mon frère Imed, et sa femme Farida et ses enfants Midou, ma chère Arije

A mes adorables sœurs Rawia, Nessrine, Donia, et leurs maris Amar, Bassem, Mohssen, et leurs enfants Louai, ALA Elrahmen, ANES, Rahaf, Mouhamed, et cher à mon cœur Taj eldine

A Toute ma famille et surtout Ikram, Safa, Souhir, Koutouba, Amani, Qui je souhaite une longue et heureuse vie.

A mes très chères amies que je considère comme mes sœurs Noura, Sarsoura, Rahma, Amira, Nour, Wafa, Ayota, Rahma, Maryem, Samira.

A tout les personnes qui ont une place spéciale dans ma vie.

A tous les membres de ma promotion 2021.



Dédicace

Merci mon dieu (Allah) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et dire « Ya Rahman »

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, ... « A ma mère »

A mon soutien dans la vie, au plus haut exemple de don, au secret de mon bonheur et de mon confort, à qui j'ai souhaité être à mes côtés dans cette joie, à ceux qui ne m'ont pas laissé dans mes supplications, dans ma prosternation, dans mes paroles et mon silence dans ma joie incomplète sans lui, que Dieu ait pitié de toi, mon père, et t'accorde la paix

A mon oncle MOUHAMED

A grand-père Boukirra

A mes frères Anoir Et Omran Et Yazid.

A toute ma famille et surtout Aya, Fayrouz, Hada, Sana, Nabihia, Soumia, salim, Saleh, Rida, Qui je souhaite une longue et heureuse vie.

A mes très chères amies que je considère comme mes sœurs chaymouma, Sarsoura, Rahma, Amira, Nour, Wafa, Ayota, Maryem, Sihem, Wahida, khaoula

A toutes les personnes qui ont une place spéciale dans ma vie.

A tous les membres de ma promotion 2021.

Et A tous les Enseignants de spécialité génie électrique

Nomenclature

	Titre
PAC	Pile A Combustible.
AFC	Pile A Combustible Alcaline.
PEMFC	Pile A Combustible A Membrane Echangeuse De Protons.
PAFC	Pile A Combustible A Acide Phosphorique.
SOFC	Pile A Combustible A Oxydes Solides.
MCFC	Pile A Combustible A Carbonates Fondus.
FC	Pile A Combustible.
DMFC	Pile A Combustible A Directe méthanol
EME	Ensemble Membrane Electrolyte
P	Correcteur à action proportionnelle
I	Correcteur à action intégrale
D	Correcteur à action dérivée
PI	Correcteur à actions proportionnelle et intégrale
PID	Correcteur à actions proportionnelle, intégrale et dérivée
E_r	Le potentiel réversible la cellule [V]
J_0, b	Paramètres appelés paramètres de Tafel pour la réduction de oxygène.
m, n	sont des paramètres liés à la diffusion [V, A^{-1}]
E	Tension de circuit ouvert de la cellule [V]
J_a, b, Δ	paramètre du modèle dépendant de la température et de la pression partielle en oxygène [A / m^{-2}]
η_{act}	Polarisation d'activation de l'anode et de la cathode [V]
η_{ohm}	Polarisation ohmique de l'anode et de la cathode [V]
η_{con}	Polarisation de concentration de l'anode et de la cathode [V]
v_s	Tension de l'assemblage (stack) [V]

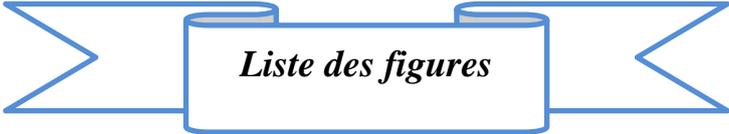
N	Nombre de piles unitaires utilisées en série dans l'assemblage	[-]
A	Surface active de la pile	[cm ²]
l	Epaisseur de la membrane	[μm]
T	Température opératoire absolue de la pile	[K]
P_{H_2}	La pression d'hydrogène	[atm]
P_{O_2}	La pression d'oxygène	[atm]
P_{anode}	Pression partielle de l'hydrogène	[atm]
P_{cath}	Pression partielle de l'oxygène	[atm]
R_c	Résistance équivalente de contact à la conduction des électrons	[ohm]
I_{pac}	Courant de PAC	[A]
r_M	La résistance spécifique de la membran	[ohm.cm]
\dot{C}_{O_2}	Concentrions de Oxygène	
$x_{H_2O}^{sat}$	La fraction molaire de saturation	[-]
R_m	La résistance équivalent de la membrane a la membrane a la conduction des protons	[ohm]
V_{cell}	Représente potentiel d'une cellule	[V]
v_s	Tension de l'assemblage (stack)	[V]
N_C	Nombre de piles unitaires utilisées en série dans l'assemblage	[-]
ξ_1	Coefficients paramétriques pour chaque modèle de pile	[-]
ξ_2	Coefficients paramétriques pour chaque modèle de pile	[-]
ξ_3	Coefficients paramétriques pour chaque modèle de pile	[-]
λ_{H_2O/SO_3^-}	Teneur de l'eau dans la membrane	[-]
J	Densité de courant ou densité de courant permanente	[A/cm ²]
J_{Max}	Densité de courant maximale	[A/cm ²]
E_{OC}	Tension en circuit ouvert	[V]
E_n	Le potentiel de Nernst	[V]
N	Nombre de cellule	[-]
A	Pente de Tafel	[A ⁻¹]
i_0	Courant d'échange	[A ⁻¹]
R	Constante des gaz parfaits	[J/(mol K)]

T	Température de fonctionnement	[K]
z	Le nombre d'électrons	[-]
F	Constante de Faraday	[C/kmol]
α	Coefficient de transfert de charge	[-]
P_{H_2}	Pression partielle d'hydrogène	[atm]
P_{O_2}	Pression partielle d'oxygène	[atm]
ΔG	Le volume de la barrière d'activation	[-]
h	La constante de Planck	[J s]
z	Le nombre d'électrons	[-]
k	Constante d'Oltzmann	[J/K ⁰]
$U_{f_{H_2}}$	Taux de conversion de l'hydrogène	[-]
$U_{f_{O_2}}$	Taux de conversion de l'oxygène	[-]
$V_{lpm(fuel)}$	Débit de carburant	[l/min]
$V_{lpm(air)}$	Débit d'air	[l/min]
P_{Fuel}	Pression absolue de l'alimentation en carburant	[atm]
P_{air}	Pression absolue de l'alimentation en air	[atm]
$x\%$	Le pourcentage d'hydrogène dans le carburant	[%]
$y\%$	Le pourcentage d'oxygène dans l'oxydant	[%]
w	La proportion de vapeur d'eau dans l'oxydant	[%]
η_{nom}	Rendement nominal LHV de la cheminée	[%]
V_{nom}	Tension nominale	[V]
$P_{air_{nom}}$	Pression d'alimentation en air absolue nominale	[Pa]
$V_{lpm(air)_{nom}}$	Débit d'air	[l/min]
I_{nom}	Courant nominal	[A]
T_{nom}	Température de fonctionnement nominale	[K]



Liste de tableau

N°	Titre	Page
Tableau. I.1	Caractéristiques des différentes technologies de stockage qui peuvent être employées pour des systèmes à petites et moyennes échelles.	10
Tableau. I.2	Caractéristiques des différentes technologies de stockage qui peuvent être employées pour des systèmes à grandes échelles.	12
Tableau. I.3	Les différents types de réservoirs gazeux.	17
Tableau. I.4	Les différents groupes de stockage solide.	18
Tableau. II.1	Caractéristique de toutes les piles à combustible.	25
Tableau III .1	Paramètres d'une cellule de la pile (données adaptées).	42
Tableau IV.1	Effets des correcteurs P, I, et D sur les régimes statique et dynamique du système en boucle fermée.	67
Tableau IV.2	Paramètres nominaux de la pile à combustible.	71
Tableau IV.3	Paramètres de variation sinusoïdale de la pile à combustible.	71
Tableau IV.4	Règles du tableau pour l'erreur et de contrôleur.	82



Liste des figures

N°	Titre	Page
Figure I .1	Répartition de la production d'électricité mondiale en 2008.	05
Figure I .2	Répartition de la production d'électricité], d'origine renouvelable, en 2008.	05
Figure I .3	Taux de croissance annuels moyens entre 1998 et 2008, des sources de production électrique mondiale.	05
Figure I .4	Les panneaux photovoltaïques.	06
Figure I .5	L'énergie hydraulique.	06
Figure I .6	Les éoliennes.	07
Figure I .7	La biomasse.	07
Figure I .8	La géothermie.	08
Figure I .9	Densité d'énergie massique pour différents vecteurs d'énergie.	13
Figure I .10	Synthèse de la filière hydrogène .	14
Figure I .11	Les différents modes de production de l'hydrogène.	15
Figure I.12	Capacités volumique et gravimétrique de candidat réel ou potentiel au stockage de l'hydrogène d'après Züttel .	16
Figure II.1	Schéma d'une pile à combustible de type PEMFC.	20
Figure II.2	Schéma du principe élémentaire d'une pile à combustible.	21
Figure II.3	La Réaction d'oxydoréduction.	22
Figure II.4	Réactions produites.	23
Figure II.5	Assemblage d'une cellule élémentaire.	26
Figure II.6	Structure des électrodes (à gauche) et point triple (à droite).	27
Figure II.7	Empilement de cellules (Stack).	28
Figure II.8	Modularité d'un .3 Exemples de conception d'une PAC de 7000W.	29
Figure II.9	Architecture du système PAC complet.	30
Figure II.10	Chargeur de téléphone mobile hybride batterie Li-ion/PEMFC (1.400).	31
Figure III .1	Caractéristique de polarisation théorique du PAC.	34
Figure III .2	Organigramme De Modélisation De Matlab.	42
Figure III .3	caractéristique de polarisation de la pile.	43
Figure III .4	pertes d'activation en fonction de courant.	43

Figure III .5	pertes d'Ohmic en fonction du courant.	44
Figure III .6	pertes (chute) de concentrations en fonction du courant.	44
Figure III .7	Puissance produite par la pile.	45
Figure III .8	Effet du nombre de cellules sur la réponse de la pile.	45
Figure III .9	Effet de la température sur la tension de la pile.	46
Figure III .10	Effet de la température sur la tension de la pile.	46
Figure III .11	Effet du paramètre B sur la réponse de la pile.	47
Figure III .12	Effet de la pression sur la réponse de la pile.	47
Figure III .13	Effet du paramètre J_{MAX} sur la réponse de la pile.	48
Figure III .14	Effet du R_C sur la réponse de la pile.	48
Figure III .15	Polarisation et puissance de la pile.	49
Figure III .16	E-Nernst en fonction de la Température.	49
Figure III .17	Rendement en fonction du courant.	50
Figure III .18	Effet de l'oxygène en fonction de densité de courant.	50
Figure III .19	Effet de l'hydrogène en fonction de densité de courant.	50
Figure III .20	Effet du ξ_1 sur la polarisation.	51
Figure III .21	Effet du ξ_3 sur la polarisation.	51
Figure III .22	Modèle dynamique générale d'un pac sous Matlab simulink.	52
Figure III .23	Modèle dynamique d'une PAC.	52
Figure III .24	la tension E-Nernst.	53
Figure III .25	La concentration oxygène(C_{O_2}).	53
Figure III .26	Pertes d'Activation.	54
Figure III .27	Modèle dynamique de perte ohmique.	54
Figure III .28	Modèle dynamique de perte concentration.	54
Figure III .29	Pertes d'activation de la pile.	55
Figure III .30	Pertes d'Ohmic de la pile.	55
Figure III .31	Pertes de concentrations de la pile.	55
Figure III .32	La puissance de la PEMFC.	56
Figure III .33	Caractéristique de polarisation de la pile.	56
Figure III .34	Effet du nombre de cellules sur la réponse de la pile.	56
Figure III .35	Effet du paramètre B sur la réponse de la pile.	57
Figure III .36	Effet de la pression sur la réponse de la pile.	57
Figure III .37	Effet du paramètre J_{MAX} sur la réponse de la pile.	57

Figure III .38	Effet du R_C sur la réponse de la pile.	58
Figure III .39	Effet de la température sur la tension de la pile.	58
Figure IV.1.	Composition de la fonction du régulateur.	61
Figure IV.2	Correcteur directement en cascade avec les autres éléments.	62
Figure.IV.3	Correction à actions proportionnelle.	63
Figure.IV.4	La réponse indicielle du correcteur P et Entrée et sortie du correcteur P.	63
Figure.IV.5	Correction à actions intégrale.	64
Figure.IV.6	La figure ci dessus donne la réponse indicielle du correcteur Intégrale.	64
Figure.IV.7	Correction à actions dérivée.	65
Figure.IV.8	Réponses à un échelon et à une rampe du correcteur D.	65
Figure.IV.9	Correction à actions proportionnelle, intégrale et dérivée (PID).	66
Figure.IV.10	Réponses indicielle : Entrée et sortie du correcteur à actions proportionnelle, intégrale et dérivée.	66
Figure.IV.11	Un modèle simplifié d'une PAC.	68
Figure.IV.12	PEMFC 45V-dc, 6Kw.	72
Figure.IV.13	Le convertisseur DC/DC.	72
Figure.IV.14	La fonction du Débit de combustible.	72
Figure.IV.15	Débit du combustible.	73
Figure.IV.16	Rendement de la pile.	73
Figure.IV.17	Consommation de pile (Air et Fuel).	73
Figure.IV.18	Utilisation de la O2 et H2.	73
Figure.IV.19	La tension de la pile.	74
Figure.IV.20	Le courant de la pile.	74
Figure.IV.21	Le courant du convertisseur DC /DC.	75
Figure.IV.22	La tension du convertisseur DC /DC.	75
Figure.IV.23	La puissance de la pile.	75
Figure.IV.24	PEM (45V-dc, 6kW).	75
Figure.IV.25	Control de l'hydrogène avec PID.	76
Figure.IV.26	Le convertisseur DC/DC avec PID.	76
Figure.IV.27	Débit de combustible.	76
Figure.IV.28	Le rendement de la pile.	77
Figure.IV.29	Utilisation de la O2 et H2.	77
Figure.IV.30	La tension de la pile.	77
Figure.IV.31	Le courant de la pile.	77

Figure.IV.32	Le courant du convertisseur DC/DC .	78
Figure.IV.33	La tension du convertisseur DC/DC.	78
Figure.IV.34	La tension du convertisseur DC/DC	78
Figure.IV.35	La puissance de la pile.	79
Figure.IV.36	Structure interne d'un régulateur fluu.	80
Figure.IV.37	Interface de la logique floue sous Matlab.	81
Figure.IV.38	Interface de la logique floue.	81
Figure.IV.39	Fonctions d'appartenance de l'entrée (error) et à la sortie .	82
Figure.IV.40	PEMFC (45V-dc, 6kW).	83
Figure.IV.41	Control de fluu.	83
Figure.IV.42	La pile à combustible.	84
Figure.IV.43	La convertisseur DC/DC.	84
Figure.IV.44	La tension de la pile.	84
Figure.IV.45	Le courant de la pile.	85
Figure.IV.46	Le courant de DC/DC du convertisseur.	85
Figure.IV.47	La tension DC /DC en fonction du temps.	85
Figure.IV.48	Débit de carburant dans la pile.	85
Figure.IV.49	Le rendement de la pile.	85
Figure.IV.50	Utilisation de la O2 et H2.	86
Figure .IV.51	Consommation de pile (Air et Fuel).	86
Figure .IV.52	La puissance de la pile.	86
Figure. IV.53	La puissance de la pile.	87
Figure.IV.54	Le courant de la pile.	87
Figure.IV.55	Le rendement de la pile.	87
Figure.IV.56	La tension de la pile.	87
Figure.IV.57	Le courant de DC/DC .	87
Figure.IV.58	La tension de DC/DC	88
Figure.IV.59	Débit de carburant en fonction du temps.	88



Sommaire

<i>Décédasse</i>	
<i>Remercîment</i>	
<i>Nomenclature</i>	
<i>Liste de figure</i>	
<i>Liste de Tableau</i>	
Introduction générale	01
<i>Chapitre I // L'énergie électrique, Production et stockage</i>	
I.1. Introduction	04
I.2. Production d'électricité dans le monde	04
I.3 .L'énergie renouvelable	06
I.3 .1. L'énergie solaire	06
I.3 .2.L'énergie hydraulique	07
I.3 .3. L'énergie éolienne	07
I.3 .4.La biomasse	07
I.3 .5. L'énergie géothermique	07
I.4. stockage de l'énergie électrique	08
I.4.1. Stockage à petites et moyennes échelles	09
I.4.2. Stockage à grandes échelles	11
I.5. L'hydrogène	12
I.5.1. La production d'hydrogène	14
I.5.1.1. Production d'hydrogène à partir des sources fossiles	15
I.5.2. Les principales formes de stockage de l'hydrogène	16
I.5.2.1. Stockage gazeux	16
I.5.2.2. Stockage liquide	17
I.5.2. 3. Stockage solide	17
I.6. Conclusion	18
<i>Chapitre II // Les Piles à Combustibles, Etat de l'art</i>	
II .1.Introduction et problématique	20
II .2.Historique	20
II.3. Principe de fonctionnement d'une pile à combustible	21
II.4. Réaction de l'oxydoréduction	21
II.4.1. La demi-réaction d'oxydation	22
II.4.2. La demi-réaction de réduction	22
II.5. Les principaux composants d'une PAC	22
II.6. Types de piles à combustible	23
II.6. 1.Trois à électrolytes acides (ions H ⁺ migrant de l'anode vers la cathode)	23
II.6. 2. Trois à électrolytes basiques (ions négatifs migrant de la cathode vers l'anode)	24
II.7. Caractéristiques et propriétés de la PEMFC	25
II.7. 1 .Type d'électrolyte	26
II.7. 2.Membranes polymères ioniques	26
II.7.3.Les électrodes	27
II.7.4.Les plaques bipolaires	27
II.8. Description du Stack	28
II.9. Environnement de la pile PEMFC	29
II.10. Avantages et Inconvénient des PEMFC	30
II.10. 1.Avantage	30
II.10. 2.Inconvénients	30

II.11. Applications de la pile PEMFC	31
II.11.1 Applications portables	31
II.11.2. Applications dans le domaine du transport	31
II.11.3. Applications stationnaires	32
II.12. Conclusion	32
<i>Chapitre III // Etude et Modélisation de la pile PEMFC</i>	
III.1.Introduction	34
III.2.Etude de la pile PEMFC	34
III.2.1.Caractéristique principale du PEMFC	34
III.3. Modélisation de la pile PEMFC	35
III.3.1. Modèle de Kim	35
III.3.2. Modèle interne (N. Al Brieux)	36
III.3.3. Modèle d'Amphlett	36
III.3.3.1. Polarisation de la pile à combustible PEMFC	37
III.4. Illustration des caractéristiques par simulation sous Matlab	41
III.4.1.Organigramme générale des caractéristiques	42
III.4.2. Caractéristique de polarisation (tension-courant)	43
III.4.3.Caractéristique polarisation d'activation	43
III.4.4.Caractéristique polarisation Ohmic	44
III.4.5.Caractéristique polarisation de concentration	44
III.4.6.Caractéristique de la puissance du PEMFC	45
III.4.7. Effet du nombre de cellules sur la puissance de sortie	45
III.4.8. Effet de la température sur la polarisation (tension) de sortie	46
III.4.9. Effet de la constante de concentration B sur la polarisation	47
III.4.10. Effet de la pression sur la polarisation	47
III.4.11. Effet de la densité max du courant J_{max} sur la polarisation	48
III.4.12. Effet de la résistance de contacte R_c sur la polarisation	48
III.4.13. caractéristiques hybride polarisation/puissance de la pile	49
III.4.14.caractéristiquesde la tension de Nernst(E_{Nernst})	49
III.4.15.Rendement de la pile	50
III.4.16. Effets de l'Hydrogène et l'oxygène sur le courant de la pile	50
III.4.17.Effets du premier coefficient d'activation ξ_1 sur la polarisation de la pile	51
III.5. Modèle Dynamique générale de la PEMFC	52
III.5.1.la tension E-Nernst	53
III.5.2. La concentration oxygène(C_{O_2})	53
III.5.3. Pertes d'activation	54
III.5.4. Perte Ohmique	54
III.5.5. Perte concentration	54
III.6. Résultats de simulation du Modèle dynamique de la PEMFC	55
III.6.1.Caractéristique polarisation d'activation	55
III.6.2.Caractéristique polarisation d'Ohmic	55
III.6.3.Caractéristique polarisation de concentration	55
III.6.4.Caractéristique de la puissance du PEMFC	56
III.6.5.Caractéristique de polarisation (tension-courant)	56
III.6.6.Effet du nombre de cellules sur la puissance de sortie	56
III.6.7.Effet de la constante de concentration B sur la polarisation	57
III.6.8.Effet de la pression sur la polarisation	57
III.6.9.Effet de la densité max du courant J_{max} sur la polarisation	57
III.6.10.Effet de la résistance de contacte R_c sur la polarisation	58
III.6.11.Effet de la température sur la polarisation (tension) de sortie	58

III.7. CONCLUSION	59
<i>Chapitre IV // Contrôle classique et intelligent du PEMFC</i>	
IV.1.Introduction	61
IV.2.Les Régulateurs Classiques	61
IV.2.1.Régulateurs classiques de base	62
IV.3.Application du Correcteur PID pour le contrôle de la pile PEMFC	67
IV.3.1.Modélisation du PEMFC objet du contrôle	67
IV.3.2.Paramètres d'entrée de la pile	72
IV .3.3. Comportement de la pile PEMFC sans régulateur	72
IV .3.4. Control de la PEMFC avec le régulateur PID	76
IV .3.5. La Logique Floue	79
IV .3.5. 1. Le principe du régulateur floue	79
IV .3.5. 2. Control de la PEMFC avec le régulateur floue	83
IV .4 .Comparaison entre les actions avec et sans régulateur PID/floue dans le contrôle du PEMFC	86
IV .5. Analyse des résultats PID/Floue	88
IV .6 . Conclusion	88
Conclusion générale	89
Référence	90
Résumé	98

Introduction Générale

La production de l'énergie électrique et son exploitation d'une manière optimale pour des raisons économiques, techniques et surtout environnementales présente un intérêt major à la communauté industrielle et la communauté chercheurs scientifique et les exposent devant un défi de grande dimension pour aller chercher des variantes nouvelles avec plus d'options au faveur de l'être humain et ses exigences. La pile à combustible et notamment celle à hydrogène est l'une de ces nouvelles tendances énergétiques.

Dans ces deux dernières décennies, les piles à combustible connaissent un regain d'intérêt à cause des considérations suivantes :

Préserver l'environnement : la réduction des émissions polluantes ou des gaz à effet de serre, particulièrement dans les transports, est un axe de travail des organisations internationales (Protocole de Kyoto sur la réduction des émissions).

Nouvelles technologies de masse : les utilisateurs de téléphonie, d'informatique, d'instrumentation ou de multimédia portables attendent des autonomies de plus en plus importantes sous un encombrement réduit (masse et volume). Malgré les progrès de l'électronique dans les circuits à faible consommation, cette demande en autonomie croissante met les constructeurs de piles et batteries face à un défi.

Se détacher des sources d'énergie conventionnelles : la dépendance croissante envers les hydrocarbures avec toutes les incertitudes politico-économiques (approvisionnement, réserves), l'augmentation des besoins énergétiques (pétrole ou gaz) pour les transports, l'industrie et le résidentiel entraînent un intérêt croissant pour des sources, vecteurs ou convertisseurs d'énergie non conventionnels tels que la pile à combustible qui apparaît comme une solution viable.

Ce travail de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master en électrotechnique industrielle traite la pile à combustible de type PEMFC dont ses différentes partie sont organisées de la manière suivante :

Dans le premier chapitre introductif, c'est présenté la notion générale de l'énergie électrique , son stockage et le combustible hydrogène comme étant un vecteur énergétique très intéressant pour un future tendance dans l'industrie des systèmes électro-énergétique.

Dans le deuxième chapitre, nous décrivons à travers un état de l'art, les caractéristiques physiques, thermiques et électriques des piles à combustible

Dans le troisième chapitre, la pile à combustible à membrane échangeuse de proton PEMC était l'essentiel à présenter par sa modélisation statique et dynamique par des modèles inspirés de la littérature comme celui d'Amphlett qui prend en compte la plupart des paramètres influant les performances de la pile. La simulation de la pile PEMFC sous Matlab à donner des résultats très motivantes dans leur ressemblance à d'autres déjà réalisées et publiés par d'autres auteurs ce qui nous a poussé à aller chercher de plus des résultats meilleurs et nouveaux dans le chapitre quatrième tout appliquant des techniques classique (PID) et nouvelles (Floue) de commande sur la pile PEMFC et voir ainsi sa performance comme étant un source d'énergie prometteuse.

Une étude comparative entres les deux techniques de commande utilisées sont présentées au terme de ce dernier chapitre.

Plusieurs perspectives de recherche restent possibles pour plus de performances des piles à hydrogène sont signalés dans la conclusion générale.

A decorative border resembling a scroll, with a blue outline and grey shaded areas at the top-left and bottom-left corners, framing the text.

Chapitre I :
L'énergie
électrique,
Production et
stockage.

I.1. Introduction

Aujourd'hui, la principale source d'énergie pour la production d'électricité est les combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel et le charbon) et de même pour l'uranium. Cependant, il s'avère que le nombre de ces ressources est limité et non renouvelable et que leur combustion produira des gaz à effet de serre. L'avantage de l'énergie renouvelable est qu'elle peut être utilisée en quantités illimitées et n'émet pas de gaz à effet de serre, à moins que des systèmes de fabrication d'énergie renouvelable ne soient utilisés. Leurs opérations sont un moyen de répondre à la demande énergétique tout en protégeant l'environnement. Les principales sources d'énergie renouvelable sont l'hydroélectricité, l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse, l'énergie géothermique et l'énergie des océans. Afin de stocker l'énergie électrique de manière significative, nous devons d'abord la convertir en une autre forme d'énergie stockable, puis effectuer la conversion inverse lorsque nous voulons à nouveau de l'énergie électrique.

Le présent chapitre traite les notions générales des énergies renouvelables, présente les solutions utilisées dans le stockage de l'électricité et l'option hydrogène comme source nouvelle.

I.2. Production d'électricité dans le monde

En 2008, la part des énergies renouvelables dans la production mondiale d'électricité figure (I.1) et figure (I.2) représentait 18,7% de la production totale d'électricité. Cette part est inférieure à la production de combustibles fossiles (67,6%), mais toujours supérieure à la part de la production d'énergie nucléaire (13,5%). La combustion de déchets dits non renouvelables entraîne une perte de 0,2%.

Des 6 sources composant la production d'électricité renouvelable, l'hydro-électricité est considérée comme la principale avec 86,31% de la production mondiale d'origine renouvelable. La biomasse (solide et liquide) avec le biogaz et les déchets ménagers renouvelables sont en seconde position avec 5,94 % en avance sur la filière éolienne avec 5,73 %, la géothermie avec 1,69 % et le terme des sources est le solaire qui regroupe les centrales photovoltaïques et thermo-solaire avec 0,32 % [1].

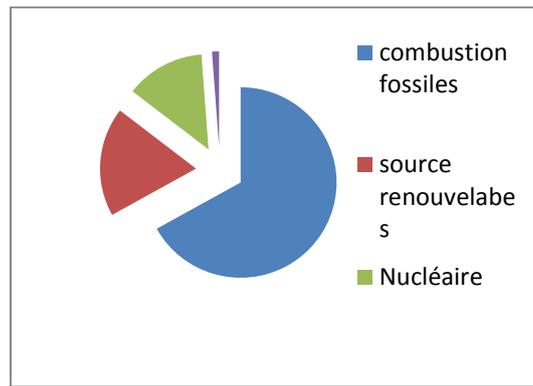


Figure. I.1. Répartition de la production d'électricité mondiale en 2008 [1].

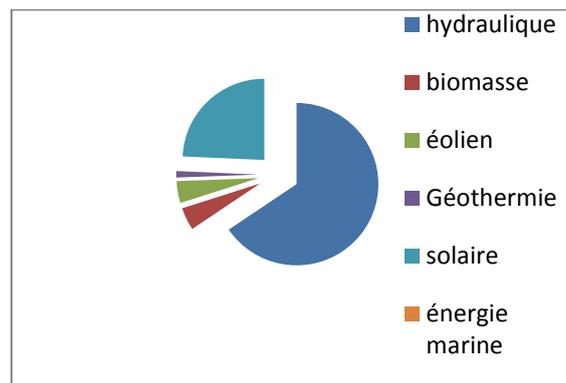


Figure. I.2. Répartition de la production d'électricité Mondiale d'origine renouvelable, en 2008 [1].

Entre 1998 et 2008 Figure (I.3), ce sont les sources de production solaire et éolienne qui ont connu les taux de croissance annuels moyens les plus importants. Ils ont en effet augmenté respectivement de 29,6 et de 29,4 % par an. Seules, les énergies marines ont connu une baisse de ce taux durant cette période. Pour les autres sources, ces valeurs sont comprises entre 1,1 (pour le nucléaire) et 6,6 % (pour la biomasse) [1].

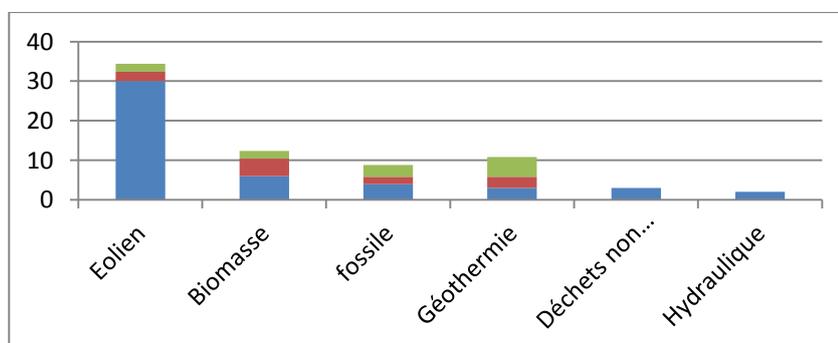


Figure. I.3. Taux de croissance annuelle moyenne entre 1998 et 2008, des sources de production électrique mondiale [1].

I.3 .L'énergie renouvelable

Les énergies renouvelables (*EnR*) en abrégé) sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Elles proviennent de phénomènes naturels cycliques ou constants induits par les [astres](#) : le Soleil surtout, pour la chaleur et la lumière, mais aussi la Lune (marées) et la Terre (géothermie). Leur caractère renouvelable dépend d'une part de la vitesse à laquelle la source est consommée, et d'autre part de la vitesse à laquelle elle se régénère. L'expression « énergie renouvelable » est la forme courte et usuelle des expressions « sources d'énergie renouvelables » ou « énergies d'origine renouvelable » qui sont plus correctes d'un point de vue [physique](#).

I.3 .1. L'énergie solaire

Si elle est presque disponible, l'énergie est dite renouvelable continue. Ses réserves ne diminueront ni ne se reconstitueront rapidement. Ces sources d'énergie sont de l'énergie propre car elles ne produisent presque pas de déchets. Cependant, le principal obstacle au développement des énergies renouvelables est actuellement, ces énergies ne sont pas très efficaces [2].



Figure I.4. Les panneaux photovoltaïques [2].

I.3 .2.L'énergie hydraulique

Il correspond à l'énergie apportée par le mouvement de l'eau, que ce soit sous forme d'énergie cinétique (par mouvement dans une rivière ou marée) ou sous forme d'énergie potentielle (extraite dans les montagnes d'une cascade). Cette énergie ne produit pas ou presque pas de gaz à effet de serre. C'est la source d'énergie renouvelable la plus utilisée aujourd'hui.



Figure I.5.L'énergie hydraulique [3].

I.3 .3. L'énergie éolienne

Il s'agit de l'énergie cinétique lié au vent et donc aux mouvements de l'air. Le vent fait tourner les pâles de l'éolienne. Ce mouvement mécanique est transformé en énergie électrique. Le saviez-vous ? Il existe deux types d'éoliennes : les terrestres dites «on shore » et les éoliennes marines ou « offshore ».



Figure I.6.les éoliennes [4].

I.3 .4.La biomasse

Il s'agit de l'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse. Il fonctionne en brûlant. Tant que la quantité de combustion ne dépasse pas la quantité produite, l'énergie est renouvelable. Le problème le plus important est que la biomasse n'est pas inépuisable. S'il est développé de manière naturelle, il y a peu de menace, mais lorsqu'il s'agit de biomasse cultivée (par exemple, pour les biocarburants), ou lorsque les ressources sont surexploitées (par exemple, la déforestation), la production d'une telle énergie peut être. Causer un lourd fardeau. Impact environnemental [5].



Figure I.7. La biomasse [5].

I .3 .5. L'énergie géothermique

Le gradient de température dans la croûte terrestre est en moyenne de 3 ° C pour 100 mètres. La géothermie vise à étudier et à utiliser le phénomène des variations de température avec la profondeur. L'extraction de cette ressource comprend l'extraction de l'énergie géothermique du sol pour la chauffer ou sa conversion en électricité grâce à des turbines. Cette ressource a l'avantage

de protéger l'environnement et de ne pas être affectée par les conditions météorologiques (disponible en permanence), elle est donc fiable et stable dans le temps. Malheureusement, cette ressource nécessite un forage, les résultats sont parfois aléatoires et le temps d'installation à l'aide de cette fonction est assez



Figure I.8. La géothermie [7].

I.4. Le stockage de l'énergie électrique

L'énergie électrique a plusieurs moyens et formes pour la collecter : électrostatique (condensateurs), électrodynamique (circuits bobinés), magnétique et mécanique (volants d'inertie), électrochimique (batteries) [8].

Les enseignants et les politiciens affirment souvent que «l'électricité ne peut pas être stockée», mais c'est faux [9] [10]. Il est vrai que l'énergie électrique est stockée, rarement directement, souvent indirectement, mais il n'y a pas (ou presque) de limite théorique à l'efficacité énergétique. Puis convertissez-le en une forme intermédiaire parfaitement stockable (gravité, dynamique, potentiel chimique, etc.). Lors de la charge et de la décharge, il présente d'excellents taux de conversion dans les deux sens de conversion, ce qui permet de restaurer la réduction, qui n'est pas limitée par la thermodynamique dans la plupart des cas. En effet, si la conversion n'est ni trop rapide ni trop lente, la perte d'énergie peut être suffisamment faible pour envisager un stockage à forte réversibilité. Au final, le rendement n'est obtenu qu'en répondant à des questions techniques en optimisant la taille. La proportion d'électricité dans la structure énergétique finale mondiale augmente rapidement et devrait continuer de croître au cours des prochaines années [11]. L'électricité semble également être la force motrice fondamentale du développement et présente un grand potentiel pour le développement durable de l'humanité. En fait, il permet la conversion de toutes les ressources majeures, en particulier les énergies renouvelables [12], et il permet également d'accéder à tous les services, en premier lieu les services les plus importants. dans le cas où il est nécessaire de réduire les émissions de gaz à effet de serre, d'améliorer l'indépendance énergétique, et de réduire la consommation de ressources fossiles (...), il s'agit d'un

problème de maximisation du taux de pénétration des sources variables et incertaines dans les principales ressources renouvelables (rayonnement solaire et le vent) et en cas de rendement insuffisant par rapport à la demande, réduire la demande de centrales thermiques de secours (de préférence alimentées par des carburants renouvelables). Ainsi, dans le contexte d'un marché de l'énergie ouvert et donc compétitif, le stockage de l'énergie électrique devrait permettre une augmentation significative de la pénétration des modes de production renouvelables variables (photovoltaïque et éolien) dans le réseau. Il autorise également l'isolement des consommateurs / producteurs en cas de fonctionnement anormal du réseau. L'objectif est d'obtenir une alimentation électrique plus sûre et plus fiable que celle actuelle, et finalement un système d'alimentation électrique plus flexible. Cette ressource pédagogique présente les caractéristiques des systèmes de stockage d'énergie de manière unifiée afin de pouvoir comparer et évaluer des technologies très différentes, quelles que soient les formes d'énergie intermédiaire développées (énergie potentielle, énergie cinétique, électromagnétique, électrochimique ...). La description du système de stockage fait l'objet de la ressource pédagogique «technologie des systèmes de stockage d'énergie électrique» [13].

On trouve deux types de stockage : à moyen terme et à long terme.

I.4.1. Stockage à petites et moyennes échelles

Batteries électrochimiques : Ils sont composés de deux électrodes séparées par un électrolyte des réactions d'oxydation ou de réduction se produisent à leur interface pour générer ou absorber des électrons. Les ions ainsi générés circulent dans l'électrolyte, générant ainsi un courant électrique.

Volants d'inertie : Le système de stockage de l'énergie inertielle (SISE) comprend un volant moteur couplé à un moteur le volant peut fonctionner selon deux modes: moteur ou générateur. L'énergie ici est stockée sous forme d'énergie cinétique sur un disque robuste qui tourne à grande vitesse.

Inductances supraconductrices : Le courant électrique circule dans la bobine supraconductrice (maintenue à la température critique) sans résistance, donc il ne dégage pas de chaleur en raison de l'effet joule. Comme les volants d'inertie, ces systèmes ont la capacité de libérer toute l'énergie stockée (contrairement aux batteries). Ils sont très utiles dans applications nécessitant une charge et une décharge continues (très nombreux cycles) pour un fonctionnement continu. Ils sont désormais commercialisés dans une gamme de puissance assez large (jusqu'à quelques kWh) [14] [15].

Super-conducteurs : L'énergie électrique est stockée dans des champs électriques de ces capacités. Contrairement aux appareils électrochimiques, il ne subit pas de réactions chimiques,

ce qui améliore grandement la recyclabilité. Le principe est similaire à celui d'un condensateur, mais l'isolant qui remplace l'électrode est remplacé par un électrolyte conducteur d'ions. Dans ce dernier, le mouvement des ions se produit le long d'une électrode conductrice de grande surface spécifique. Par conséquent, nous obtenons une meilleure énergie volumétrique que les condensateurs [16].

Air comprimé en bouteille : Ce système stocke l'énergie sous forme d'air comprimé à haute pression dans un réservoir de stockage (généralement un cylindre) en utilisant un compresseur électrique, qui peut devenir un générateur lors de la détente.

Hydrogène : Il existe plusieurs façons de stocker H₂. Les principaux sont le stockage en cuve sous forme gazeuse ou liquide, le stockage sous forme de composés solides (adsorption) et le stockage sous forme d'hydrures (absorption) [16].

Le tableau I-1 donne les principales caractéristiques ces différentes technologies de stockage de l'énergie.

	Inductances supraconductrices	Super-condensateurs	Volants d'inertie	Air comprimé en bouteille	Hydrogène (via une PAC)
Forme d'énergie	Magnétique	Electrostatique	Mécanique	Mécanique	Chimique
Densité énergétique	1à5Wh.kg ⁻¹	5à10Wh.Kg ⁻¹	1à5Wh.kg ⁻¹	81à5Wh.kg ⁻¹ à 200bars	300à 600Wh.kg ⁻¹
Constant de temps	Quelque secondes à 1minute	Quelque secondes à Quelques minute	Quelque minute à 1heure	1heure à Quelques jours	1heure à Quelques jours
Rendement	>90%	>90%	-90%	-50%	30 à 50%
Capacité	Quelques kwh	Quelques kwh	Quelques kwh	Quelques kwh	Quelques wh à Quelques MWh
Cyclabilité	10000-100000	10000-100000	10000-100000	1000-10000	N/A
Cout(€.kwh ⁻¹)	500 à 72 000	50 000à150 000	150à25000	50à80	15
Cout(€.kw ⁻¹)	-300	-300	300à350	400à1200	6000

Tableau. I.1. Caractéristiques des différentes technologies de stockage qui peuvent être employées pour des systèmes à petites et moyennes échelles [14] [15].

I.4.2. Stockage à grandes échelles

Les différentes technologies de stockage qui peuvent être employées pour des systèmes à grandes échelles ainsi que leurs principes sont données ci-dessous [14][15].

Hydraulique gravitaire : Une centrale électrique à accumulation par pompage est une centrale électrique à accumulation par pompage (STEP), où une centrale électrique à accumulation pompée pompe l'eau d'un bassin à un autre à une altitude plus élevée. Au stade de la production, sous l'action de la gravité, l'eau en mouvement s'inverse vers le plan inférieur, puis la puissance de l'eau est convertie en électricité via la centrale électrique.

Air comprimé en caverne : Le surplus d'électricité généré par les centrales électriques de base (centrales nucléaires ou thermiques) ou les énergies renouvelables (énergie éolienne, etc.) pendant les heures creuses est utilisé pour comprimer l'air dans les cavités souterraines à l'aide de turbocompresseurs. L'air est comprimé et stocké dans des grottes profondes, ce qui permet de résister à la pression de l'air (en raison du poids du terrain au-dessus de la grotte). La récupération d'électricité est réalisée en fournissant de l'air comprimé à la turbine à gaz. Il est chauffé dans la chambre de combustion par ajout de gaz naturel puis détendu dans la turbine. La chaleur perdue dans la fumée peut être récupérée pour la cogénération.

Electrochimique à circulation : Leur technologie est plus complexe et plus volumineuse que les batteries traditionnelles. Par exemple, dans les batteries au plomb-acide, l'électricité elle-même est stockée dans la batterie sous forme d'énergie chimique. Dans le cas d'une batterie à circulation, deux électrolytes (liquides conducteurs à base d'ions) sont utilisés, qui ont des potentiels d'oxydo-réduction différents, et sont contenus dans un conteneur séparé à l'extérieur de la batterie. Lorsque de l'énergie est nécessaire, pomper les électrolytes (oxydant et réducteur) dans leurs conteneurs respectifs. Ceux-ci sont séparés par une fine membrane sélective. La différence de potentiel redox entre les deux liquides se traduit par un échange de charges à travers la membrane, générant ainsi un courant qui est absorbé par l'électrode. Lorsque le courant d'une source d'énergie externe est injecté, le processus inverse de cette réaction chimique se produit. Cela permet de régénérer l'électrolyte, qui peut ensuite être renvoyé dans leur récipient.

Thermique à réfractaires et à turbine Une technologie en cours de test dans laquelle l'énergie électrique est stockée ici à travers des matériaux réfractaires (sous forme d'énergie thermique) pour fournir de l'air chaud aux centrales à cycle combiné. du fait du développement des turbines à gaz haute température (au-dessus de 1400 ° C), ce principe est envisageable depuis plusieurs années. En fait, ceux-ci atteignent une efficacité de conversion thermoélectrique de 60% dans le cycle combiné. L'avantage est qu'à ce niveau de température, la densité d'énergie qui peut être stockée est assez importante [15].

Le tableau I-2 donne les principales caractéristiques de ces différentes technologies.

	Hydraulique gravitaire	Air comprimé en caverne	Electrochimique à circulation	Thermique à réfractaires et turbine
Forme d'énergie	Mécanique	Mécanique	chimique	Thermique
Densité énergétique	1kWh.m ⁻³ pour une chute de 360 m	12kWh.m ⁻³ pour une caverne à 100 bars	33kWh.m ⁻³	200 kWh.m ⁻³
Rendement	65 à60%	-50%	70à90%	-60%
capacité	1 à 100GWh	0.1 à 10GWh	10à100MWh	1 à 100GWh
cyclabilité	>10 000	N/A	N/A	N/A
Cout(€.kwh ⁻¹)	70 à 150	50 à 80	100 à 300	50
Cout(€.kwh ⁻¹)	600à1 500	400à 1 200	1 000 à 2 000	350 à 1 000

Tableau. I-2. Caractéristiques des différentes technologies de stockage qui peuvent être employées pour des systèmes à grandes échelles [14] [15].

I.5. L'hydrogène

L'hydrogène est l'élément le plus abondant de l'univers. Il est principalement utilisé raffinage du pétrole, traitement chimique, fabrication d'équipements électroniques, raffinage des métaux et transformation des aliments [17]. Comme on doit produire l'hydrogène, il ne s'agit pas d'une source d'énergie au même titre que le soleil, le vent, l'eau ou le charbon [17]. L'hydrogène est principalement composé de le reformage à la vapeur du méthane est généralement utilisé dans l'industrie pétrolière [17]. Ce processus utiliser des hydrocarbures et générer des émissions. Peut également produire hydrogène utilisant de l'électricité sans émission (comme l'énergie) l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire ou l'énergie nucléaire (généralement par électrolyse) l'électricité divise l'eau en ses composants [17]. Montant de plus gros hydrogène est également produit en tant que sous-produit du processus industrie, comme la fabrication de chlore [17]. Que l'électrolyse ou le recyclage des déchets soient utilisés, la production d'hydrogène n'émet pas de dioxyde de carbone. Les particules ne sont pas non plus du soufre [17].

L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur d'énergie présente plusieurs avantages [17]:

- L'hydrogène peut remplacer les combustibles fossiles.
- La production et l'utilisation d'hydrogène peuvent contribuer à améliorer l'hydrogène qualité de l'air et réduction des émissions de gaz à effet de serre.
- L'hydrogène permet de créer de nouveaux débouchés.

- Dans beaucoup de pays, permet d'améliorer la fiabilité énergétique et l'autonomie.
- Le stockage à long terme de grandes quantités d'énergie est possible.

L'hydrogène peut être stocké sous forme de gaz comprimé ou de liquide, ou il peut être stocké sous forme d'hydrogène composé [17]. Ensuite, il est transporté sous forme de bouteilles de gaz, de remorques tubulaires ou de camions -citernes frigorifiques par canalisations ou routes [17].

Initialement identifié par **Cavendish** en 1776 et son nom proposé en 1787 entre autres par **Lavoisier** [18] et venant du Grec, signifie qui génère l'eau. Ainsi l'hydrogène réagit avec l'oxygène pour former de l'eau :

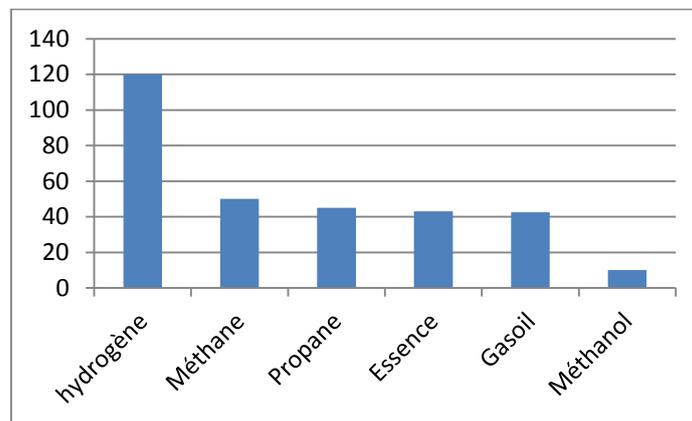
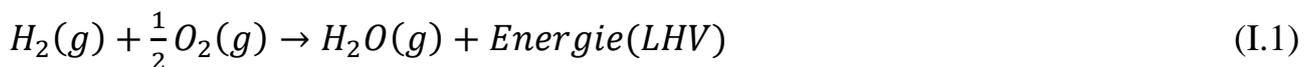


Figure.I.9. Densité d'énergie massique pour différents Vecteurs d'énergie.

L'énergie produite par la combustion de l'hydrogène est plus élevée que tout autre combustible figure (I.4). En comparant le pouvoir calorifique (LHV), le pouvoir calorifique de l'hydrogène Ils sont respectivement 2,4 fois, 2,8 fois et 4 fois supérieures à ceux du méthane, de l'essence et du charbon [19]. L'avantage de consommer de l'hydrogène de cette manière est qu'il ne dégage pas de CO₂. Mais en ce qui concerne sa production, 98% de la production peut maintenant être réalisée en reformant du pétrole ou du gaz naturel, puis une grande quantité de dioxyde de soufre est libérée. L'hydrogène peut en fait être inépuisable, tant que vous savez comment produire des quantités suffisantes d'hydrogène à un coût compétitif, en utilisant idéalement une énergie à faible émission de carbone (énergie nucléaire et renouvelable) pour produire de l'hydrogène. Nous parlons de «technologie de l'hydrogène» comme étant toutes les technologies recherchées pour

produire de l'hydrogène, le stocker et le convertir en énergie, ou simplement toute la chaîne de l'hydrogène. Figure (I.10).

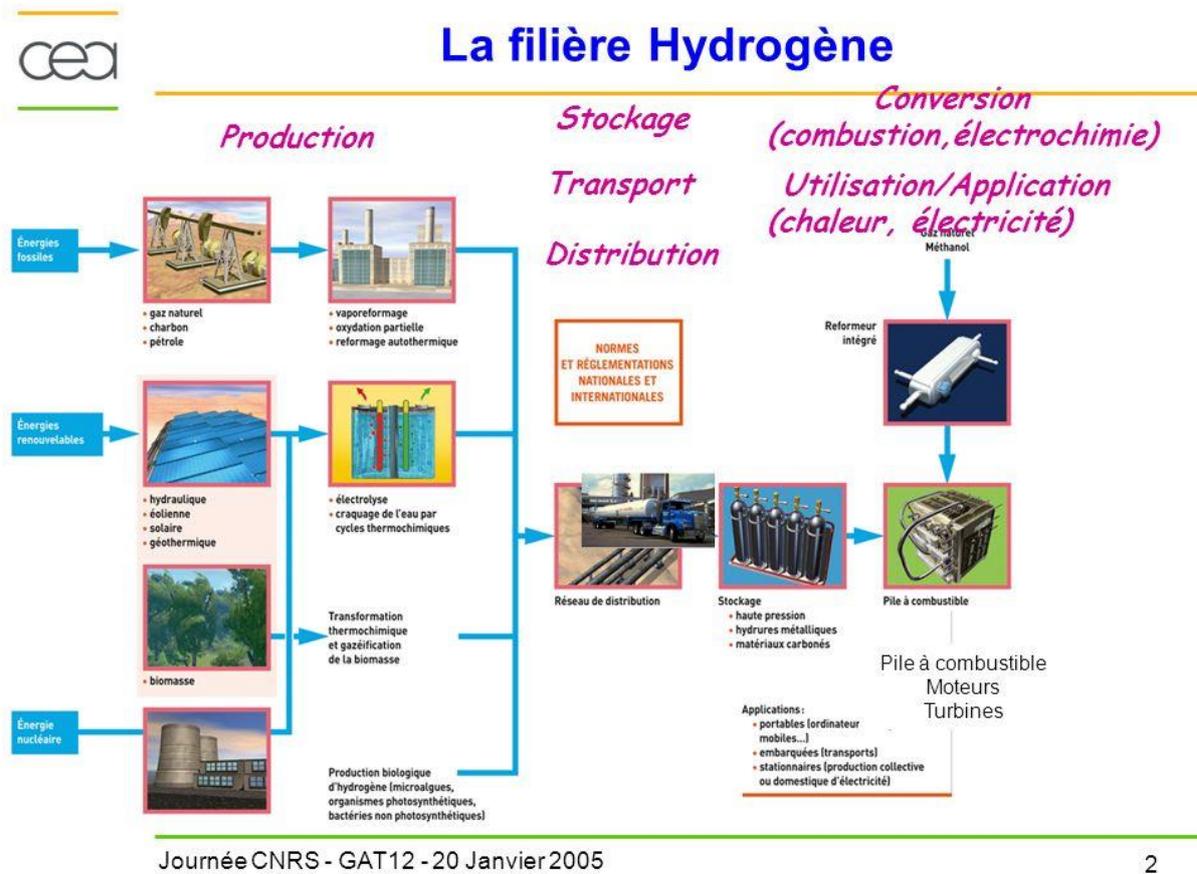


Figure. I.10. Synthèse de la filière hydrogène [20].

I.5.1. La production d'hydrogène

L'hydrogène est abondant à la surface de la terre, mais il n'existe pas à l'état pur. Il est toujours associé à d'autres éléments chimiques dans des molécules telles que l'eau et les hydrocarbures. Les organismes vivants (animaux ou végétaux) sont également composés d'hydrogène. Par conséquent, la biomasse est une autre source potentielle d'hydrogène. Comme montré. Figure(I.12), nous montre différentes manières de produire de l'hydrogène. Divisons ces méthodes en plusieurs catégories [21]:

Extraire l'hydrogène de ces ressources primaires que sont les hydrocarbures, la biomasse ou encore l'eau nécessite un apport en énergie.

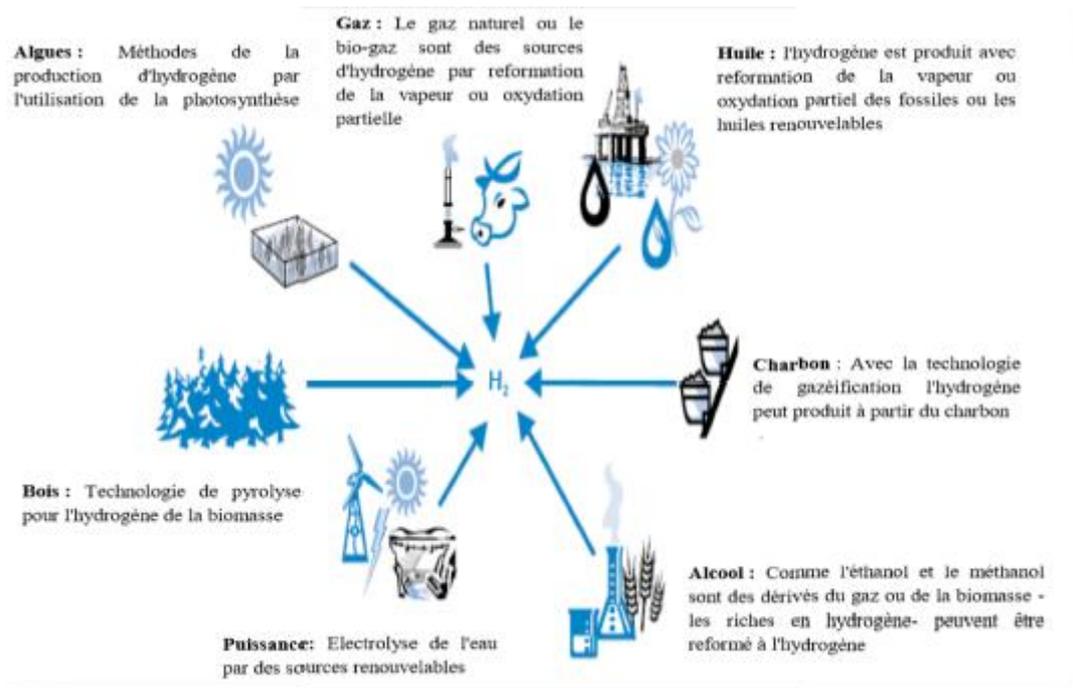


Figure I.11. Les différents modes de production de l'hydrogène [22].

I.5.1.1. Production d'hydrogène à partir des sources fossiles

Actuellement, 95% de l'hydrogène est produit par les hydrocarbures, principalement parce que les hydrocarbures ont été intégrés dans l'industrie pétrolière et que l'industrie pétrolière est l'un des principaux consommateurs d'hydrogène. Bien entendu, d'autres raisons sont leur disponibilité actuelle et leur réactivité chimique et leur coût de production total. Logiquement parlant, la principale matière première est le gaz naturel, qui est principalement composé de méthane (la formule chimique est CH₄, c'est-à-dire qu'un atome de carbone équivaut à 4 atomes d'hydrogène, et chaque comparé à tous les autres hydrocarbures, le rapport carbone est le plus important). D'autres hydrocarbures peuvent également être utilisés.

La principale voie de production des hydrocarbures retenus au stade industriel est la production de gaz de synthèse ou gaz de synthèse, qui est un mélange d'hydrogène et de monoxyde de carbone (H₂ + CO). Actuellement, l'hydrogène est utilisé comme matière première dans les industries chimique et pétrochimique. Par conséquent, sa production est généralement associée à d'autres appareils existants pour minimiser les coûts d'énergie et de matériaux. par exemple, dans la production d'ammoniac, le dioxyde de carbone de l'étape de pré-production d'hydrogène est utilisé pour produire de l'urée à partir d'ammoniac.

I.5.2. Les principales formes de stockage de l'hydrogène [23] :

Il existe trois grandes familles de stockage d'hydrogène: les voies solide, liquide et gazeuse. Züttel [24] a donné un tableau. 1-11, en fonction de sa capacité d'analyse de volume et de poids, propose des solutions techniques. Bleu Le transparent est utilisé pour le stockage de gaz et le rouge est utilisé pour le stockage de liquide (basse température). Le stockage à l'état solide utilise plusieurs couleurs pour distinguer les hydrures conventionnels verts des hydrures complexes orange. L'objectif est d'obtenir des méthodes de stockage mobiles ou fixes efficaces à court et long terme. En raison du grand nombre de restrictions à respecter, le problème est complexe: capacité de gravité, capacité volumique, coût, durée de vie, pression de refoulement maximale / minimale, temps de remplissage, température de fonctionnement, volume de fuite. . .

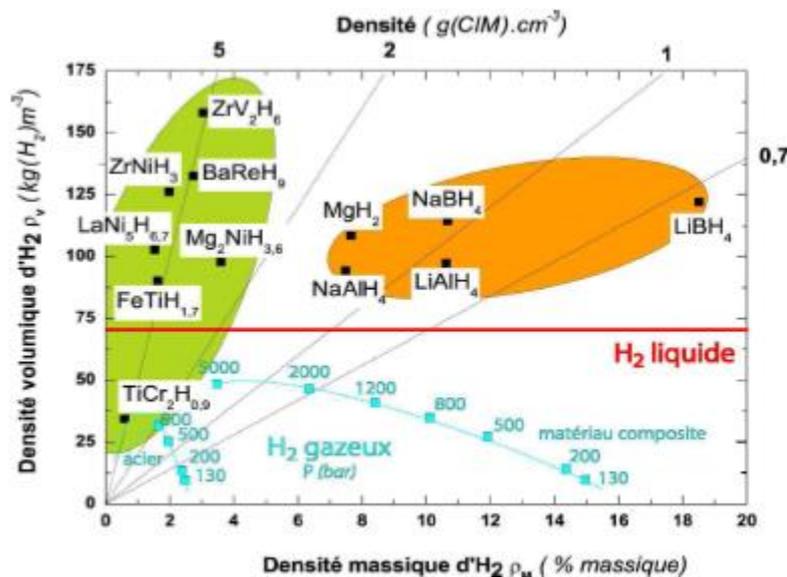


Figure I-12. Capacités volumique et gravimétrique de candidat réel ou Potentiel au stockage de l'hydrogène [25], d'après Züttel [26].

I.5.2.1. Stockage gazeux

Le chemin du gaz est la technologie de stockage la plus simple et la plus largement utilisée. L'hydrogène est contenu dans un réservoir sous pression. Plus la pression est élevée, plus l'hydrogène est stocké. Le réservoir de stockage actuellement développé fonctionne à une pression maximale (environ 480 bars) de 300-350 bars (30-35 MPa). Les travaux actuels incluent la création de réservoirs de stockage de gaz en dessous de 700bar pour augmenter la capacité, ce qui est le principal inconvénient de cette technologie.

Pour leur conception, les réservoirs gazeux sont regroupés sous 4 types :

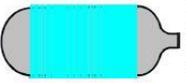
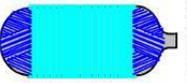
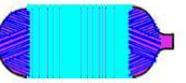
Type	I	II	III	IV
Schéma				
Réalisation				

Tableau.I.3. Les différents types de réservoirs gazeux [27] [28].

Pour chaque type de réservoir de stockage, le choix de la coque extérieure (garniture) en contact avec l'hydrogène est critique. Dans le cas du type I, la contrainte mécanique est directement absorbée par la traversée. Par conséquent, il est préférable d'utiliser un matériau (acier) avec une limite d'élasticité plus élevée. En revanche, dans le cas des réservoirs de stockage de type III et de type IV, le revêtement sert de barrière à l'hydrogène. Ensuite, les matériaux à faible perméabilité à l'hydrogène sont préférés (pour le type III, l'aluminium est utilisé). La largeur, le motif, l'angle d'enroulement et le nombre de passes de fibre sont l'un des critères d'optimisation de l'enroulement filamentaire.

I.5.2.2. Stockage liquide

Afin de stocker l'hydrogène sous forme liquide, il est refroidi à 20 K (-253 ° C). Cette technologie est maîtrisée, notamment pour les applications spatiales ou le stockage fixe (hôpitaux, stations-service). Le volume est bien sûr important, mais la très basse température reste le principal problème de cette technologie. De plus, l'énergie de liquéfaction est élevée. Cette technologie est plus adaptée aux stockages fixes (station -service Air-Liquide, Linde cf) qui permettent d'obtenir une excellente isolation thermique. En revanche, dans les applications mobiles à isolation thermique limitée, le chauffage du réservoir de stockage provoquera l'évaporation de l'hydrogène, puis l'hydrogène doit être libéré pour limiter la pression interne dans le réservoir de stockage. De cette manière, l'utilisation de véhicules hybrides (essence / hydrogène) peut charger longtemps de l'hydrogène.

I.5.2. 3. Stockage solide

Le stockage solide est exploité dans des conditions de température et de pression standard. Il existe de nombreuses formes de stockage à semi-conducteurs. Étiquette de tableau. (1.2). Quatre plats principaux sont proposés.

Stockage par adsorption -charbon actif -nanotubes -nano fibre de graphite -MOFs , Zéolites, ..	Hydrures chimiques (réactif avec l'eau) -NaH encapsulé -LiH et MgH ₂ CaH ₂ , LiAlH ₄ ,...
Hydrures réversibles -Alliages et composés intermétalliques - Nanocristaux - Hydrures complexes	Hydrures chimiques (thermique) -Borozane d'ammoniac - Hydrure d'aluminium

Tableau. 1.4. Les différents groupes de stockage solide [29].

I.6. Conclusion

Une présentation générale de la production d'électricité à partir des énergies renouvelables et leur stockage et de la filière hydrogène (production, stockage et conversion pour des fins énergétiques) forment l'essentiel présenté dans ce premier chapitre .Comme les ressources fossiles (actuellement elles sont la source principale de production d'électricité dans le monde) sont limitées, non renouvelables, et leurs combustions engendrent des gaz à effet de serre. Pour remédier à ces problèmes, l'importance donnée aux énergies renouvelables, pour produire de l'électricité, est toujours en augmentation notamment dans les filières solaire et éolienne. Ces sources étant généralement intermittentes, pour cela un système de stockage « propre » était nécessaire. Depuis plusieurs années, l'hydrogène semble être le vecteur énergétique de l'avenir. Pour convertir l'hydrogène en électricité il nécessite un convertisseur électrochimique appelé pile à combustible.

A decorative border resembling a rolled-up scroll, with a blue outline and grey shaded areas at the top-left and bottom-left corners.

Chapitre II :
Les Piles à
Combustible, Etat
de L'art

II .1.Introduction et problématique

Une pile à combustible est un dispositif électrochimique qui peut convertir l'énergie interne du combustible en énergie électrique en libérant de la chaleur. Lorsque Henry David a clarifié le principe de l'électrolyse inverse en 1802, il a souligné la possibilité de l'électricité et de la chaleur produites par la réaction chimique entre l'oxygène et l'hydrogène. Puis William Grove a utilisé ce processus pour l'expérimenter en 1839, utilisant pour la première fois des piles à combustible pour produire de l'électricité, de la chaleur et de l'eau de réaction. Depuis sa découverte, plusieurs types de piles à combustible ont été inventé en fonction de l'électrolyte utilisé, avec des températures de fonctionnement allant de quelques dizaines de degrés à plus de 1000 degrés Celsius traduisant la contrainte principale à la mauvaise exploitation et gestion de ce type de pile ce qui nécessite ainsi un réflexion plus avancée pour réduire cette contrainte à une température plus basse à travers des nouveaux types de combustibles et d'électrolytes.

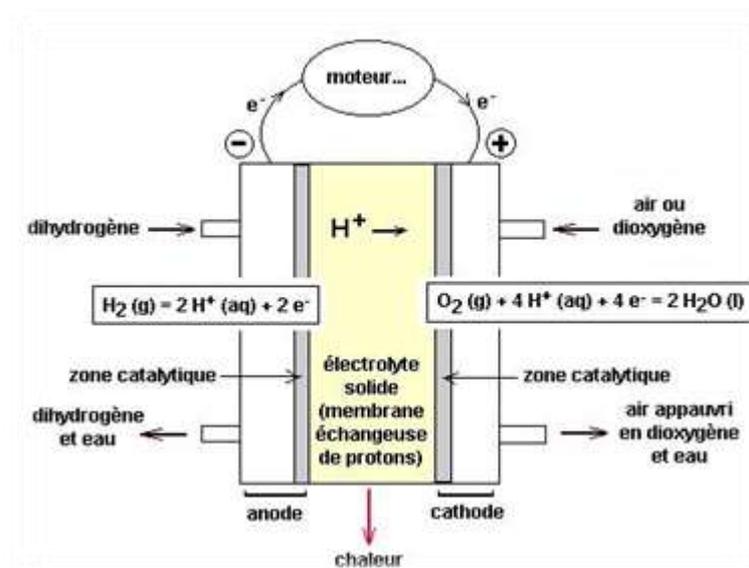


Figure II.1. Schéma d'une pile à combustible de type PEMFC [30].

II .2.Historique

Le britannique sir Henry David (Henri David) a découvert cette pile à combustible en 1802. Il a prouvé conceptuellement la possibilité de produire de l'électricité par électrolyse inversée de l'eau. En 1839, William Grove [31] décrit la première pile à combustible. Elle fonctionne à l'hydrogène et à l'oxygène à basse température et possède des électrodes en platine et de l'acide sulfurique ou autre comme électrolyte. Depuis 1855, les gens ont développé de nouveaux concepts utilisant des électrolytes fondus à haute température. Bien que l'industrie de l'hydrogène ait un potentiel indéniable, les résultats ne sont pas satisfaisants, et en 1939, les résultats des

recherches du premier siècle étaient assez pessimistes. Après 1945, trois groupes de recherche (aux États-Unis, en Allemagne et en Union soviétique) ont repris leurs recherches sur les principaux types de générateurs, apportant les améliorations technologiques nécessaires au développement de «l'industrie Au début des années 1960, lorsque le National Aeronautique and Space Administration (NASA) a cherché des solutions plus économiques en énergie, les piles à combustible ont renouvelé son intérêt. Ces recherches ont conduit la technologie des piles à combustible au développement de la première membrane échangeuse de protons.

II.3. Principe de fonctionnement d'une pile à combustible

Les piles à combustible peuvent directement convertir l'énergie chimique en énergie électrique, de plus, contrairement aux batteries traditionnelles, le carburant est fourni en continu, par conséquent, le courant peut être obtenu en continu. Utiliser le carburant méthanol ou autres alcools nécessitent une température de fonctionnement plus élevée: 800 à 1000 °C. Il y a des problèmes avec la production de batteries fonctionnant à cette température: il est donc préférable d'utiliser de l'hydrogène [32], c'est la cause principale qui traduit la problématique fondamentale pour un recours fondé aux piles à combustible à base d'hydrogène.

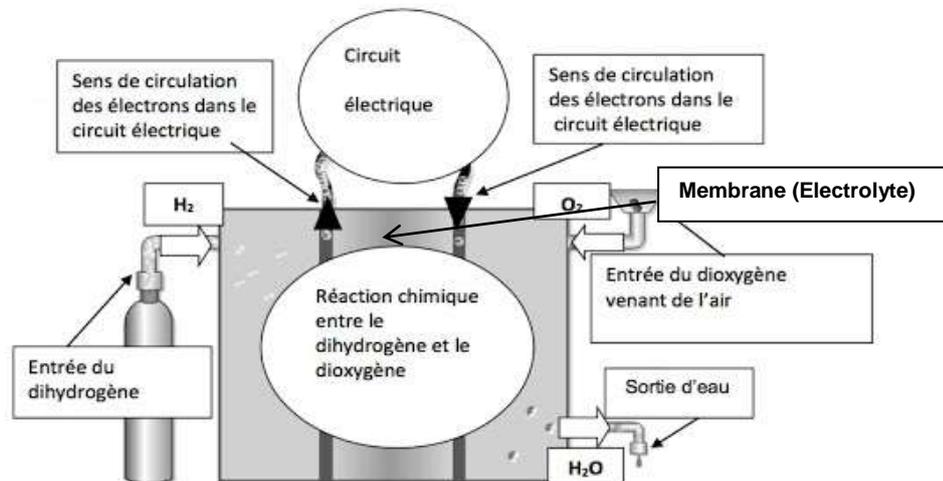


Figure (II.2). Schéma du principe élémentaire d'une pile à combustible [33].

II.4. Réaction de l'oxydoréduction

La réaction redox ou réaction redox est une réaction chimique dans laquelle un transfert d'électrons se produit. La substance chimique qui capture les électrons est appelée «oxydant» et la substance chimique qu'elle libère est appelée «réduction». Les réactions redox se produisent lors de la combustion, lors de certaines doses métallurgiques, lors de la corrosion du métal, de l'électrochimie ou de la respiration cellulaire. Ils jouent un rôle particulièrement important dans le

domaine de la biologie dans le processus de conversion de l'oxygène en eau (H_2O) dans les organismes. Les réactions redox sont également souvent utilisées dans l'industrie: la fonte est obtenue à partir de minerai composé d'oxyde de fer par réduction, et l'acier est ensuite obtenu à partir de fonte par oxydation. La diversité des réactions redox s'explique par la mobilité des électrons dans diverses formes de matière, douce et omniprésente [34].

II.4.1. La demi-réaction d'oxydation

Lors d'une demi-réaction d'oxydation, un atome perd un ou plusieurs de ces électrons. À chaque fois qu'une substance donne un électron, sa charge ionique, qui correspond à son degré d'oxydation, augmente de 1. Dans l'équation de cette demi-réaction, les électrons font toujours partie des produits; ils sont donc situés à la droite de la flèche de l'équation. La substance qui donne un ou des électrons, en l'occurrence le réactif de la réaction, est nommée l'agent b.

II.4.2. La demi-réaction de réduction

Lors d'une demi-réaction de réduction, un atome gagne un ou plusieurs électrons. À chaque fois qu'une substance gagne ou accepte un électron, son degré d'oxydation diminue de 1. Dans l'équation de cette demi-réaction, les électrons font toujours partis des réactifs; ils sont donc situés à la gauche de la flèche de l'équation. La substance qui accepte des électrons, en l'occurrence les réactifs de la réaction, est nommée l'agent oxydant. Cette substance peut aussi être appelée substance réduite [35].

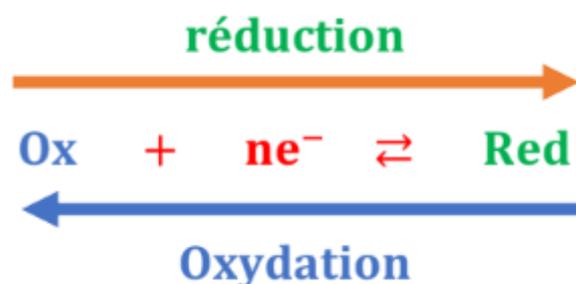


Figure II.3. La Réaction d'oxydoréduction [35].

II.5. Les principaux composants d'une PAC

Une pile à combustible est constituée des trois principaux éléments [36].

- L'anode qui est alimentée par un combustible (hydrogène, méthanol, etc.) ;
- La cathode qui est alimentée par un comburant (oxygène) ;
- l'électrolyte, solide ou liquide, qui sépare les deux électrodes, assure la diffusion des ions intermédiaires de la réaction d'oxydation du combustible.

L'électrolyte doit empêcher le passage des électrons qui passent à travers le circuit électrique.

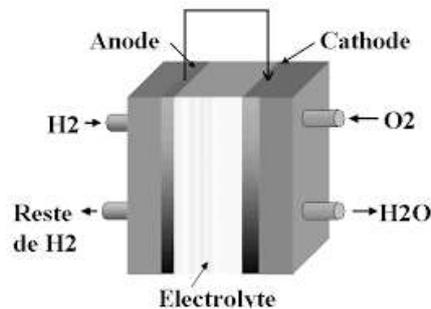


Figure II.4. Réactions produites [37].

Les deux électrodes sont séparées par l'électrolyte. A l'anode, on amène le combustible (le plus souvent de l'hydrogène, parfois du méthanol). La cathode est alimentée en oxygène (ou plus simplement en air, enrichi ou non en oxygène) comme le montre la figure (II .4)

II.6. Types de piles à combustible

Les piles à combustible dépendent généralement de la nature de l'électrolyte, de la température à laquelle la batterie fonctionne et du type d'ions qui assurent la conduction ionique. Par conséquent, on distingue six types de piles à combustibles [38]:

II.6. 1.Trois à électrolytes acides (ions H⁺ migrant de l'anode vers la cathode) :

Les PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) : L'électrolyte est constitué d'une membrane solide polymère fonctionnant à basse température. (20-100°C). Celle-ci transmet sélectivement vers la cathode les ions H⁺ formés par oxydation catalytique de l'hydrogène injectée directement sur l'anode.

A l'anode :



A la cathode :



- Les DMFC (Direct Méthanol Fuel Cell) : Au lieu d'hydrogène, ces piles utilisent comme combustible le méthanol (CH₃OH). Injecté directement sur l'anode avec de l'eau son oxydation catalytique produit des ions H⁺ et du gaz carbonique. Comme sur les PEMFC, une membrane solide polymère transmet sélectivement les H⁺ vers la cathode.

A l'anode :



A la cathode :



- les PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) : utilisent à la place de membranes solides de l'acide phosphorique liquide occlus dans une matrice solide poreuse. Elles peuvent fonctionner jusqu'à 200°C.

II.6. 2. Trois à électrolytes basiques (ions négatifs migrant de la cathode vers l'anode) :

- les AFC à potasse liquide (Alkaline Fuel Cell) : utilisent l'ion OH⁻ libéré par réduction catalytique de cette base sur la cathode. À l'anode, avec un catalyseur au nickel, ou au platine-palladium, on a :



À la cathode, avec un catalyseur à l'oxyde de nickel, à argent ou au platine-or, on a :



- Les MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) : utilisent des carbonates de lithium et de potassium fondus pour faire migrer des ions CO₃²⁻. A l'anode, avec un catalyseur fait d'un alliage nickel-chrome / nickel-aluminium, on a la réaction:



A la cathode, avec un catalyseur d'oxyde de nickel, on a:



-les SOFC (Solide Oxyde Fuel Celle) : exploitent un électrolyte solide (zircone dopé aux terres rares) pour produire des ions O²⁻. A l'anode, avec un catalyseur au cermet de zirconium et nickel on a la réaction:



Ou



A la cathode, dans les deux cas, à l'aide d'un catalyseur au manganite de luthane dopé au strontium, on a la réaction:



Le tableau suivant regroupe les différents types de pile à combustible :

Type de pile	Ion mobile	Température	Temps de démarrage	Applications
Alcaline (AFC)	OH ⁻	500-200	<0.1h	Vaisseaux spatiaux (Apollo .p .ex,)
Membrane échangeuse de protons (PEMFC)	H ⁺	50-100	<0.1h	Véhicules, applications mobiles, cogénération
Acide phosphorique (PAFC)	H ⁺	220	<0.1h	Cogénération
Carbonate Fondu (MCFC)	CO ^{2/3} ₊	700	<0.1h	Cogénération
Oxyde solide (SOFC)	O ²⁻	800-1000	<0.1h	Cogénération, Auxiliaire des Véhicules
Méthanol direct (DMFC)	H ⁺	50-130	<0.1h	Applications :Mobiles ,transport

Tableau II.1 .caractéristique de toutes les piles à combustible [39].

II.7. Caractéristiques et propriétés de la PEMFC

Puisqu'il existe autant d'applications dans le domaine fixe que dans les domaines automobile et portable, des recherches très approfondies ont été menées sur ce type de piles pour entretenir tout aspect liés au développement de la PEMFC où ses différents avantages et leur robustesse n'ont pas encore été prouvés pour convaincre les principaux acteurs de développer l'intérêt de l'économie de l'hydrogène (production, distribution, stockage, etc.).

Dans la PEMFC, l'hydrogène est utilisé comme carburant et l'oxygène (ou l'air) est utilisé comme oxydant. Le principe de fonctionnement de la batterie est de récupérer l'énergie de combustion de l'hydrogène et de la convertir en énergie électrique. La réaction globale se produisant dans la pile peut être écrite comme [40].



Afin de récupérer l'énergie dégagée par la réaction, il est nécessaire de dissocier la réaction totale en deux demi-réactions, séparées spatialement par un électrolyte. L'électrolyte d'une pile PEMFC est une membrane polymère imperméable aux gaz, isolant les réactions d'oxydation de l'hydrogène à l'anode et de réduction de l'oxygène à la cathode. Cet électrolyte permet le passage de protons (ions) sans être conducteur électronique, donc sans passage d'électrons. Les groupements acides présents dans sa structure, généralement SO_3H ou CO-OH , assurent le transfert des protons entre l'anode et la cathode.

II.7. 1 .Type d'électrolyte

L'électrolyte de la pile à combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC est généralement, les membranes polymères poreuses sont capables de transporter des ions hydrogène H_2 .

Les demi-équations électrochimiques ayant lieu à l'anode et à la cathode sont les suivantes :



Ces batteries fonctionnent à des températures inférieures à 100°C . La température de fonctionnement plus basse leur permet de démarrer relativement rapidement.

La pile à combustible est constituée d'un empilement de cellules qui forme un empilement de piles. Ces unités de base sont composées de composants d'électrode à membrane (EME).

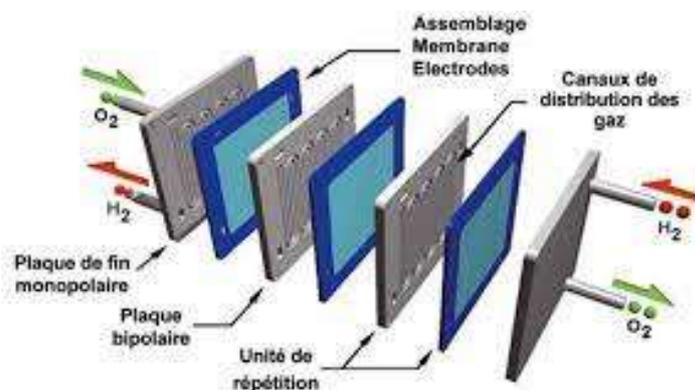


Figure II .5 . Assemblage d'une cellule élémentaire [41].

II.7. 2.Membranes polymères ioniques

La membrane conductrice de protons constitue le cœur de la pile à combustible PEMFC. C'est leur conductivité électrique qui détermine la recombinaison électrochimique de l'hydrogène et de l'oxygène, qui à son tour détermine ses performances. La goutte ohmique limitera le

fonctionnement sous haute densité de courant, et est principalement liée à la membrane (la résistance de la membrane est liée au rapport) l'épaisseur dépasse la conductivité protonique). De plus, ce dernier doit montrer une bonne résistance mécanique et chimique dans les conditions de fonctionnement, car le gaz est imperméable et maintient une teneur élevée en eau à des températures élevées, car cela détermine la conductivité électrique. La membrane est ensuite reliée à deux électrodes, une de chaque côté, pour permettre l'alimentation en gaz et favoriser les réactions chimiques [42].

II.7.3. Les électrodes

L'électrode est le site de la réaction redox. L'électrode doit avoir les caractéristiques suivantes:

- Poreux pour permettre au gaz de se diffuser vers le site de réaction. Ils ont généralement du feutre ou du papier carbone.
- Imprégnation avec une pâte composée d'un catalyseur au platine carbone le côté en contact avec l'électrolyte.
- Devenir un bon conducteur électronique (collecter les électrons et conduire à plaque bipolaire).
- Maintenir la flexibilité pour augmenter la surface de contact avec l'électrolyte. À temps actuellement, le catalyseur utilisé est le platine.

La partie de l'électrode immergée dans la pâte constitue la zone active. Numéro d'article l'imprégnation constitue la zone de fusion [43].

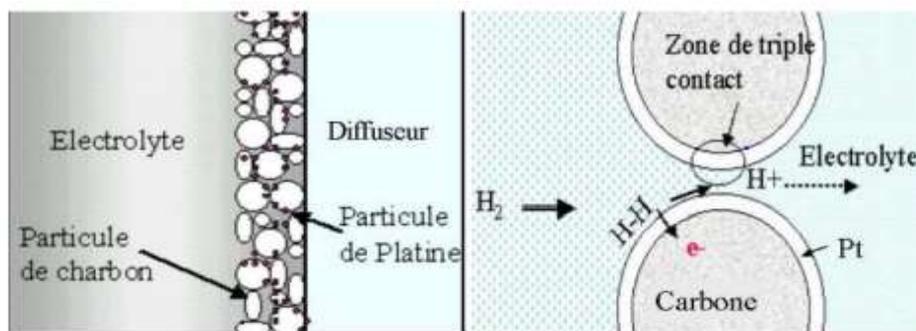


Figure II .6 . Structure des électrodes (à gauche) et point triple (à droite) [44].

II.7.4. Les plaques bipolaires

La fonction de la plaque bipolaire est de collecter le courant, de distribuer et Séparation des gaz à l'anode et à la cathode. Le matériau de la plaque bipolaire par conséquent, il doit avoir un niveau suffisant de conductivité et d'imperméabilité le gaz est plus haut que la membrane échangeuse de protons. La plaque les plus courantes fabriquées en graphite [45].

II.8. Description du Stack

Une unité de pompe à chaleur qui fonctionne à basse pression entre les bornes. Afin de afin d'obtenir une tension de sortie correspondant à la charge placée sur le terminal de la pompe à chaleur, il est nécessaire d'empiler plusieurs batteries en série pour former un empilement [46]. Dans une pile Figure (II.7), toutes les batteries sont fournies en même temps, en même temps, l'hydrogène et l'oxygène traversent les canaux de distribution de la plaque bipolaire. Au niveau de chaque cellule de batterie, les électrons libérés par l'hydroxyde à l'anode sont collectés par la plaque bipolaire et renvoyés vers la cathode de la batterie précédente. Une partie de l'eau générée côté cathode diffuse à travers la membrane vers l'anode et est évacuée avec un excès d'hydrogène. L'autre partie évacue directement l'excès d'oxygène du côté de la cathode. Les canaux de distribution de gaz sont reliés entre eux par l'ensemble de batterie, avec une entrée et une sortie sur la plaque d'extrémité [47].

Le dimensionnement du Stack est déterminé en fonction de la conception et du cahier des charges de la PAC.

Pour choisir les dimensions du Stack en se réfère aux deux points suivants :

-Le nombre de cellules empilées en série pour déterminer la tension de sortie totale aux bornes du Stack. La tension nominale élémentaire d'une cellule étant de l'ordre de 0,7V, la tension de sortie totale est égale à la tension élémentaire multipliée par le nombre de cellules.

-La surface d'une cellule pour déterminer le courant maximum que le stack peut fournir.

Le courant est proportionnel à la surface de contact entre l'électrode et le gaz, en effet, plus la surface de contact est grande, plus le nombre de molécules d'hydrogène en réaction est important et plus d'électrons sont libérés.

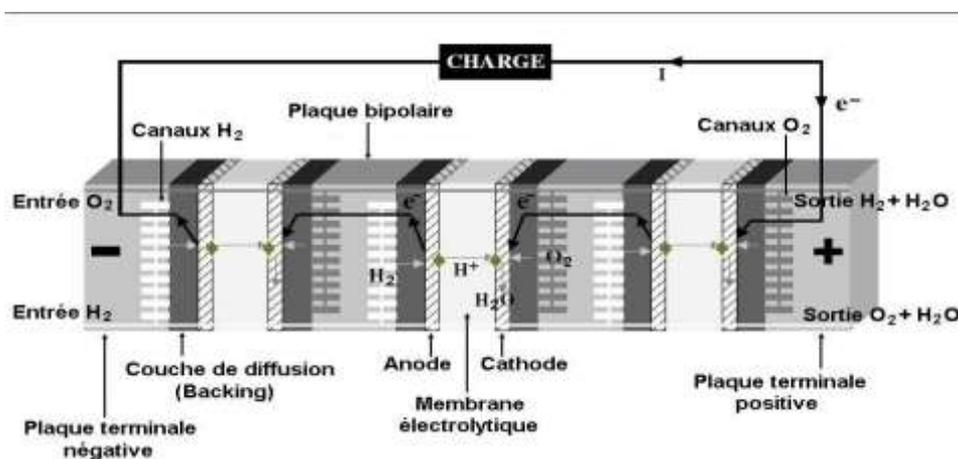


Figure II.7. Empilement de cellules (Stack) [48].

Cependant, le dimensionnement du Stack est encadré par des limites technologiques relatives au nombre de cellules, à la densité de courant et à la surface de contact. En effet, le nombre maximal de cellules est égale à 100 dans le cas de plaques bipolaires en graphite et la densité de courant ne peut pas dépasser $1\text{A}/\text{cm}^2$ avec une surface limitée à 800cm^2 .

Par conséquent, le stack est conçu en fonction de la puissance demandée en ajustant le nombre de cellules à empiler et la surface de contacte des cellules.

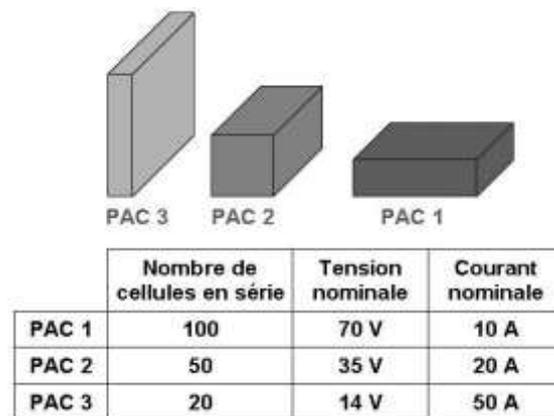


Figure II.8. Modularité d'un stack 3 types de conception d'une PAC de 700W en fonction du nombre de cellules et la surface de contacte de la cellule [49].

II.9. Environnement de la pile PEMFC

La pile a été intégrée dans un système utilisé pour gérer le courant et ajuster le débit de réactif, comme le montre la Figure (II.9), le produit peut également ajuster les paramètres suivants:

- Températures
- Pressions des réactifs
- Humidification de la membrane.

L'air est mis en pression par un compresseur et le refroidissement du système est assuré par la circulation d'un fluide caloporteur grâce à des pompes. Le débit d'oxygène à la cathode est régulé afin d'obtenir un ratio stœchiométrique entre 1,5 et 2 par rapport à l'hydrogène ce qui permet une bonne évacuation de l'eau formée. L'humidité des gaz est régulée grâce aux systèmes humidificateur et condenseur.

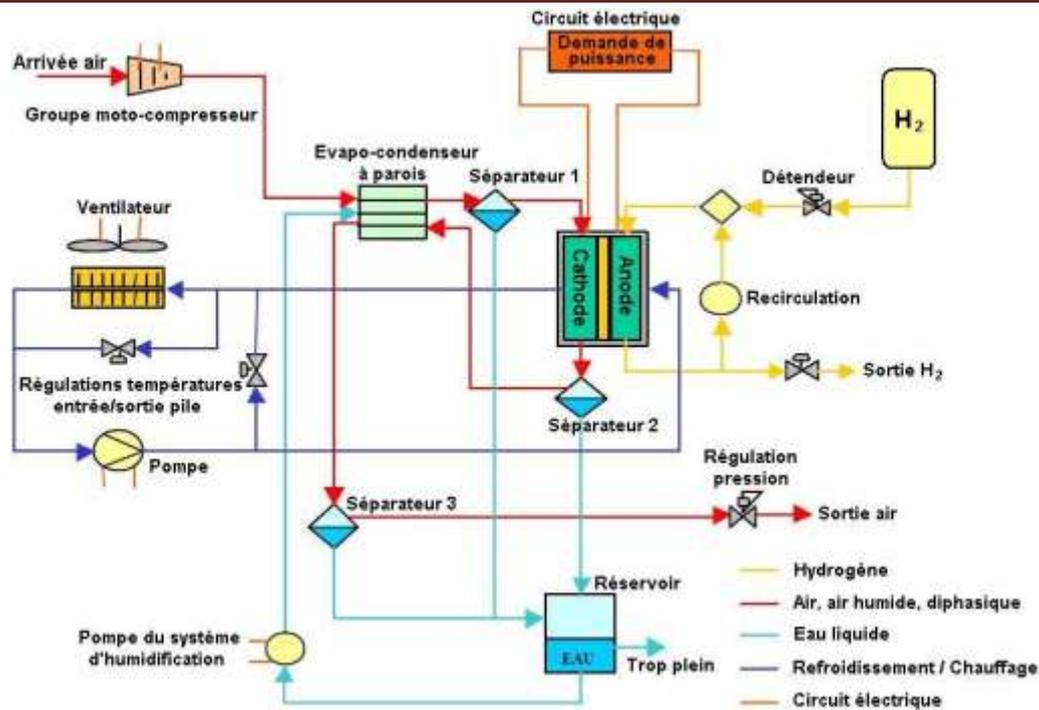


Figure II.9. Architecture du système PAC complet [50].

II.10. Avantages et Inconvénient des PEMFC

II.10. 1. Avantage:

Les principaux avantages des piles à combustible de type PEMFC sont les suivants:

- Haute efficacité (nettement supérieure à l'efficacité Carnot du moteur thermique), l'efficacité nominale de la batterie PEMFC est comprise entre 50% et 60%, [51] [52].

Utilisation flexible (arrêt et démarrage quasi instantanés).

- Fonctionnement à faible impact sur l'environnement (dégagement d'eau et de chaleur), fonctionnement relativement silencieux (quelques pièces sont en mouvement).

II.10. 2. Inconvénients:

- Utiliser des métaux précieux comme catalyseurs de réaction.
- Difficultés à stocker l'hydrogène [53].
- Durabilité.
- La pérennité du PEMFC est un obstacle technique important. Actuellement, la durée de vie des systèmes commercialisés est de 5000 heures pour les systèmes d'entraînement automobiles et de 40000 heures pour les applications stationnaires [54] [55].

II.11. Applications de la pile PEMFC

II.11.1 Applications portables

Les applications portables sont des systèmes de petites puissances (moins de 1 kW) alimentant des objets destinés à être transportés. L'utilisation des PEMFC pour ces applications est sensiblement la même que les batteries (celles aux Lithium-ion notamment). Il s'agit d'alimenter des dispositifs électroniques tels que les téléphones Figure (II.10) ou les ordinateurs portables, pour ce segment, l'argument majeur des PEMFC face aux batteries est le temps de chargement. Alors que pour une batterie classique le temps de recharge se compte en heures, le remplissage d'un réservoir d'hydrogène ne prend que quelques secondes (ou minutes). Toutefois, les récents progrès technologiques des batteries rendent difficile l'émergence des PAC dans ce domaine.



Figure II.10. Chargeur de téléphone mobile hybride batterie Li-ion/PEMFC (1.400 mAh), myFC Power Trekk [56].

II .11.2. Applications dans le domaine du transport

Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de la pile à combustible à partir du début des années 90. Compte tenu de la contrainte de coût, particulièrement forte dans ce secteur, et de la concurrence de la technologie traditionnelle (moteur thermique), il faut distinguer deux sous-familles assez différentes dans leurs besoins, suivant qu'il s'agit d'équiper un véhicule léger ou un véhicule lourd. Il est demandé au véhicule léger quelque 3 000 h de fonctionnement pour une dizaine d'années de durée de vie alors qu'un véhicule lourd (transport de passagers ou de marchandises) exige une durée de fonctionnement 100 fois plus longue. Il est évident que la technologie et la durée d'amortissement (donc les coûts admissibles) ne seront pas du tous les mêmes [57].

II.11.3. Applications stationnaires

Une autre forme d'application des PEMFC c'est les applications stationnaires de grande puissance nécessitant des milliers de Watt. Ces systèmes sont destinés à la production d'électricité

(en continu ou non) de nature à inclure de la cogénération (puissance > 100 kW) ou de la micro cogénération (< 100 kW). Ces applications regroupent trois sous catégories [58].

- La production d'électricité et de chaleur pour des bâtiments collectifs ou individuels,
- L'alimentation électrique de secours (ou backup Power),
- L'alimentation électrique de sites isolés (hors bâtiment) [59].

II.13. Conclusion

Ce présent chapitre traite des notes informatives de description générale sur la pile à combustible tout en espérant qu'elles seront très utiles à la suite du travail dans ce mémoire.

Le principe de fonctionnement du PAC, les différents types de PAC et la technologie de fabrication ont formé un pré-requis indispensable.

la PEMFC et introduite d'une façon particulière du fait qu'elle occupe une importance majeure dans le développement durable d'une part et qu'elle présente notre intérêt d'étude dans la suite de notre travail dans ce mémoire dans une autre part.



Chapitre III :
Etude et
Modélisation de la
pile PEMFC

III.1.Introduction

Le choix de la pile de type PEMFC comme modèle adopté pour notre étude n'était pas au hasard mais, ciblé du fait qu'elle est distinguée par des caractéristiques très spécifiques par rapport aux autres notamment sa performance avec la variation de la température et la robustesse du comportement de la membrane échangeuse sous différentes conditions de fonctionnement.

Les modifications des conditions d'exploitation peuvent avoir des effets favorables ou défavorables concernant les performances de la batterie ainsi du système. Prédire le comportement du système PAC dans ses paramètres de fonctionnement est nécessaire pour y parvenir une technologie de fabrication plus consistante pour un rendement meilleur.

III.2.Etude de la pile PEMFC

III.2.1.Caractéristique principale du PEMFC

La liaison intime entre la tension et le courant dans la pile implique une caractéristique vitale dans son fonctionnement, la tension ou le potentiel réversible théorique de la batterie est calculé par l'équation de Nernst équation(III.6) qui est fonction de la température de fonctionnement et de la pression partielle.

Ce potentiel de la pile est modifié par trois sources irréversibles: polarisation ou surtension d'activation de la réaction, surtension ohmique et Surtension liée à l'épuisement du milieu réactionnel (polarisation de concentration). Par conséquent, la tension lorsque la batterie est chargée est inférieure à la tension de Nernst, la courbe de polarisation Figure (III.1) montre trois régions de polarisation (surtension), pour chacune de ces zones, il existe principalement un type de surtension par rapport aux autres zones :

Dans la zone 1: est à faible densité de courant, l'effet de la surtension d'activation est le plus important.

La zone 2 : est une région linéaire dans laquelle la surtension ohmique est dominante.

La zone 3 : est à haute densité de courant, la surtension concentrée est la principale perte [60].

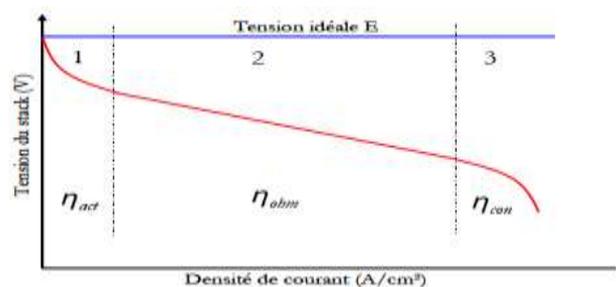


Figure III .1 . Caractéristique de polarisation théorique du PAC [61].

III.3. Modélisation de la pile PEMFC

La modélisation des piles est de grande importance pour leurs études et leur développement, car elle facilite la compréhension des phénomènes liés au fonctionnement.

La modélisation des PAC prend une part très importante dans leur développement, car cela facilite la compréhension des phénomènes mis en jeu en leur sein. Il existe ainsi un grand nombre de modèles de piles à combustible, qui ont généralement chacun leurs propres spécificités et utilités, suivant les phénomènes étudiés. Les modèles mathématiques sont indispensables pour analyser la conception et la performance des piles à combustible.

Ce chapitre est consacré à la modélisation de la pile à combustible de type PEM et la présentation des simulations permettant la détermination de la courbe de polarisation et celle de la puissance d'une pile à combustible PEM, ainsi la variation des pertes d'activation en fonction de la densité de courant et la température, ce qui permettra de comprendre les phénomènes mis en jeux qui se déroulent dans une pile à combustible [62].

III.3.1. Modèle de Kim

Le modèle de Kim est un modèle de référence pour la modélisation des réservoirs de carburant. Ce modèle est quasi-expérimental, basé sur des équations théorique mais utilisant des paramètres pour adapter le modèle aux données expérimentales [63].

$$V_{cell}(J) = E_0 - b \cdot \log(J) - R \cdot J - m \cdot \exp(n \cdot J) \quad (\text{III.1})$$

Avec

$$E_0 = E_r - b \cdot \log(J_0) \quad (\text{III.2})$$

V_{cell} = représente potentiel d'une cellule [V]

J = la densité de courant [A / m^2]

E_r = le potentiel réversible la cellule

J_0, b = paramètres appelés paramètres de Tafel pour la réduction de oxygène

R = la résistance ohmique [$\Omega \cdot m^2$]

m, n = sont des paramètres liés à la diffusion [V, A^{-1}]

III.3.2. Modèle interne (N. Al Brioux)

Le modèle électrique développé au laboratoire par N. Al Brioux [64] est empirique, non divergent en densité de courant J , ce nouveau modèle permet une cohérence mathématique de l'équation utilisée par rapport à la forme de la courbe caractéristique expérimentale [65]. (Tension, courant) d'une PAC.

$$V_{cell}(J) = E + \left(\frac{b}{\ln\left(\frac{J}{J_d \cdot e^2}\right)} \right) + \left(\frac{b}{4 \cdot J_d} \right) + \Delta \cdot J \quad (\text{III.3})$$

V_{cell} = potentiel d'une cellule [V]

J = densité de courant [$A \cdot m^{-2}$]

E = tension de circuit ouvert de la cellule [V]

J_d, b, Δ = paramètre du modèle dépendant de la température et de la pression partielle en oxygène [A / m^{-2}]

III.3.3. Modèle d'Amphlett

Le modèle électrochimique adopté pour cette présente étude est le modèle d'Amphlett. C'est un modèle semi-empirique simple qui prend en compte la plupart des paramètres influents sur les performances de la pile .Le potentiel thermodynamique théorique de la pile à combustible PEMFC H₂/O₂ à 25 °C et à 1 atm est de l'ordre de 1,23 V, mais le potentiel réel (V_{pac}) de la cellule décroît par rapport à la potentielle thermodynamique d'équilibre quand le courant est débité. Cette déviation 21 à la valeur du potentiel de Nernst, est due aux pertes irréversibles appelées polarisations η (surtensions) qui sont : la polarisation d'activation, la polarisation ohmique et la polarisation de concentration que nous avons préalablement vues. Par conséquent, l'expression de la tension d'une cellule s'exprime comme suit [66][67] :

$$V_{pac} = E_{Nernst} - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{conc} \quad (\text{III.4})$$

Pour calculer la tension (V_S) de (N_C) piles unitaires reliées en série formant un assemblage [68] [69].

$$V_S = N_C * V_{Pac} \quad (\text{III.5})$$

N_C : Nombre de cellules de PAC

V_S : La tension de sortie.

Dans le cas où l'eau liquide serait le produit de la PEMFC l'expression de l'équation de Nernst [67] [68] arrangé avec un calcul numérique se présente comme suit [70].

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85T^{-3} + (T - 298.15) + 4.3110 \cdot T \cdot [\ln(P_{H_2}) + 0.5 \ln(P_{O_2})] \quad (III.6)$$

E_{Nernst} : Polarisation E-Nernst [V]

P_{H_2} : La pression d'hydrogène [atm]

P_{O_2} : La pression d'oxygène [atm]

III.3 .3.1. Polarisation de la pile à combustible PEMFC

On distingue sur la courbe de polarisation théorique (III .1) de la pile PEMFC, trois domaines différentes, également appelées courbes de polarisation:

(A) Polarisation d'activation

(B) Polarisation Ohmic

(C) Polarisation de concentration.

Chaque polarisation est une chute de tension dominante dans une région particulière de densité de courant (faible, moyenne, ou élevée) [71]. Les données relatives à des tensions élevées représentent des mesures effectuées à des faibles densités de courant, alors que les données pour des tensions faibles sont pour des mesures faites à des densités de courant élevées [72]. Les densités de courant à la sortie de la pile en A/cm² varient en fonction, de la température de la pile, de la densité du catalyseur et de l'alimentation d'hydrogène et d'oxygène. La valeur de 0,8 A/cm² est une densité de courant appréciable actuellement, mais certaines piles de petite taille en projet peuvent atteindre les 2 A/cm² [72].

Dans la pratique, la pile à combustible est commandée par le courant, par un rhéostat monté sur le circuit électrique. Le courant détermine alors la tension correspondante et la puissance disponible ainsi la quantité de combustible nécessaire [69].

A. Comportement du PEMFC dans la première Zone de polarisation

La décroissance logarithmique du potentiel est déterminée principalement par la somme de surtension sur l'anode et la cathode correspond à l'équation de Butler-Vollmer et passe par la cinétique de transfert de charge lente dans la zone active [72] [71], c'est-à-dire dans la zone de réaction électrochimique, dont l'une est une réaction inverse. L'oxygène présent à la surface de l'électrode poreuse est également déterminé par d'autres processus d'activation, parmi lesquels la

réduction de l'oxygène est la plus lente [73] [74]. Ces pertes peuvent être améliorées en augmentant la température [75].

Une expression simple proposée par J.C. Amphlett et al [72] donne la surtension d'activation de la forme suivante :

$$\eta_{act} = \xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T \ln(\dot{C}_{O_2}) + \xi_4 T \ln(I_{pac}) \quad (III.7)$$

\dot{C}_{O_2} : Concentrions De Oxygène

P_{O_2} : La pression d'oxygène [atm]

T : Température d'un Cellule [K]

$\xi_1 = \xi_2 = \xi_3 = \xi_4 =$ coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique

$$\xi_1 = -0.948$$

$$\xi_2 = K_{cell} + 0.197 + 10^{-3} \ln(A) + 4.3 * 10^{-5} \ln(\dot{C}_{H_2}) \quad (III.8)$$

$$\xi_3 = 6.3 * 10^{-5} \text{ Et } \xi_4 = 0.72 * 10^{-4}$$

\dot{C}_{O_2} : Représente les concentrations de l'oxygène (mol/cm³) 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 [76].

$$\dot{C}_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 * 10^6 e^{-\left(\frac{498}{T}\right)}} \quad (III.9)$$

A faible densité de courant, la forme de la courbe dépend principalement de la polarisation d'activation de la cathode. La cathode est généralement l'électrode qui limite les performances de fonctionnement de la pile à combustible PEMFC. La densité de courant d'échange de la réaction de réduction d'oxygène étant faible, elle est environ 5 à 6 fois inférieure à la densité de courant d'échange de la réaction d'anode. .Etant donné qu'on utilise de l'oxygène pur pour les travaux expérimentaux [76].

$$P_{O_2} = P_{anode} \cdot [1 + x_{H_2O}^{sat}] \quad (III.10)$$

P_{O_2} : La pression d'oxygène [atm]

P_{cath} : La pression d'oxygène à l' cathode [atm]

$x_{H_2O}^{sat}$: La fraction molaire de saturation

$x_{H_2O}^{sat}$. La fraction molaire de saturation de l'eau dans le gaz humidifié et supposée \approx à 50 %, on obtient alors :

$$P_{O_2} = \frac{1}{2 \cdot P_{cath}} \quad (III.11)$$

A l'anode, on utilise de l'hydrogène pur, qui ne contient pas du monoxyde de carbone [77].

$$C_{H_2} = \frac{P_{H_2}}{1.09 \cdot 10^6 e^{\left(\frac{77}{T}\right)}} \quad (III.12)$$

$$P_{H_2} = P_{anode} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot x_{H_2O}^{sat} \right] \quad (III.13)$$

P_{anode} : La pression de l'hydrogène à l'anode

La pression sera exprimée par :

$$P_{H_2} = \frac{3}{4 \cdot P_{anode}} \quad (III.14)$$

P_{H_2} : La pression de l'hydrogène [atm]

P_{anode} : La pression de l'hydrogène à l'anode [atm]

B. Comportement du PEMFC dans la deuxième Zone de polarisation

On observe un phénomène établi par une décroissance de la tension de la pile presque linéaire avec augmentation du courant. Ce phénomène nommé polarisation ohmique, proportionnelle au courant, est liée aux résistances électroniques dans les plaques bipolaires, électrodes et connexions en série de l'assemblage et liée aussi aux résistances ioniques internes, diminuant la tension entre électrodes. Cette chute de tension se détermine principalement par la résistivité de la membrane polymère solide au transfert de protons, qui est supérieure à toutes les autres. En effet, 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 [78] [79].

Ceci peut être exprimé par l'utilisation de la loi d'Ohm :

$$\eta_{ohm} = I_{pac} * (R_m + R_c) \quad (III.15)$$

η_{con} : Pertes par concentration [V]

η_{ohm} : Pertes par ohmique [V]

R_m : La résistance équivalent de la membrane a la membrane a la conduction des protons

R_c : La résistance équivalente de contact a la conduction des électrons

$$R_m = r_M \cdot \frac{\ell}{A} \quad (\text{III.16})$$

r_M : La résistance spécifique de la membrane [ohm.cm]

ℓ : L'épaisseur de la membrane [μm]

A : La surface active de la pile [cm^2].

La relation suivante :

$$r_M = \frac{181.6 \left[1 + 0.03 \left(\frac{I_{pac}}{A} \right) + 0.062 \left(\frac{T}{303} \right)^2 \cdot \left(\frac{I_{pac}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[\lambda_{\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_3^-} - 0.6343 - \left(\frac{I_{pac}}{A} \right) \right] \cdot \exp \left[4.18 \frac{(T-303)}{T} \right]} \quad (\text{III.17})$$

Le terme $\frac{181.6}{(\lambda_{\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_3^-} - 0.6343)}$ représente la résistance spécifique de la membrane

$I_{pac} = 0$ et à une température de 30 °C ($T = 303$ K). Le terme exponentiel au dénominateur est le facteur de correction de la température si cette dernière n'est pas à 30 °C.

$\lambda_{\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_3^-}$ = le taux l'hydratation

En remplaçant les équations (III.16) et (III.17) dans l'équation (III.15), l'expression de la polarisation ohmique devient

$$\eta_{ohm} = \frac{I_{pac}}{A} \left[\frac{181.6 \left[1 + 0.03 \left(\frac{I_{pac}}{A} \right) + 0.062 \left(\frac{T}{303} \right)^2 \cdot \left(\frac{I_{pac}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[\lambda_{\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_3^-} - 0.6343 - \left(\frac{I_{pac}}{A} \right) \right] \cdot \exp \left[4.18 \frac{(T-303)}{T} \right]} + A \cdot R_M \right] \quad (\text{III.18})$$

C. Comportement du PEMFC dans la troisième zone de polarisation

Dans la troisième zone de concentration où des densités de courant sont élevées, la cinétique de diffusion des gaz à travers les électrodes devient le facteur limitant due aux gradients de concentration des réactifs [78], et puisque à partir d'une certaine quantité de courant demandée, l'alimentation en molécules d'oxygène ne peut plus suivre, la tension chute alors rapidement [79]

Donc on observe une décroissance proportionnelle à la densité de courant exprimée comme pertes par : [80][81][82].

$$\eta_{ncon} = -B \left(1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \quad (\text{III.19})$$

J_{max} : La densité de courant maximal [A/cm^{-2}]

J : La densité de courant [A/cm^2]

B: Constante de concentration

Equation de la puissance :

$$P = V * I_{pac} \quad (III.20)$$

Rendement : Ce rendement se calculé par le rapport entre la tension de sortie de la pile et la tension E_0 ($E_0=1,23V$) à la température concernée :

$$\eta = \frac{V_{pile}}{1.23} \quad (III.21)$$

$$F_{gaz} = \frac{n_c \times I}{n \times F} \times \frac{1}{n_F} \quad (III.22)$$

F_{gaz} : Flux de gaz ($mol.s^{-1}$)

n_c : Nombre de cellules de PAC

I : Courant de PAC (A)

η_F : Rendement faradique(%)

n : Nombre de moles d'électrons échangées par mole d'eau ($n=2$ pour l'hydrogène, $n=4$ pour l'oxygène)

III.4. Illustration des caractéristiques par simulation sous Matlab

Dans cette partie nous avons opté pour l'élaboration des programmes sous Matlab en se basant sur les modèles exposés ci-dessus pour illustrer les différentes caractéristiques durant un cycle de fonctionnement de la pile.

Données adaptées des paramètres pour application au modèle PEMFC

Paramètres	Valeur	Paramètres	Valeur
T	310 (K)	ξ1	-0.9514
A	40(cm)	ξ2	0.00286+0.0002*log(A)+0.000043*log(C_h2)
L	0.000180 (µm)	ξ3	0.7.4e-5
P-h2	3 (ATM)	ξ4	-1.87e-4
P-o2	3(ATM)	X	10
B	0.12 (V)	J-Max	672 (A/cm)
RC	0.00045 (Ω)	J	16.5 (A/cm)

Tableau III.1. Paramètres d’une cellule de la pile (données adaptées) [83].

III.4 .1.Organigramme générale des caractéristiques

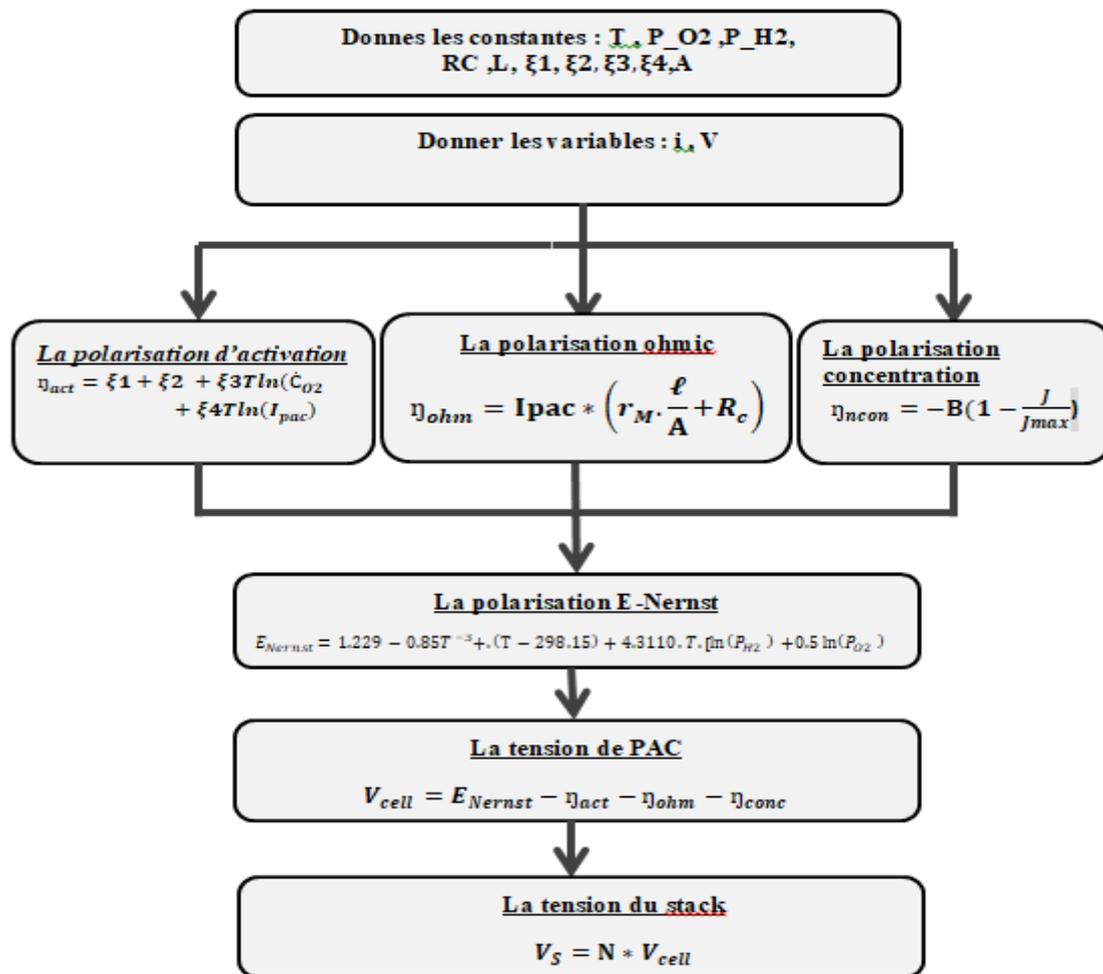


Figure III.2.Organigramme générale.

III.4.2. Caractéristique de polarisation (tension-courant)

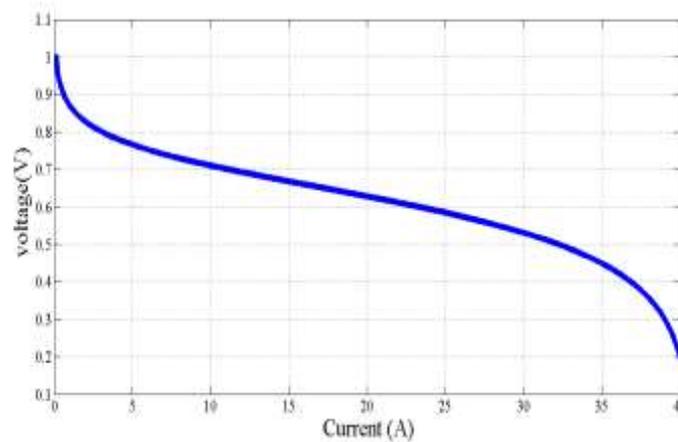


Figure III.3. caractéristique de polarisation de la pile.

Le graphique Figure(III.3) montre la tension en fonction du courant, où on remarque une chute remarquable de tension est observée pour des faibles courants, cela est due à la perte du potentiel d'activation qui provoque la vitesse de réaction électrochimique. Cette diminution est le résultat d'une perte résistance ohmique résultante de la résistance électrique des composants de la batterie.

Ces pertes d'activation non linéaires de première zone se change de comportement à une limite de courant.

Dans la deuxième partie, il y a une baisse presque linéaire de la tension avec l'augmentation du courant à certaines valeurs d'une cadence faiblement proportionnelle. Enfin et à des courants plus élevés, les pertes de concentration qui en résultent expliquent la diminution de la tension vers des faibles valeurs expliqué par la faible diffusion des protons à travers la membrane et insuffisance de combustible.

III.4.3. Caractéristique polarisation d'activation

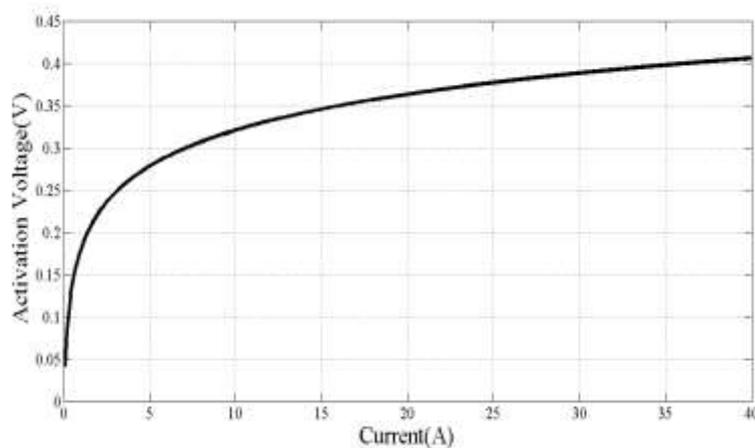


Figure III.4. pertes d'activation de la pile.

La perte d'activation est une chute de tension fonction du courant où la tension d'activation diminue d'une façon logarithmique avec le courant produit par la pile à travers la réaction électrochimique. Ces pertes dans la région à faible densité de courant sont dues à l'initiation de réactions chimiques à l'anode et à la cathode. Une partie de l'énergie est disponible pour rompre et réparer les liaisons chimiques dans les électrodes, puis la tension reste presque constante, en raison de l'énergie nécessaire au début de l'interaction entre les gaz, en particulier l'oxygène. La quantité de cette baisse est liée au type de l'électrolyte et à la densité d'hydrogène et oxygène à la surface de la membrane.

III.4.4.Caractéristique polarisation Ohmic

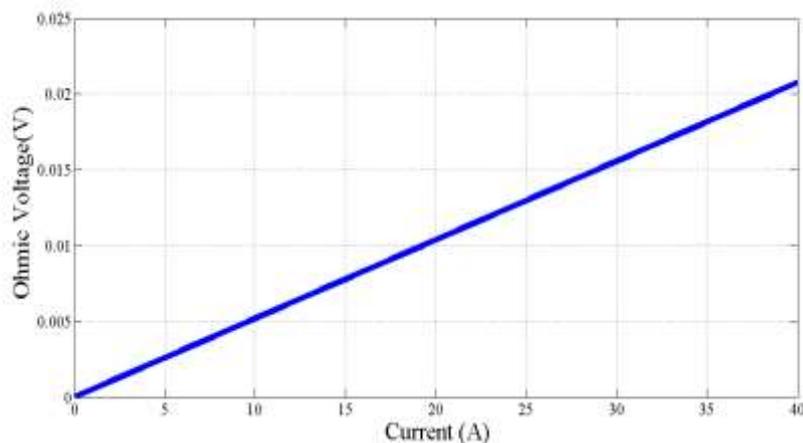


Figure III.5.pertes d'Ohmic de la pile.

La résistance ohmique est proportionnelle au courant et comme la résistance de la cellule est presque constante, le changement de polarisation est linéaire, et cela se produit en raison de l'émergence de la résistance au passage des ions dans l'électrolyte et de la résistance ohmique des électrodes et en réduisant cette résistance en utilisant l'électrolyte approprié.

III.4.5.Caractéristique polarisation de concentration

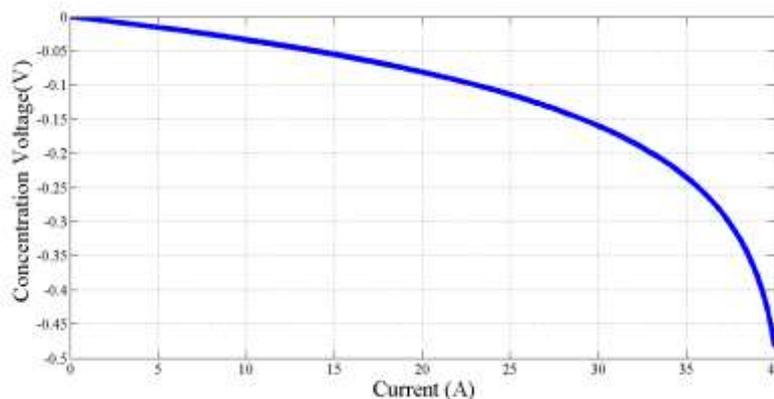


Figure III.6. Les pertes (chute) de concentrations de la pile.

Cette polarisation se produit à une densité de courant élevée et se produit à la fin du réserve des combustibles qui alimentent la pile et n'atteignent pas suffisamment les électrodes et provoquent une chute de tension.

III.4.6. Caractéristique de la puissance du PEMFC

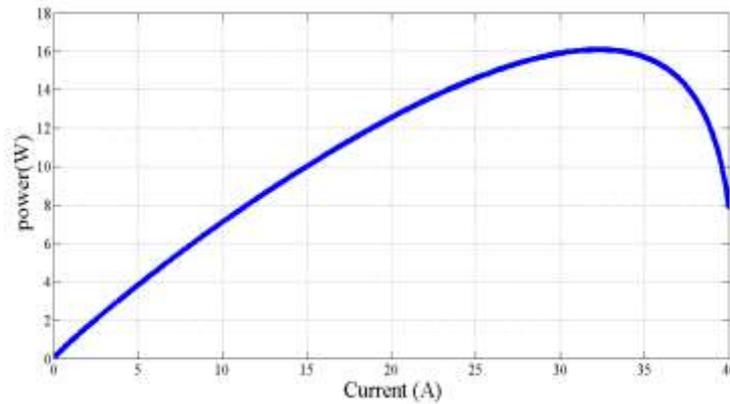


Figure III.7. Puissance produite par la pile.

La variation de la puissance avec le courant peut être interprétée par un début de valeurs nulles de courant puis une augmentation presque linéaire de la puissance en fonction du courant de charge jusqu'à ce que la valeur maximale soit atteinte. Après ce maximum, la puissance diminue brusquement pour atteindre la valeur zéro qui correspond à une valeur limite du courant (absence complète du combustible).

III.4.7. Effet du nombre de cellules du PEMFC

En augmentant le nombre des cellules la puissance produite par la pile s'influe en conséquence

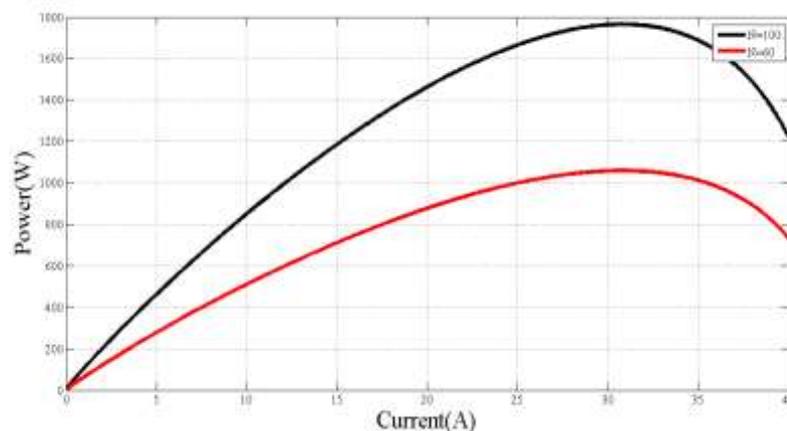


Figure III.8. effet du nombre de cellules sur la réponse de la pile.

III.4.8. Effet de la température sur la polarisation (tension) de sortie

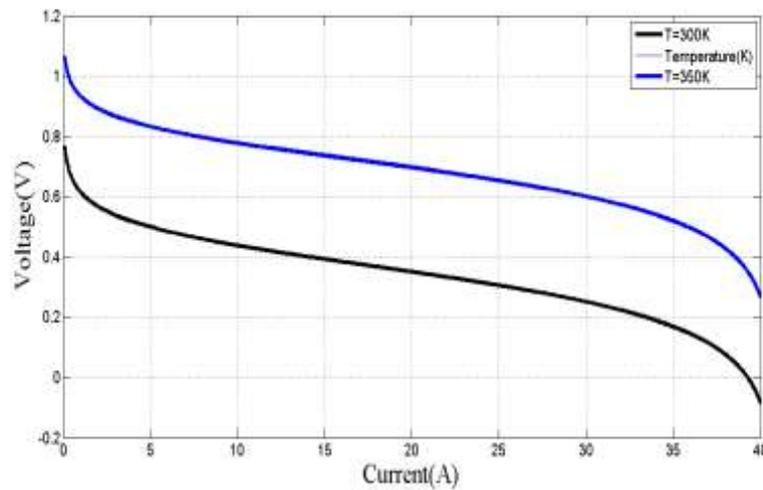


Figure III.9. Effet de la température sur la tension de la pile.

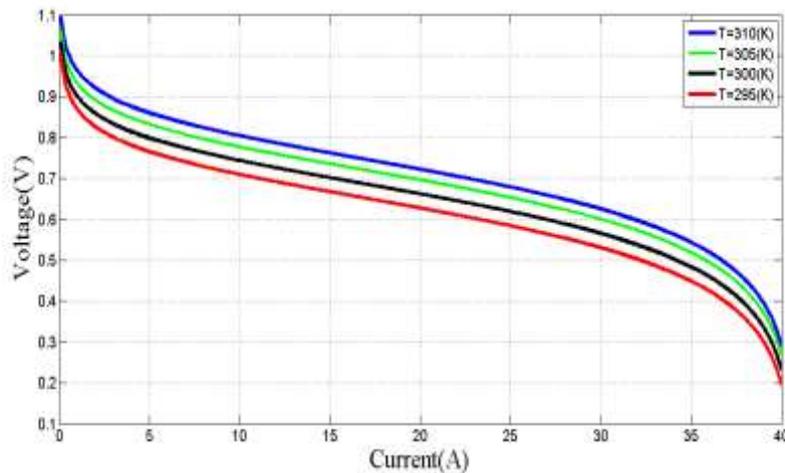


Figure III.10 .Effet de la température sur la tension de la pile.

Les figures(III.9) et (III.10) montrent l'influence de la température sur la courbe de la polarisation et la relation entre la tension avec le courant par un effet positif sur l'augmentation de la tension de la batterie ce qui indique que la température est proportionnelle à la tension tout en impliquant une diminution de la résistance ohmique et l'accélération de la cinétique de réaction.

La température doit être inférieure au point d'ébullition afin de ne pas tacher la membrane de séparation qui agit sur le passage des ions. C'est pourquoi il estime que la gestion de la température dans le système de pile à combustible est d'une grande importance et doit être stabilisée dans les différentes conditions de fonctionnement.

Le système de refroidissement fonctionne à eau ou des liquides de refroidissement où la diminution de la température implique forcément la diminution de la tension, ce qui entraîne une diminution du rendement de la pile.

III.4.9. Effet de la constante de concentration B sur la polarisation

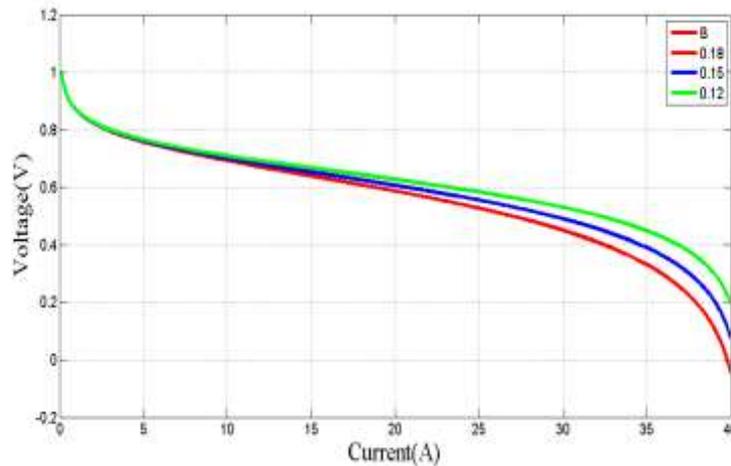


Figure III.11.Effet du paramètre B sur la réponse de la pile.

La figure (III.11) ci dessus est un graphique montrant la variation de la tension en fonction du courant et l'effet du paramètre B affectant la polarisation de la concentration d'une manière relativement sensible, on note que plus le coefficient de polarisation est élevé, plus la tension est faible. Le contrôle indirect de ce paramètre peut être utile pour le contrôle de la température.

III.4.10. Effet de la pression sur la polarisation

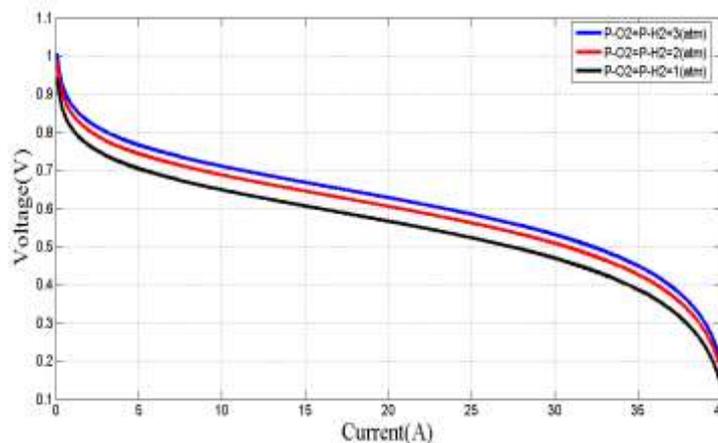


Figure III.12.effet de la pression sur la réponse de la pile.

Figure (III.12) montre la tension l'effet de la pression sur la courbe de polarisation générale de la pile où l'augmentation de la pression implique l'augmentation des performances de la cellule. Cette amélioration doit être en fonction d'une certaine pression admissible de la cellule autrement la température augment aussi à des valeurs indésirables provoquant des effets néfastes sur la pile. Ces variations impliquent que la température et la pression sont des facteurs de grande importance dans chaque cellule de la pile.

III.4.11. Effet de la densité max du courant J_{MAX} sur la polarisation

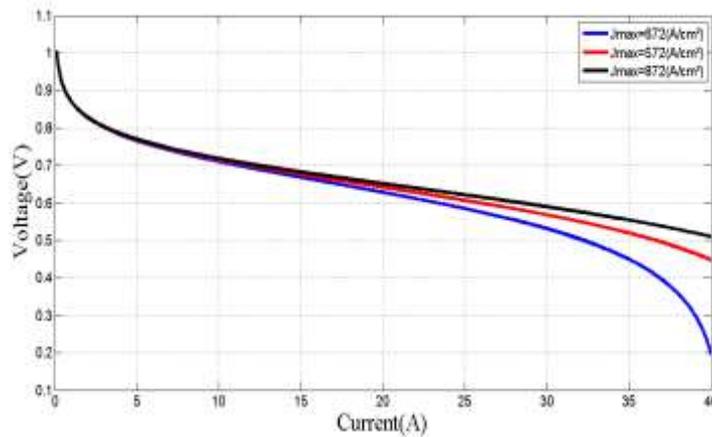


Figure III.13 Effet du paramètre J_{MAX} sur la réponse de la pile.

Figure (III.13) montre l'effet de la dimension géométrique et notamment la surface de la membrane et les électrodes sur la densité du courant qui influe proportionnellement sur la tension de sortie de la pile.

III.4.12. Effet de la résistance de contact R_C sur la polarisation

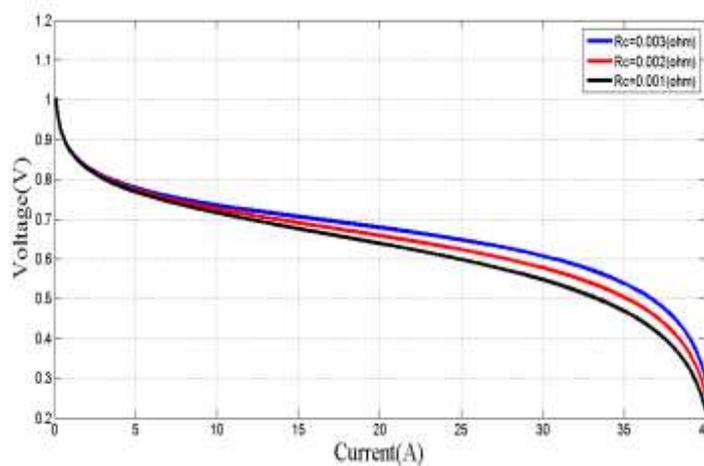


Figure III.14. effet du R_C sur la réponse de la pile.

La résistance de contact R_C est légèrement influente sur la tension et le rendement de la pile comparativement à la température et la pression.

III.4.13. caractéristiques hybride polarisation/puissance de la pile

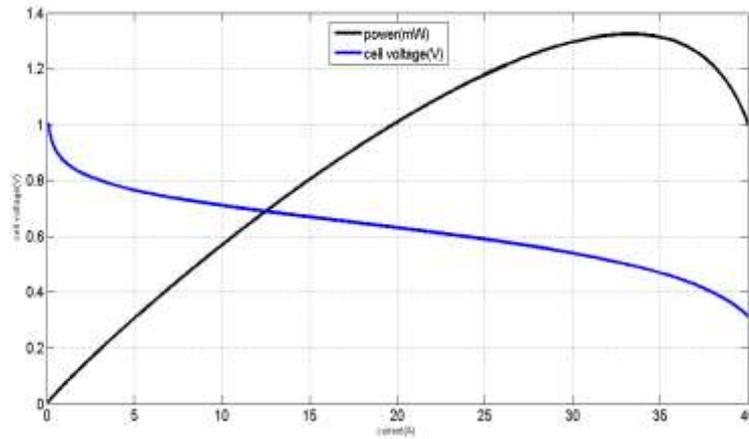


Figure III.15.Polarisation et puissance de la pile.

III.4.14.caractéristiquesde la tension de Nernst(E_{Nernst})

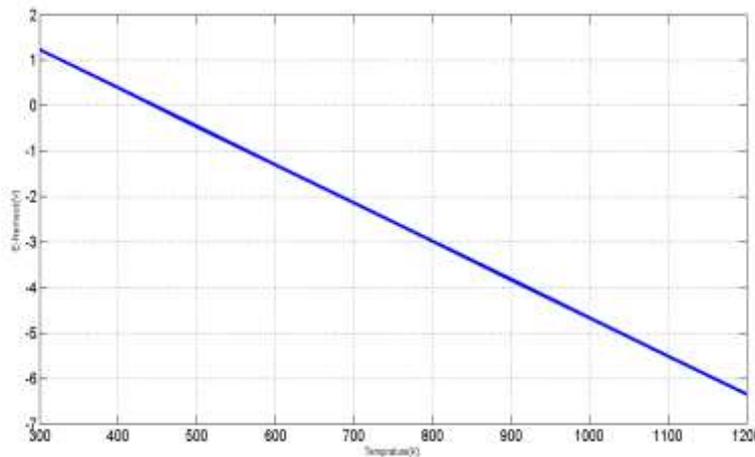


Figure III.16.E-Nernst en fonction de la Température.

Cette variation de Nernst confirme les allures présentées précédemment et l'influence de la température sur la tension et le rendement de la pile. Donc il y a toujours un seuil de température de fonctionnement à ne pas dépasser autrement le cœur de la pile où la membrane échangeuse de proton sera détériorée et c'est ainsi la dégradation totale de la pile. La PEMFC fonctionne T entre 80 et 120 °C.

III.4.15.Rendement de la pile

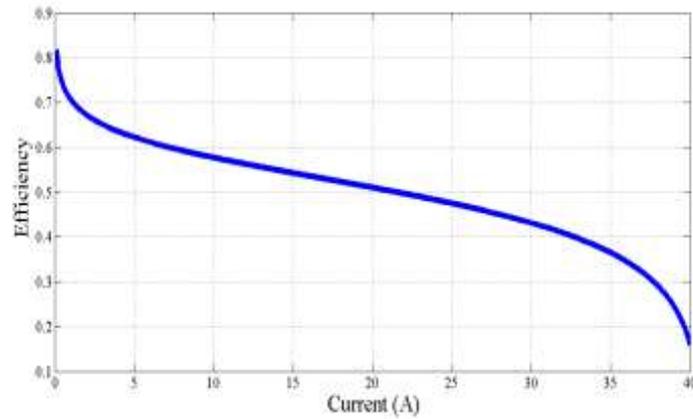


Figure III.17.Rendement en fonction du courant.

Le rendement varie intimement avec la polarisation et s’influent pratiquement par les même phénomènes cités ci-dessus avec le comportement de la caractéristique de la polarisation générale.

III.4.16. Effets de l’Hydrogène et l’oxygène sur le courant de la pile

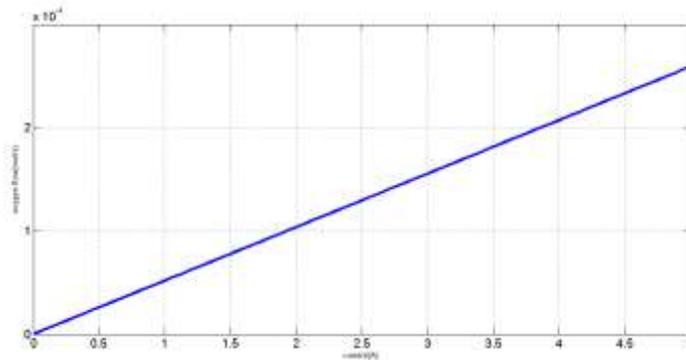


Figure III.18.Effet de l’oxygène en fonction du courant.

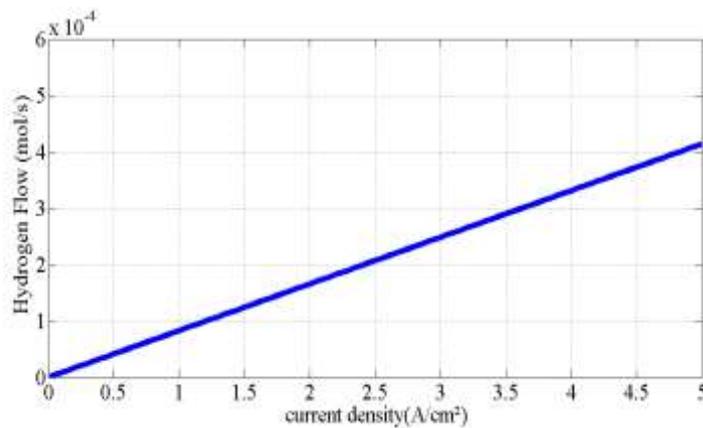


Figure III.19.Effet de l’hydrogène sur la densité du courant.

L'effet proportionnel de la consommation de l'hydrogène et de l'oxygène est flagrant sur le courant de la pile : plus le débit est grand plus la collecte d'électrons est important et la pile produise plus de puissance.

III.4.17.Effets du premier coefficient d'activation ξ_1 sur la polarisation de la pile

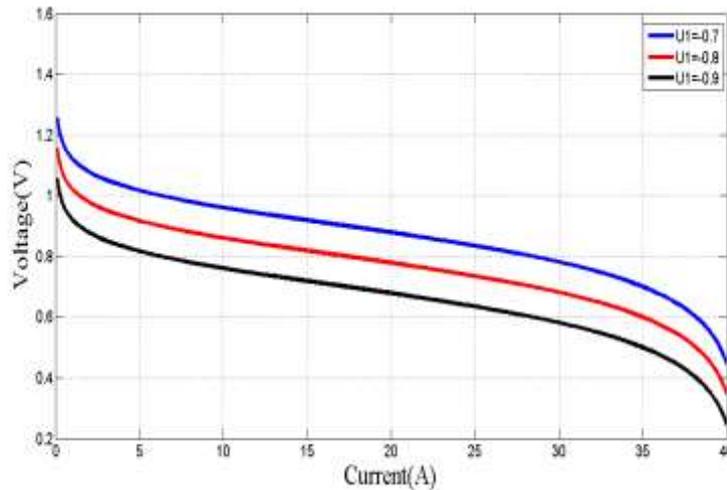


Figure III.20.Effet du ξ_1 sur la polarisation.

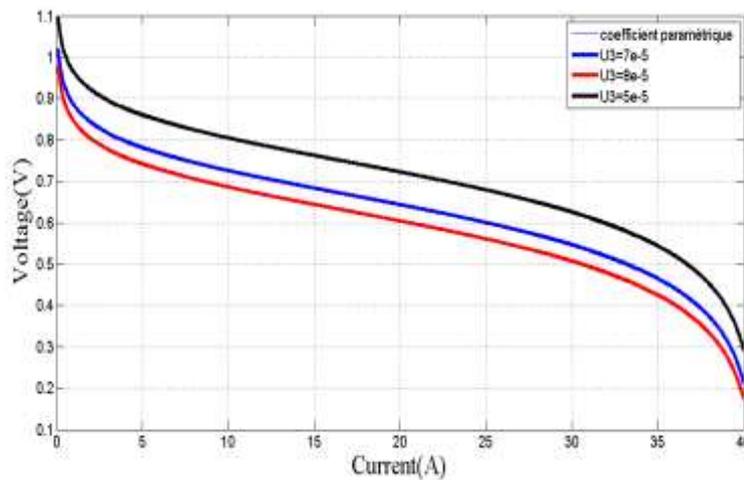


Figure III.21.Effet du ξ_3 sur la polarisation.

III.5. Modèle Dynamique générale de la PEMFC

Le fonctionnement en état dynamique de la pile implique la considération de tous les phénomènes mis en jeu dans un cycle complet de travail. Le développement du modèle en régime permanent consiste à observer les pertes d'activation, les pertes de concentration et les pertes ohmiques pour chaque cellule du PEMFC, cependant un modèle dynamique permet d'observer de plus le comportement thermodynamique et son influence sur l'évolution sur la caractéristique générale de la polarisation [84].

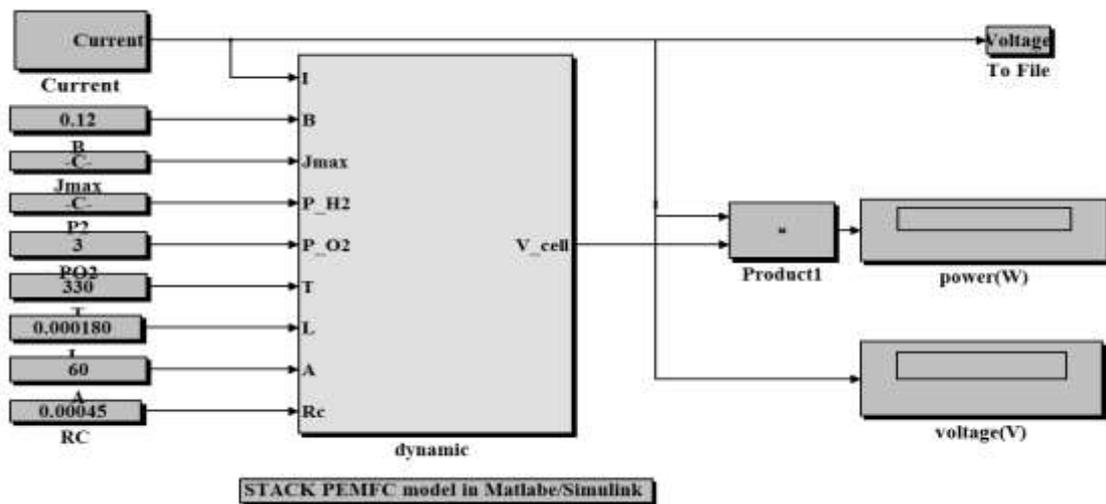


Figure III.22 .Modèle dynamique générale d'un PAC sous Matlab simulink.

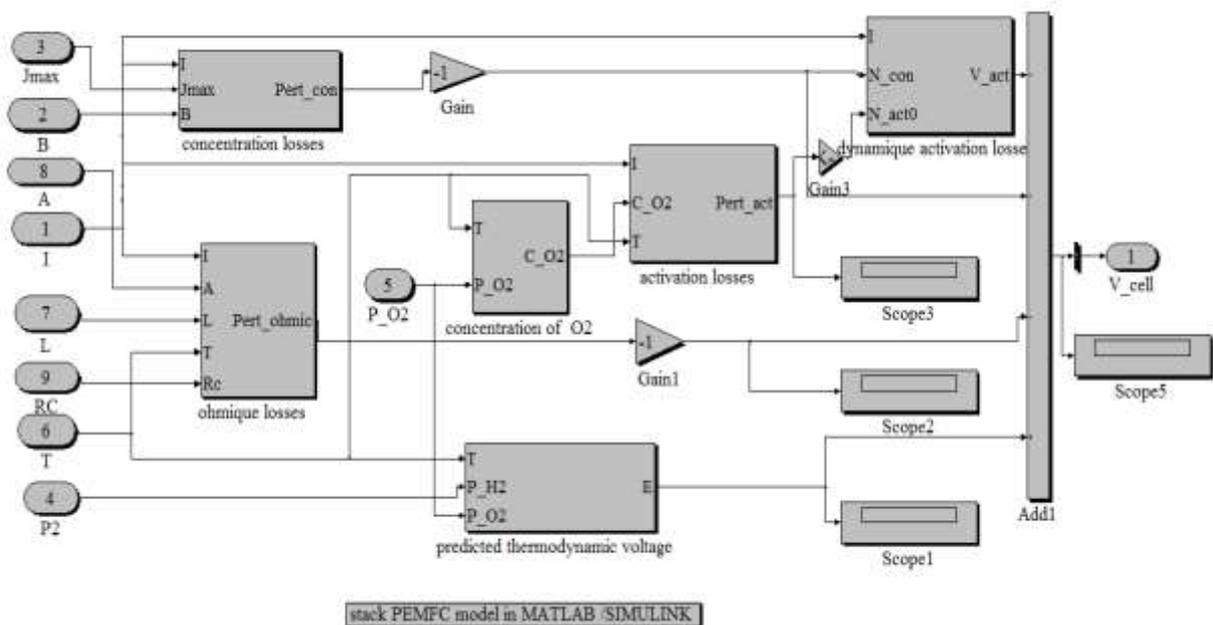


Figure III.23. Modèle dynamique d'une PAC.

III.5.1. la tension E-Nernst

La figure .III.24 ci-dessous illustre ce sous-système E Implémenter dans Matlab / Simulink avec une pression partielle des deux entrées de l'hydrogène et l'oxygène

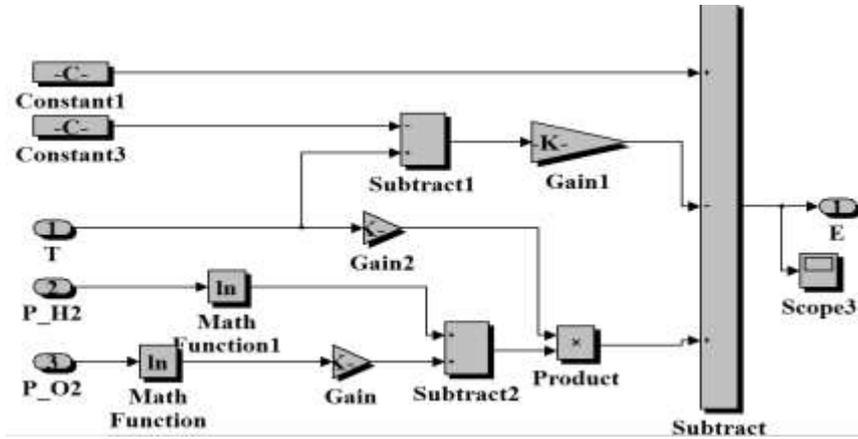


Figure III.24.Modèle dynamique de la tension E-Nernst.

Les équations (III.19-III.21) montrent la relation entre le gain de tension et la chute de tension des trois pertes.

$$n_{act} = -V_{act} \tag{III.19}$$

$$n_{ohm} = -V_{ohm} \tag{III.20}$$

$$n_{con} = -V_{con} \tag{III.21}$$

Les pertes de polarisation d'activation sont définies dans (III.7) La concentration de l'oxygène l'équation mathématique est basée sur l'équation(III.9).

III.5.2. la concentration oxygène(C_{O2})

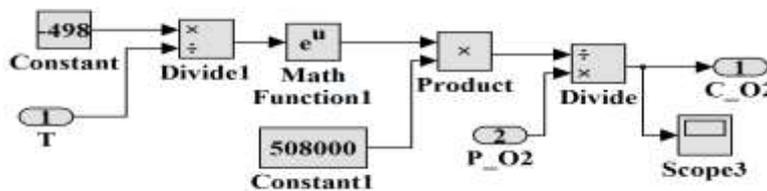


Figure III.25. Modèle dynamique de la concentration oxygène(C_{O2}).

III.5.3. Pertes activation

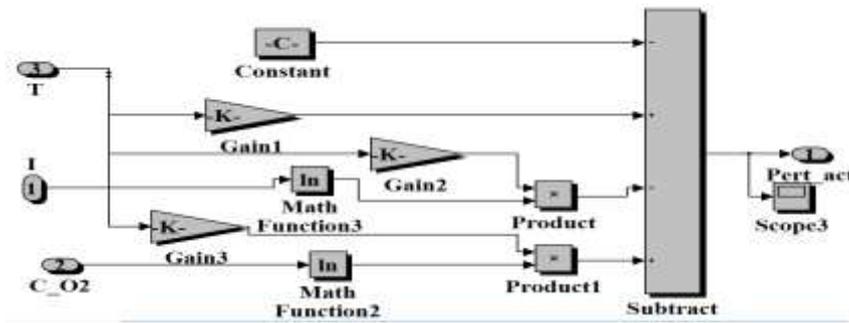


Figure III.26. Modèle dynamique de pertes d'activation.

III.5.4. Modèle Dynamique de perte Ohmique

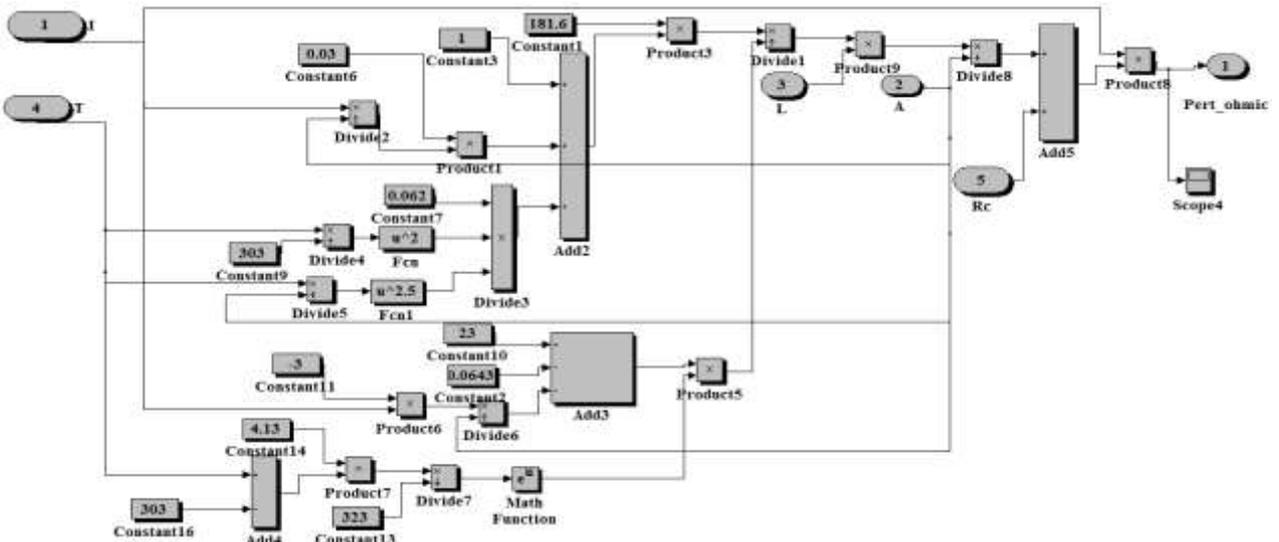


Figure III.27. Modèle dynamique de perte ohmique.

III.5.5. Modèle Dynamique de perte concentration

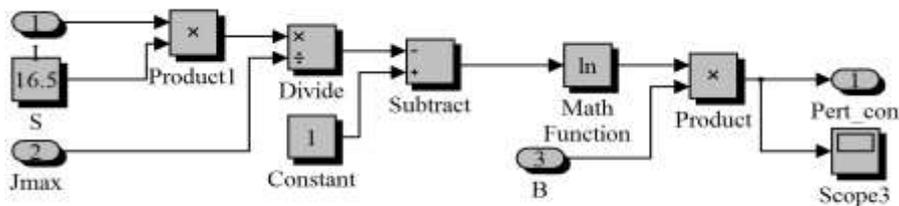


Figure III.28. Modèle dynamique de la perte de concentration.

III .6. Résultats de simulation du Modèle dynamique de la PEMFC

III .6.1.Caractéristique polarisation d'activation

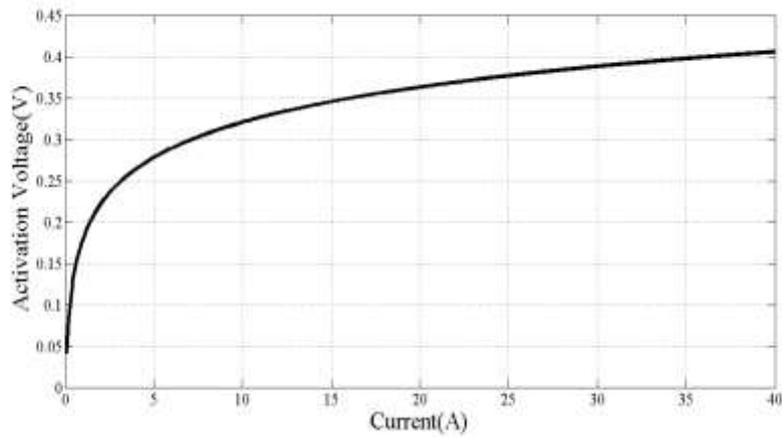


Figure III.29. Les pertes d'activation en fonction du courant.

III .6.2.Caractéristique polarisation d'Ohmic

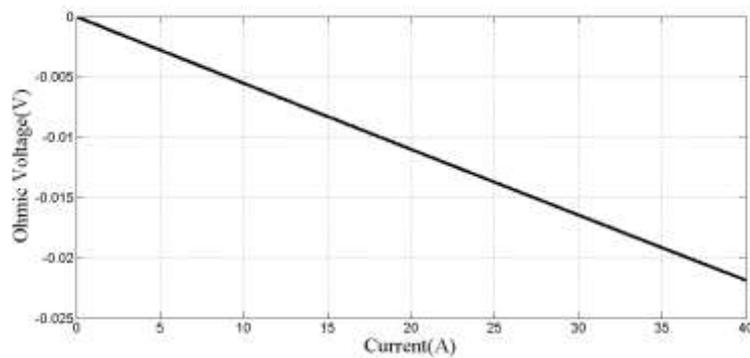


Figure III.30. Les pertes d'Ohmic en fonction du courant.

III .6.3.Caractéristique polarisation de concentration

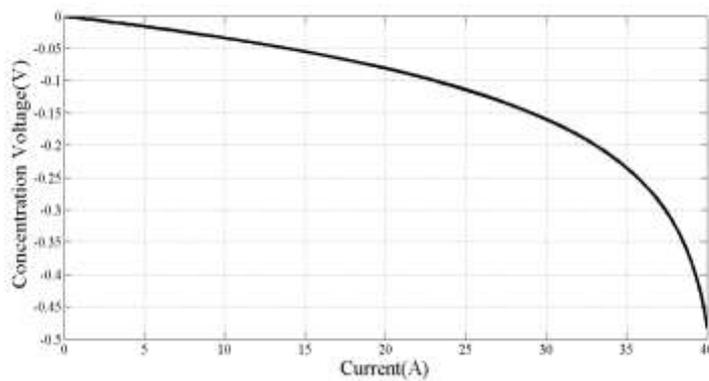


Figure.III.31.Les pertes de concentrations en fonction du courant.

III .6.4.Caractéristique de la puissance du PEMFC

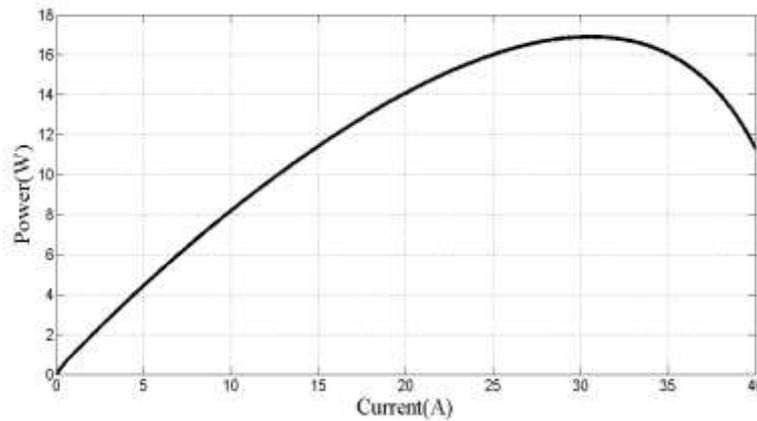


Figure III.32.la puissance de la PEMFC.

III .6.5.Caractéristique de polarisation (tension-courant)

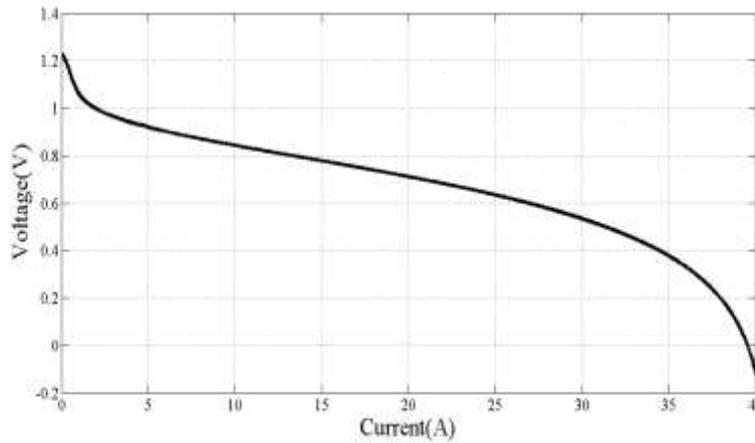


Figure III.33. Caractéristique de polarisation de la pile.

III .6.6.Effet du nombre de cellules sur la puissance de sortie

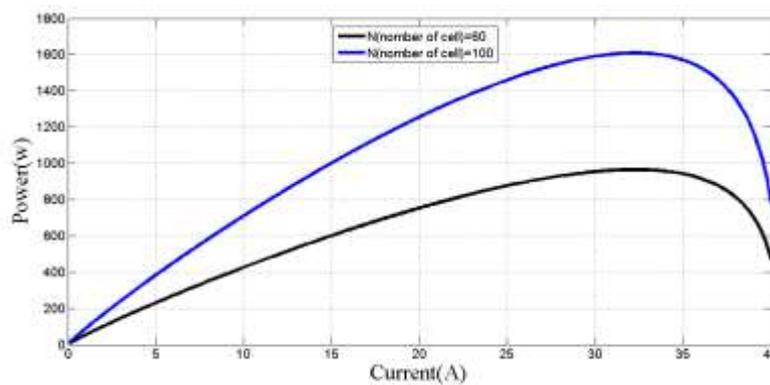


Figure III.34.Effet du nombre de cellules sur la puissance de la pile.

III .6.7.Effet de la constante de concentration B sur la polarisation

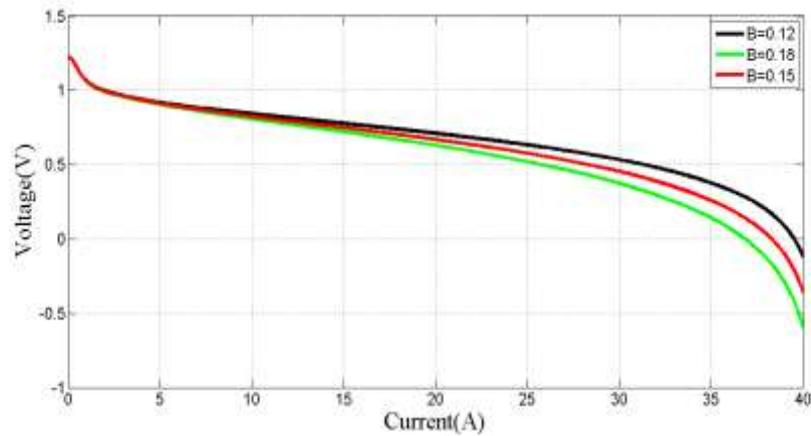


Figure III. 35. Effet du paramètre B sur la réponse de la pile.

III .6.8.Effet de la pression sur la polarisation

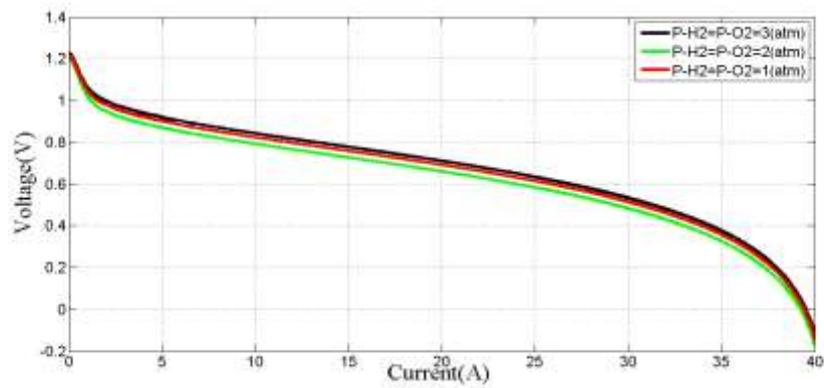


Figure III. 36. Effet de la pression sur la réponse de la pile.

III .6.9.Effet de la densité max du courant Jmax sur la polarisation

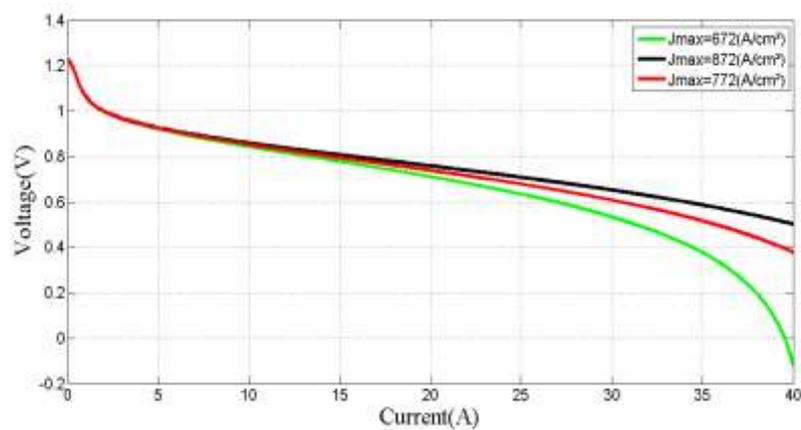


Figure III. 37. Effet du paramètre Jmax sur la réponse de la pile.

III .6.10.Effet de la résistance de contacte R_C sur la polarisation

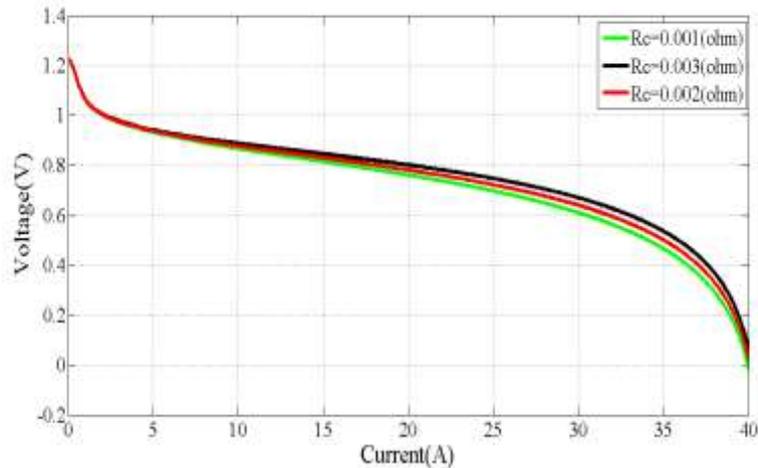


Figure III. 38. Effet du R_C sur la réponse de la pile.

III .6.11.Effet de la température sur la polarisation (tension) de sortie

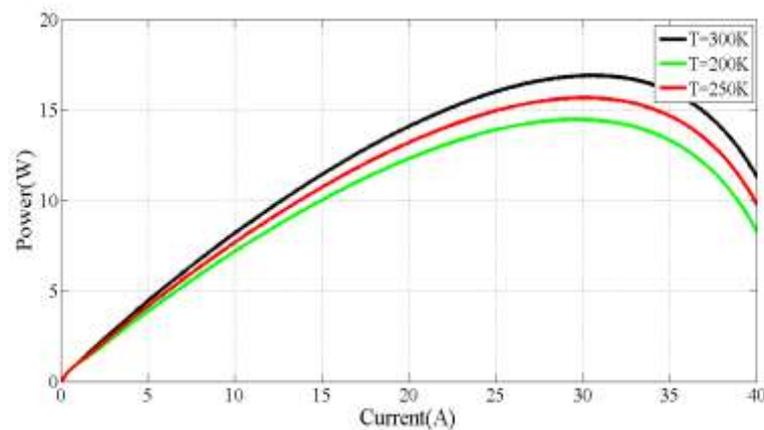


Figure III.39.Effet de la température sur la puissance de la pile.

Les résultats obtenus par les modèles dynamiques figures (III. 38- III.39) sont très semblables aux résultats obtenus par les programmes que nous avons élaborés et aux résultats publiés par d'autres auteurs ce qui confirme la performance du modèle dynamique réalisé.

6. CONCLUSION

Le principe du travail de la pile a été effectué sur la base d'opérations mathématiques et de fusion d'équations pour obtenir une équation générale qui explique l'effet de la température et de la pression de gaz très sensibles. Il existe des réglages tels que les paramètres R , A , L insensibles, y compris les sensibles comme B et tous ces facteurs nous affectent dans la capacité générée puis dans la performance la Pile. Ces équations ont été modélisées à l'aide de Matlab par élaboration des

programmes (scripts). Les résultats ont donné des idées plus claires pour comprendre les performances de la pile et semblables à ceux obtenus par Simulink du modèle dynamique. L'influence de la température, la pression, le débit d'hydrogène et d'oxygène et la surface des électrodes et de la membrane forment les éléments les plus influents sur la performance de la pile PEMFC.

A decorative border resembling a scroll, with a blue outline and grey shaded areas at the top-left and bottom-left corners, framing the text.

Chapitre IV :
Control classique
et
Intelligent PEMFC

IV.1.Introduction

Le contrôle de la pile à combustible demeure très intéressant pour aboutir à des performances plus compétitives dans le domaine des sources nouvelles de l'énergie électrique. Les techniques du contrôle classique ou conventionnelles restent un choix à adopter pour une variante de contrôle simple, efficace et non couteux comme celui à base du contrôleur PID. Cependant les techniques nouvelles et intelligent offrent actuellement des options très efficaces et plus optimales techniquement et qui s'imposent constamment comme les contrôleurs flous.

IV.2.Les Régulateurs Classiques

Dans les études des systèmes asservis c'est la fonction mathématique du régulateur qui est utile, c'est-à-dire la connaissance de sa fonction de transfert. Un régulateur est composé d'un élément, qui effectue la différence entre la mesure et la consigne, appelé comparateur ou soustracteur et d'un correcteur (Figure IV.1). Le correcteur élabore une valeur de sortie en fonction de l'écart constaté par le comparateur afin de corriger l'évolution de la grandeur à maîtriser du procédé. La fonction de transfert du correcteur est notée $C(p)$ [85].

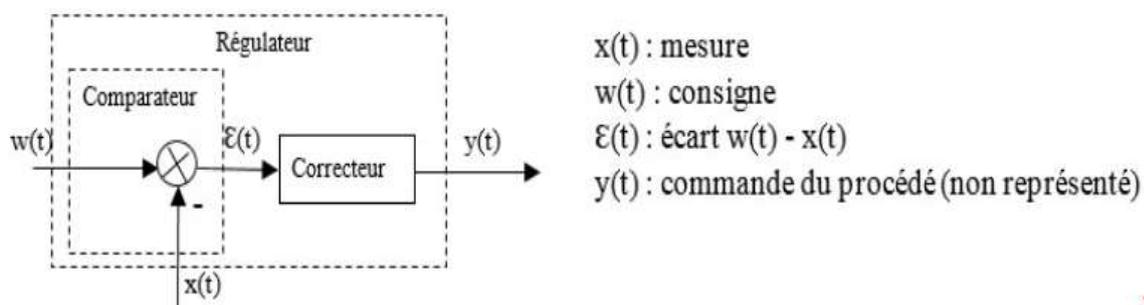


Figure IV.1.Composition de la fonction du régulateur [86].

La commande appliquée au système doit être limitée (notamment en amplitude) afin d'éviter un mauvais fonctionnement : au mieux l'actionneur sature et la commande appliquée au système est maximale (dans ce cas, il y a plus de régulation), au pire on risque de détruire l'actionneur ou le système.

Ces qualités s'évaluent en général en appliquant au système une entrée en forme d'échelon. On verra dans la pratique que ces exigences de performances ne peuvent être satisfaites de manière idéale. On adoptera alors un compromis en fonction des priorités du cahier des charges.

L'objectif est que la variable commandée, représentée par la sortie $s(t)$, ait un comportement désiré sur un intervalle de temps donné. Il s'agit alors de déterminer le signal de commande $u(t)$ qui, dans cet intervalle, garantisse la sortie $s(t)$ désirée.

On peut réaliser la compensation en insérant, dans une chaîne, un correcteur directement en cascade avec les autres éléments.

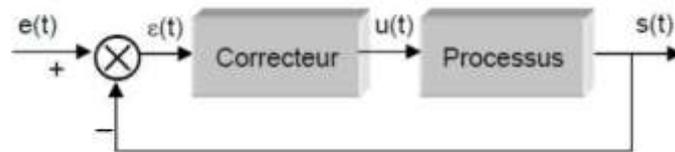


Figure IV.2. Correcteur directement en cascade avec les autres éléments [87].

La loi qui permet l'élaboration du signal de commande dépend de la structure interne du correcteur, c'est-à-dire de sa fonction de transfert. L'algorithme, ou loi de commande, du régulateur le plus classique est l'association des trois actions élémentaires des PID (Proportionnelle, Intégrale et Dérivée) : c'est le régulateur PID.

IV.2.1. Régulateurs classiques de base

Un régulateur est un correcteur est un algorithme de calcul qui délivre un signal de commande à partir de la différence entre la consigne et la mesure. Les correcteurs industriels les plus utilisés peuvent être classés, selon leurs actions de correction, de la manière suivante [88] :

- Correcteur à action proportionnelle (P),
- Correcteur à action intégrale (I),
- Correcteur à actions proportionnelle et intégrale (PI),
- Correcteur à action dérivée (D),
- Correcteur à actions proportionnelle et dérivée (PD),
- Correcteur à actions proportionnelle, intégrale et dérivée (PID).

A. Correcteur à Action Proportionnelle (P) :

- **Principe** : Le correcteur à action proportionnelle, est le correcteur le plus simple, puisque défini par un simple gain K .

La relation entre la sortie du correcteur (ou signal de commande) $u(t)$ et le signal d'entrée du correcteur (signal d'erreur) $\varepsilon(t)$ est :

$$u(t) = K_P \cdot \varepsilon(t) \quad (\text{IV.1})$$

La fonction de transfert est :

$$C(p) = \frac{u(p)}{\varepsilon(t)} = K_P \quad (\text{IV.2})$$

Où K_P : gain proportionnel.

Quelques soient le mécanisme et la source d'énergie utilisés, le correcteur proportionnel est essentiellement un amplificateur à gain variable. Son schéma fonctionnel est celui de la figure suivante :

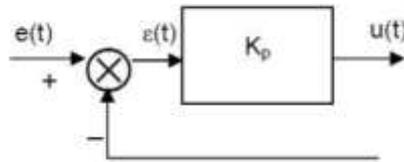
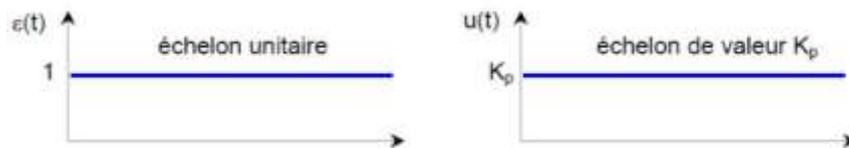


Figure IV.3. Correction à actions proportionnelle [88].



. Figure IV.4. la réponse indicielle du correcteur P et Entrée et sortie du correcteur P [89].

- **Effet** : L'action proportionnelle P crée un signal de commande $u(t)$ proportionnel au signal d'erreur $\varepsilon(t)$. Elle agit donc principalement sur le gain du système asservi et permet d'améliorer notablement la précision.

➤ **L'action proportionnelle** :

- Entraîne une augmentation du gain, d'où une diminution de l'erreur statique (amélioration de la précision) , mais
- Augmente la bande passante du système, ce qui
- Améliore la rapidité du système et,
- Augmente l'instabilité du système.

Le correcteur proportionnel P n'est généralement pas utilisé seul ; tout correcteur possède au moins l'action proportionnelle.

On constate que l'augmentation de K_p entraîne :

- une amélioration de l'erreur statique,
- une décroissance du temps de montée,
- une faible amélioration du temps d'établissement,
- mais également une diminution de la marge de phase et une augmentation du dépassement (augmentation de l'instabilité du système).

B. Régulateur à Action Intégrale (I) :

➤ **Principe :** La relation entre la sortie $u(t)$ et le signal d'erreur $\varepsilon(t)$ est :

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i \cdot \varepsilon(t) \tag{IV.3}$$

Ou encore :

$$u(t) = K_i \int_0^t \varepsilon(t) dt \tag{IV.4}$$

La fonction de transfert est :

$$C(p) = \frac{u(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{K_i}{p} = \frac{1}{T_i p} \tag{IV.5}$$

K_i : gain intégral et T_i : constante de temps d'intégration.

Son schéma fonctionnel est celui de la figure suivante :

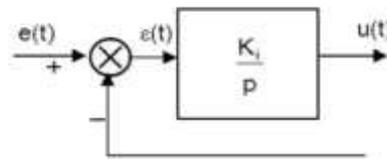


Figure IV.5. Correction à actions intégrale.

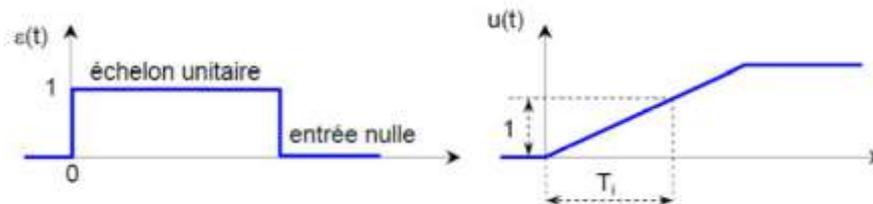


Figure IV.6. La figure ci dessus donne la réponse indicielle du correcteur Intégrale [90].

➤ **Effet :** L'intérêt principal de ce correcteur est d'ajouter dans la chaîne de commande une intégration. Nous savons que la présence d'une intégration dans la FTBO augmente la classe du système et réduit ou annule, selon le type d'entrée, l'erreur statique du système.

L'action intégrale pure :

- Améliore la précision en réduisant ou annulant l'erreur statique, mais Introduit un déphasage de -90° qui risque de déstabiliser le système (diminution de la marge de phase).
- Le correcteur à action exclusivement Intégrale n'est pratiquement jamais utilisé, en raison de sa lenteur et de son effet déstabilisant. Il est, en général, associé au correcteur Proportionnel .

C. Régulateur à Action Dérivée (D) :

➤ **Principe :** La relation entre la sortie $u(t)$ et le signal d'erreur $\varepsilon(t)$ est :

$$u(t) = \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \cdot K_d \tag{IV.6}$$

La fonction de transfert est :

$$C(p) = \frac{u(p)}{\varepsilon(p)} = K_d \cdot p = T_d \cdot p \tag{IV.7}$$

K : gain dérivé,

T_d : Constante de temps de dérivation.

Son schéma fonctionnel est celui de la figure suivante :

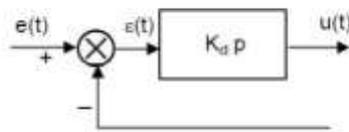


Figure IV.7 Correction à actions dérivée [91].

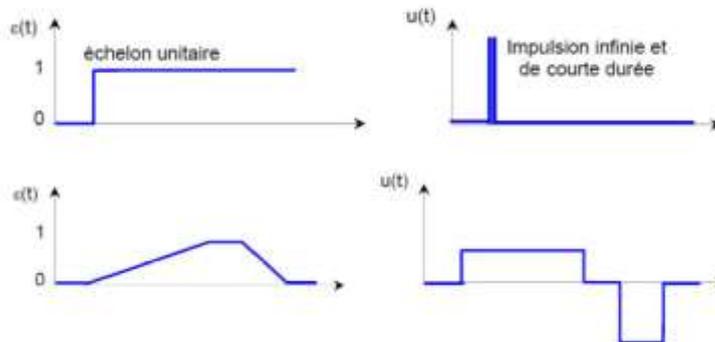


Figure IV.8. Réponses à un échelon et à une rampe du correcteur D.

Entrée et sortie du correcteur à action dérivée (D) [91].

➤ **Effet :** La réponse indicielle montre qu'un correcteur à action exclusivement dérivée ne permet pas la transmission d'un signal L'action dérivée ne peut donc être utilisée seule. On fait appel à elle lorsque le signal de commande u doit être particulièrement efficace. En effet, ce correcteur permet de faire intervenir la dérivée du signal d'erreur; il sera d'autant plus actif que la variation de $\varepsilon(t)$ est rapide.

L'action dérivée pure :

- améliore la stabilité du système par l'introduction d'un déphasage supplémentaire de $+ 90^\circ$ (augmentation de la marge de phase),

- mais fait diminuer la précision du système,
- et amplifie les bruits de hautes fréquences.

Le correcteur à action exclusivement dérivée n'est pratiquement jamais utilisé, il est en général associé au correcteur Proportionnel .

D. Régulateur à Actions Proportionnelle, Intégrale et Dérivée (PID) :

➤ **Principe :** Le correcteur PID combine les actions des 3 correcteurs P, I et D [92].

La relation entre la sortie $u(t)$ et le signal d'erreur $\varepsilon(t)$ est :

$$u(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_i \cdot \int_0^t \varepsilon(t) dt + \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \cdot K_d \tag{IV.8}$$

La fonction de transfert est :

$$C(p) = \frac{u(p)}{\varepsilon(p)} = K_p + \frac{K_i}{p} + K_d \cdot p = K_p \left(1 + \frac{K_d}{K_p} \cdot p + \frac{K_i}{K_p} \frac{1}{p} \right) = K_p \left(1 + T_d \cdot p + \frac{1}{T_i p} \right) \tag{IV.9}$$

K : gain proportionnel. K_i : gain intégral. K_d : gain dérivé,

$T_d = K_d / K_p$: constante de temps de dérivation.

$T_i = K_p / K_i$: constante de temps d'intégration.

Son schéma fonctionnel est celui de la figure suivante :

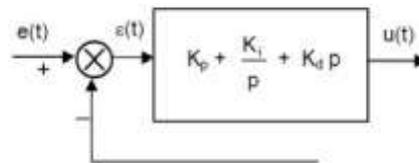


Figure IV.9. Correction à actions proportionnelle, intégrale et dérivée (PID) [93].

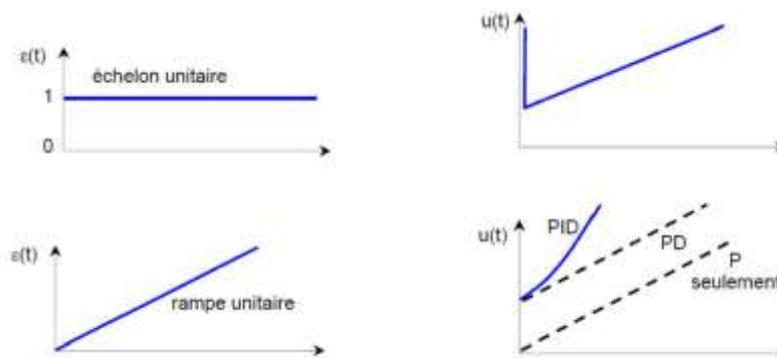


Figure IV.10. Réponses indicielle : Entrée et sortie du correcteur à actions proportionnelle, intégrale et dérivée [93].

➤ **Effet** : Les effets de chaque correcteur (K_p , K_i et K_d) sur la réponse en boucle fermée du système sont regroupés sur le tableau IV.1 :

	Temps de montée	Déplacement	Temps d'établissement	Erreur statique
Si K_p croit	Diminue	Augmente	(Peu de changements)	Diminue
Si K_i croit	Diminue	Augmente	Augmente	Éliminée
Si K_d croit	(Peu de changements)	Diminue	Diminue	(Peu de changements)

Tableau IV.1 : Effets des correcteurs P, I, et D sur les régimes statique et dynamique du système en boucle fermée [94].

IV.3. Application du Correcteur PID pour le contrôle de la pile PEMFC

IV.3.1. Modélisation du PEMFC objet du contrôle

Le modèle détaillé comprend les débits de carburant et d'oxydants, la pression, la composition du carburant et des oxydants et la température. En faisant varier les facteurs ci-dessus dans le cadre de la variation du signal dans Simulink, le changement suivant est observé :

- Tension en circuit ouvert (E_{oc})
- Courant d'échange (i_0)
- Pente du Tafel (A)

Les équations de la tension en circuit ouvert, du courant d'échange et de la pente de Tafel sont présentées dans la présente section. Le circuit équivalent du modèle détaillé est le même que pour le modèle simplifié, mais avec plus de paramètres inclus et des valeurs de tension en circuit ouvert, le courant d'échange et la pente Tafel. Le modèle détaillé est interprété par trois blocs également illustrés dans la Figure (IV.11) ci-dessous [95] :

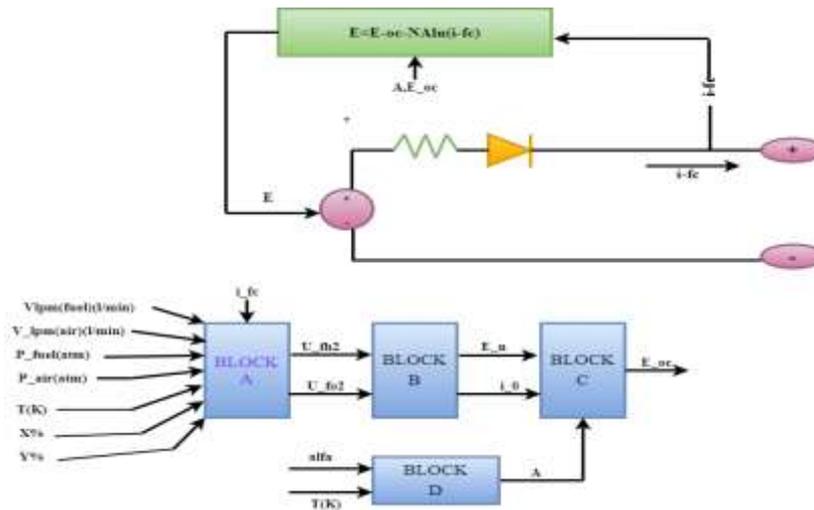


Figure IV.11. Un modèle simplifié d’une PAC.

Bloc A : Dans le bloc (A), des facteurs tels que le débit de carburant, le débit d'air, la pression partielle du carburant, la pression partielle de l'air, la température de fonctionnement, le pourcentage d'hydrogène dans le carburant, le pourcentage d'oxygène dans l'air et la forme de rétroaction Le courant de la pile à combustible varie sur le base sur laquelle l'utilisation du carburant et de l'air est obtenue.

Bloc B : Dans le bloc (B), la tension en circuit ouvert et le courant d'échange sont obtenus en fonction de l'utilisation de carburant et d'air du bloc (A).

Bloc C : Dans le bloc (C), les valeurs de pente de Tafel sont obtenues en prenant en compte des paramètres tels que le coefficient de transfert de charge α , l'énergie libre de Gibbs G et la constante d'équilibre de réaction (K_C). Obtenu à partir de la courbe de polarisation de la fiche technique du fabricant, ainsi que d'autres paramètres tels que le faible pouvoir calorifique de la pile. , température pression, composition du carburant et de l'air.

$$E_{OC} = N(E_n - A \ln(i_0)) \tag{IV.10}$$

E_{OC} : La tension en circuit ouvert

E_n : Le potentiel de Nernst, qui est la potentielle thermodynamique des cellules

N : Le nombre de cellule

A : La pente de Tafel

i_0 : Le courant d'échange, qui est le courant produit par le flux continu en va-et-vient d'électrons vers et depuis l'électrolyte

$$A = \frac{RT}{zF\alpha} \tag{IV.11}$$

R : 8.3145 J/ (mol K)

T : La température de fonctionnement

z : Nombre d'électrons

F : 96485 A s/mo

α : Coefficient de transfert de charge

$$i_0 = \frac{zFk(P_{H_2}+P_{O_2})}{Rh} e^{\frac{\Delta G}{RT}} \quad (\text{IV.12})$$

P_{H_2} : La pression partielle d'hydrogène

P_{O_2} : La pression partielle d'oxygène

ΔG : Le volume de la barrière d'activation

h : Constante de Planck = $6.626 \cdot 10^{-34}$ J s

z : Nombre d'électrons

k : Constante d'Oltzmann = $1.38 \cdot 10^{23}$ J⁰K

$$U_{f_{H_2}} = \frac{6000.R.T.N.i_{fc}}{2FP_{Fuel}V_{lpm}(fuel).x\%} \quad (\text{IV.13})$$

$$U_{f_{O_2}} = \frac{6000.R.T.N.i_{fc}}{2FP_{air}V_{lpm}(air).y\%} \quad (\text{IV.14})$$

$U_{f_{H_2}}$: Taux de conversion de l'hydrogène

$U_{f_{O_2}}$: Taux de conversion de l'oxygène

$V_{lpm}(fuel)$: Débit de carburant (l/min)

$V_{lpm}(air)$: Débit d'air (l/min)

P_{Fuel} : Pression absolue de l'alimentation en carburant (atm)

P_{air} : Pression absolue de l'alimentation en air (atm)

$x\%$: Le pourcentage d'hydrogène dans le carburant (%)

$y\%$: Le pourcentage d'oxygène dans l'oxydant (%)

$$P_{H_2} = P_{fuel}x\%(1 - U_{f_{H_2}}) \quad (\text{IV.15})$$

$$P_{O_2} = P_{Air}y\%(1 - U_{f_{O_2}}) \quad (\text{IV.16})$$

$$P_{P_{H_2O}} = P_{Air}(w\% + 2y\%U_{f_{O_2}}) \quad (IV.17)$$

w : La proportion de vapeur d'eau dans l'oxydant (%)

$$E_n = \begin{cases} 1.229 + (T - 298) \frac{-44.43}{zF} + \frac{RT}{zF} \ln \left(P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}} \right) & T \leq 100^\circ C \\ 1.229 + (T - 298) \frac{-44.43}{zF} + \frac{RT}{zF} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right) & T > 100^\circ C \end{cases} \quad (IV.18)$$

A partir des pressions partielles des gaz et de la tension de Nernst, les nouvelles valeurs de la tension en circuit ouvert (E_{OC}) et du courant d'échange (i_0) peuvent être calculées. Le bloc C calcule la nouvelle valeur de la pente de Tafel (A). Les paramètres α , ΔG et k sont calculés sur la base de la courbe de polarisation aux conditions de fonctionnement nominales ainsi que de certains paramètres supplémentaires, tels que le faible pouvoir calorifique (LHV), l'efficacité de la cheminée, la composition du carburant et de l'air, la pression d'alimentation et les températures. Les taux de conversion nominaux du gaz sont calculés comme suit :

$$U_{f_{H_2}} = \frac{\eta_{nom} \Delta h^0(H_2O(gas))N}{zFV_{nom}0.21} \quad (IV.19)$$

η_{nom} : Rendement nominal LHV de la cheminée (%)

V_{nom} : Tension nominale (V)

$\Delta h^0(H_2O(gas))=241.83.10^3 J/mol$

$$U_{f_{O_2}} = \frac{6000RT_{nom}NI_{nom}}{2zFP_{air_{nom}}V_{lpm(air)_{nom}}.0.21} \quad (IV.20)$$

T_{nom} : Température de fonctionnement nominale (K^0)

$P_{air_{nom}}$: Pression d'alimentation en air absolue nominale (Pa)

$V_{lpm(air)_{nom}}$: Débit d'air nominal (l/min)

I_{nom} : Courant nominal (A)

IV.3.2. Paramètres d'entrée de la pile

Puissance de pile	Nominal(w)	5998.5
	Maximal(w)	8325
Résistance de la pile à combustible	0.07833	
Tension Nernst d'une cellule[En]	1.1288	
Nominal utilisation	Hydrogen(H2)	99.56%
	Oxydant(O2)	59.3%
Consommation nominale	Le carburant (slpm)	60.38
	Air(slpm)	143.7
Courant d'échange (A)	0.29197	
Exchange coefficient [alpfa]	0.60645	

Tableau IV.2. Paramètres nominaux de la pile à combustible.

Composition du carburant (%)	99.95	
Composition oxydante (%)	21	
Débit de carburant(lpm)	Nominal	50.06
	Maximum	84.5
Débit d'air(lpm)	Nominal	300
	Maximum	506.4
Température du système(K)	338	
Pression d'alimentation en carburant (bar)	1.5	
Pression d'alimentation en air(bar)	1	

Tableau IV.3. Paramètres de variation sinusale de la pile à combustible.

IV .3.3. Comportement de la pile PEMFC sans régulateur

Pile à combustible PEMFC choisie pour la simulation est de type 45V-dc, 6Kw

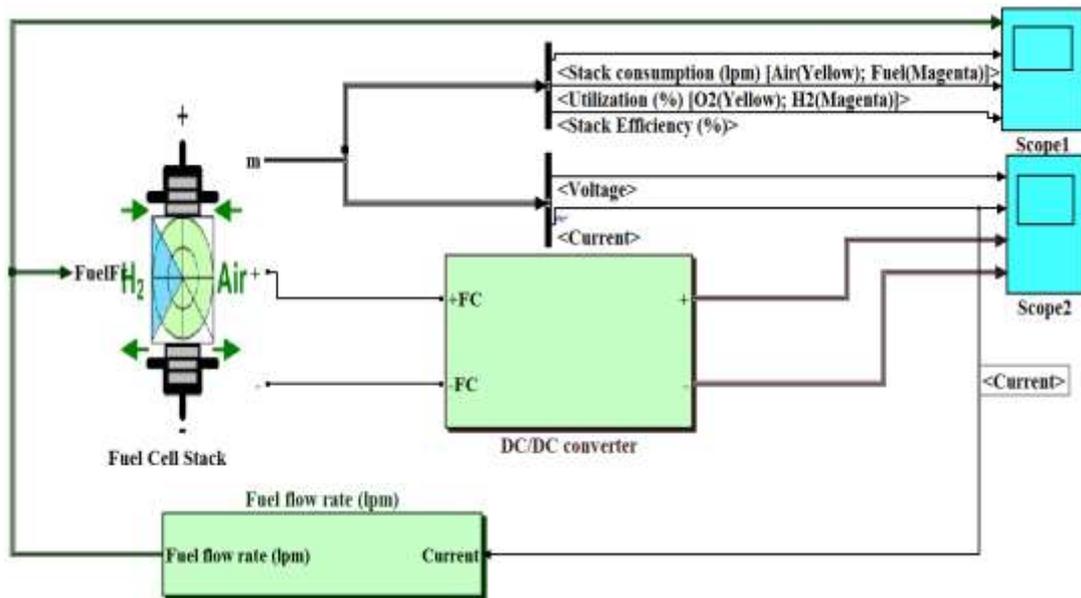


Figure IV.12.. PEMFC 45V-dc, 6Kw.

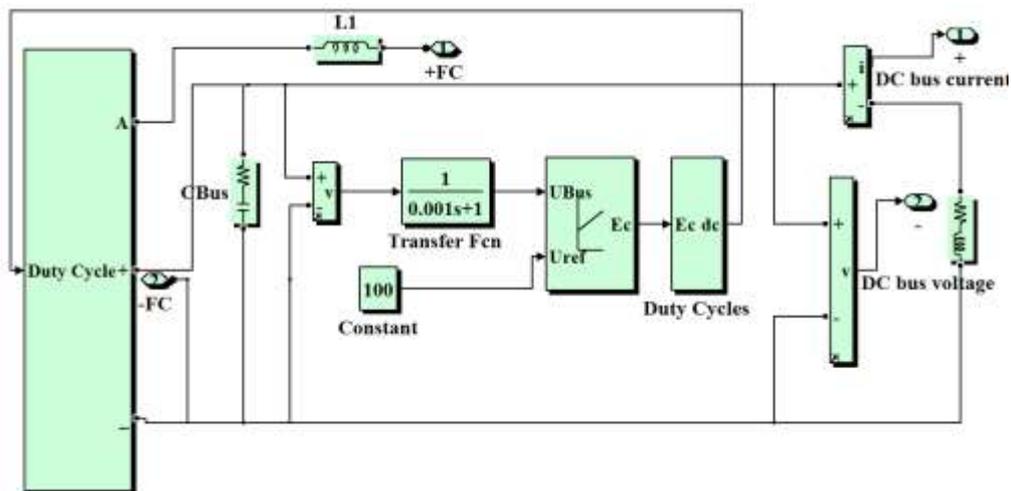


Figure IV.13. Le convertisseur DC/DC.

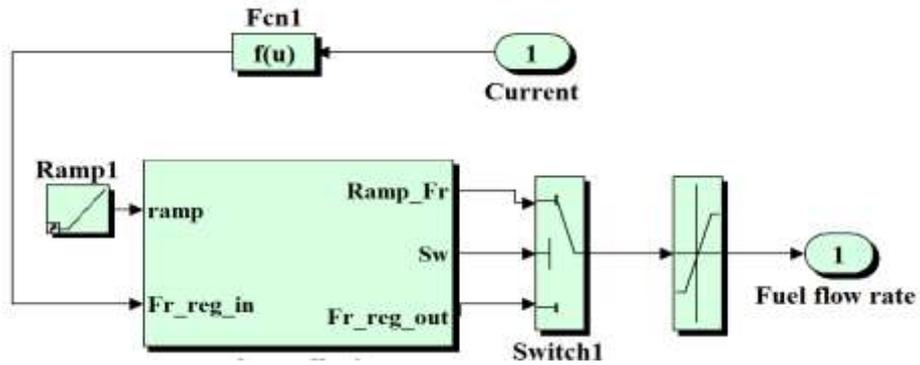


Figure IV.14. La fonction du Débit de combustible.

➤ Résultats et analyse de la pile PEMFC

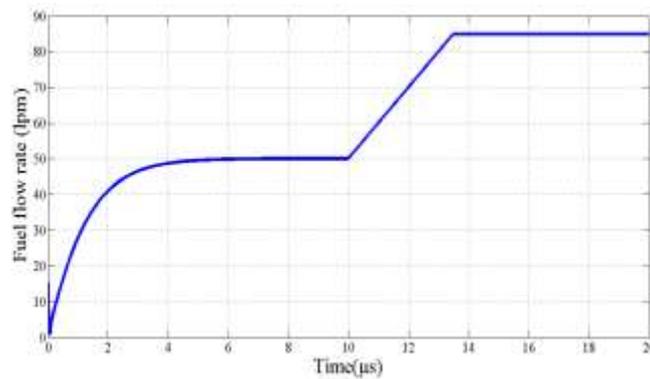


Figure IV.15. Débit du combustible.

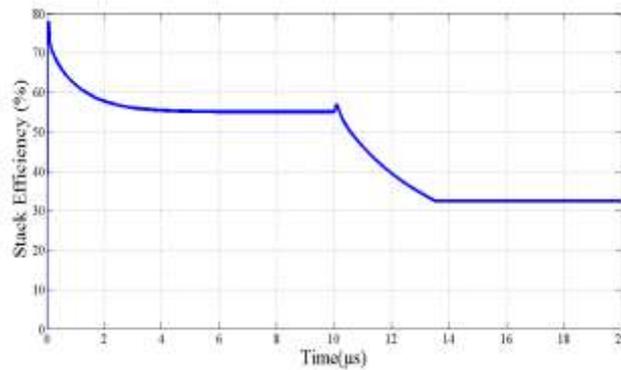


Figure IV.16. Rendement de la pile.

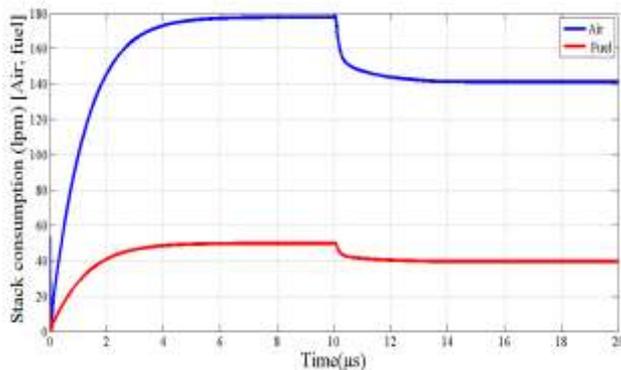


Figure IV.17. Consommation de pile (Air et Fuel)

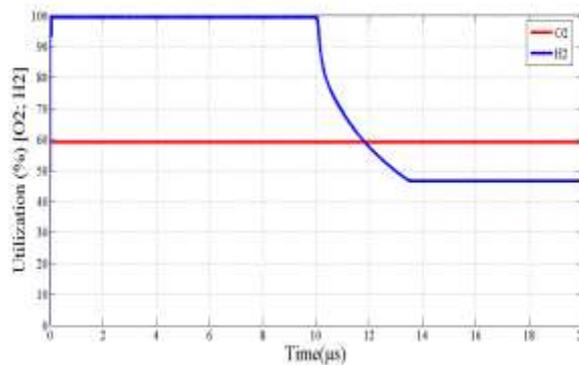


Figure IV.18. Utilisation de la O2 et H2.

A $t=0s$, le courant de charge est de 0 ampère et le convertisseur CC / CC applique 100 V CC à proximité de la charge (RL). La consommation de l'hydrogène est fixée à un taux nominal de 99,5%. Le courant monte et atteint 133 A. Le débit du combustible est généralement constant afin de pouvoir maintenir la consommation nominale de l'hydrogène. Le transitoire du régulateur de tension simulé se produit pour la valeur de tension la plus élevée de 122 Vcc

A $t = 10$ secondes, le débit de consommation du combustible passe de 50 à 85 litres par minute. Pendant 3,5 s, l'utilisation de l'hydrogène est réduite et, par conséquent, le courant de la cellule diminue en augmentant la tension Nernst. Dans la phase 1, il y a une diminution de du rendement et de la consommation de combustible dans la pile. La simulation est pendant 20 secondes, les valeurs du système restent inférieures augmentez la première tension. Dans la phase 1, il y a une diminution du rendement et de la consommation de pile. La simulation est pendant 20 secondes, les valeurs du système restent inchangées jusqu'à 10 secondes de simulation, le débit de l'hydrogène, le débit d'air, l'humidité et la température sont modifiés par la fonction de rampe jusqu'à ce que la simulation reste après 10 secondes.

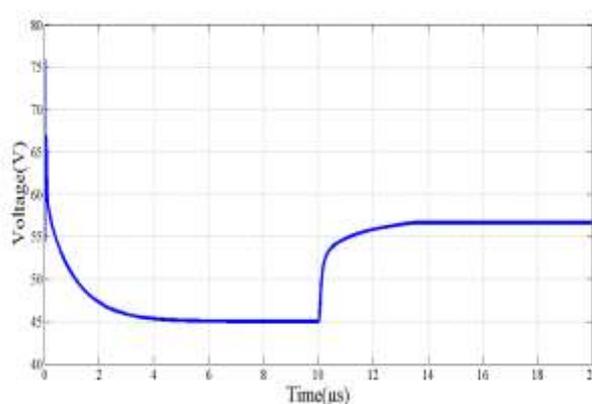


Figure IV.19. La tension de la pile.

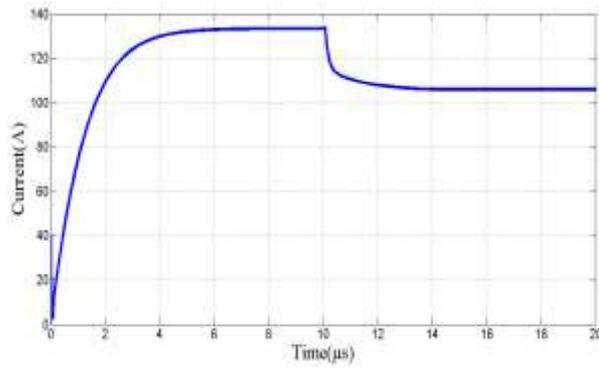


Figure IV.20. Le courant de la pile.

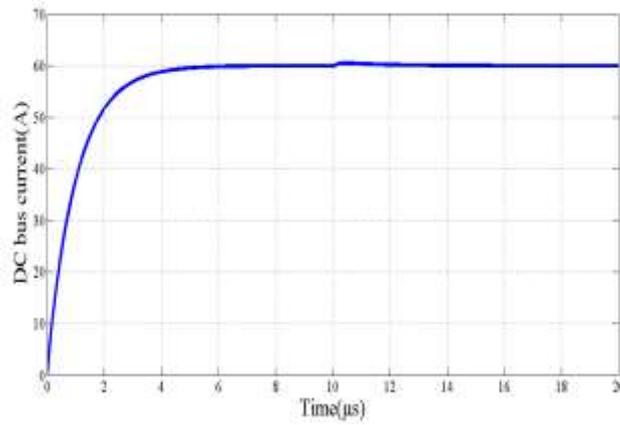


Figure IV.21. Le courant du convertisseur DC /DC.

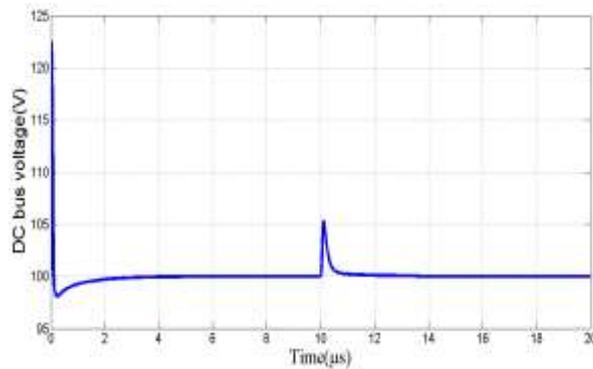


Figure IV.22. La tension du convertisseur DC /DC.

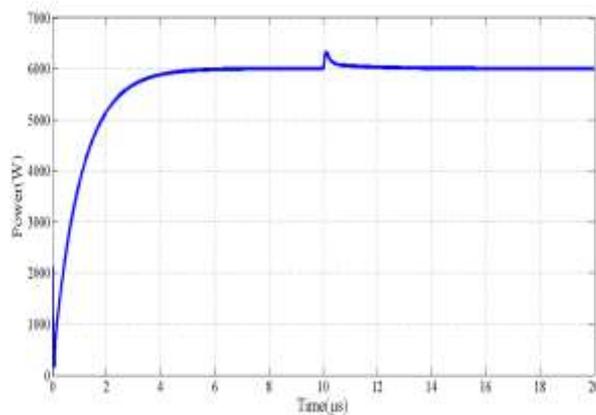


Figure IV.23. La puissance de la pile.

La première courbe de la Figure.IV.19 illustre la tension de sortie de la pile à combustible, où un comportement transitoire est observé au début, la tension de sortie nominale de la pile est de 45V-DC, mais en raison de ce comportement transitoire nous obtenons environ 65V qui descend et revient à une valeur nominale de 45 volts après environ une seconde. Après 10 secondes lorsque le régulateur de débit de combustible est évité et que le débit de combustible est au maximum, on constate une augmentation de la tension de la pile à combustible d'environ 5 volts. Le courant de la pile à combustible réagit en fonction de la tension au début lorsque la tension de la pile est au maximum, le courant est au minimum mais avec une diminution de la tension et du courant car le courant est aspiré par la charge.

IV .3.4. Control de la PEMFC avec le régulateur PID

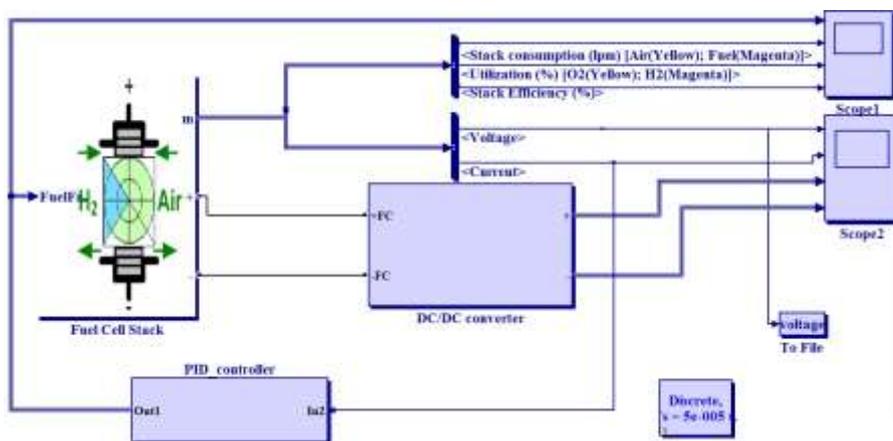


Figure IV.24.PEM (45V-dc, 6kW).

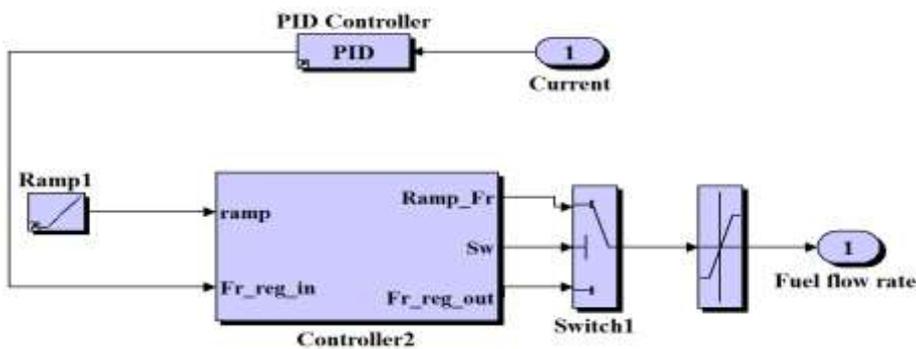


Figure IV.25.Control de l'hydrogène avec PID.

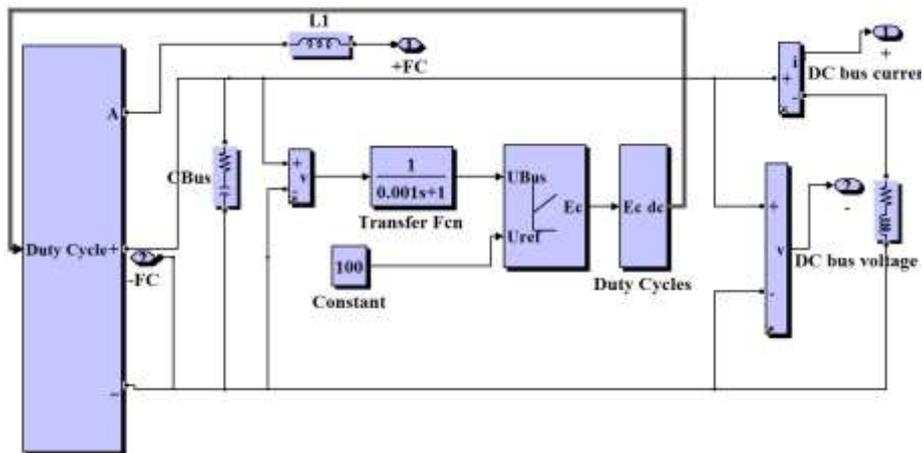


Figure IV.26. Le convertisseur DC/DC avec PID.

➤ Résultats et analyse de la pile PEMFC avec PID

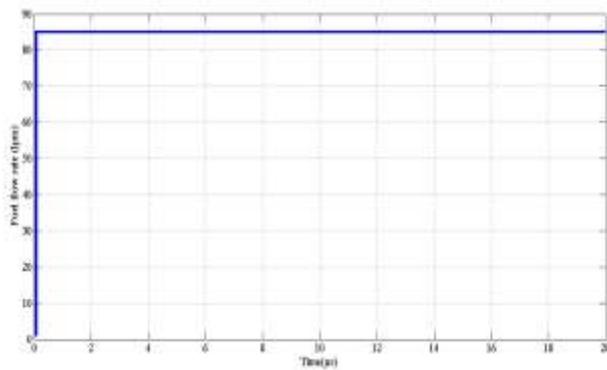


Figure IV.27. Débit de combustible.

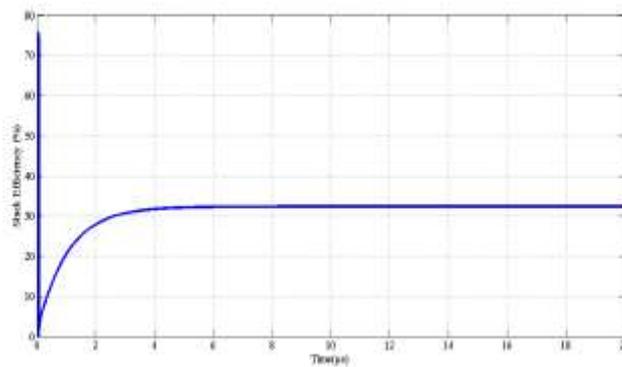


Figure IV.28. Le rendement de la pile.

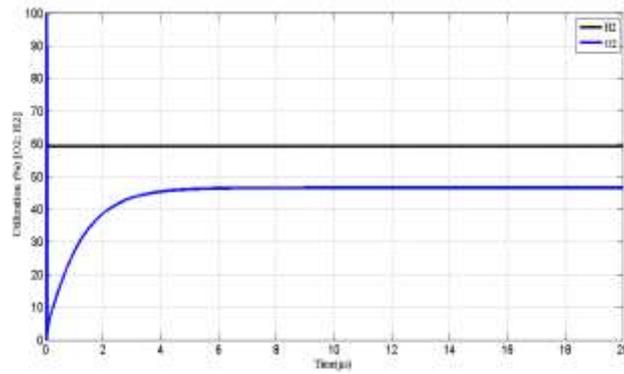


Figure IV.29.Utilisation de la O2 et H2.

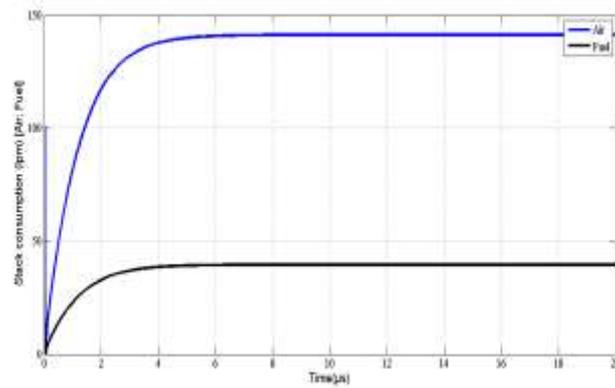


Figure IV.30.Consommation de pile (Air et Fuel).

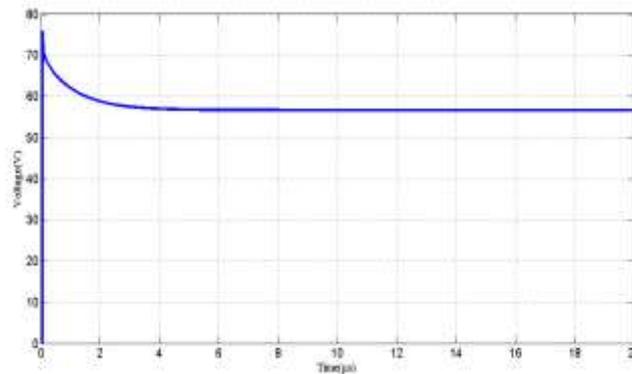


Figure IV.31.La tension de la pile.

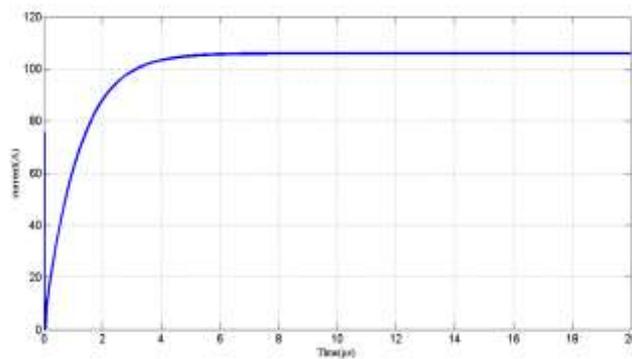


Figure IV.32.Le courant de la pile.

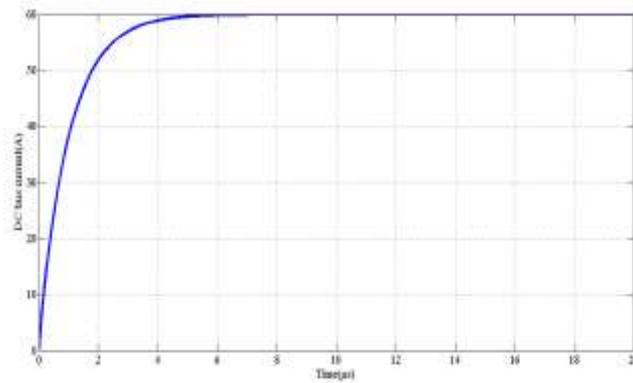


Figure IV.33. Le courant du convertisseur DC/DC.

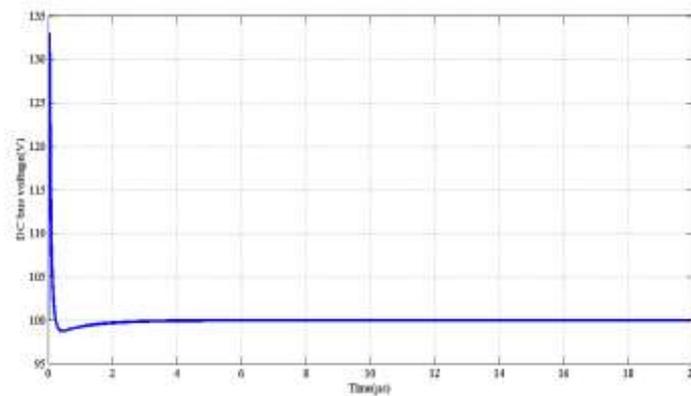


Figure IV.34. La tension du convertisseur DC/DC.

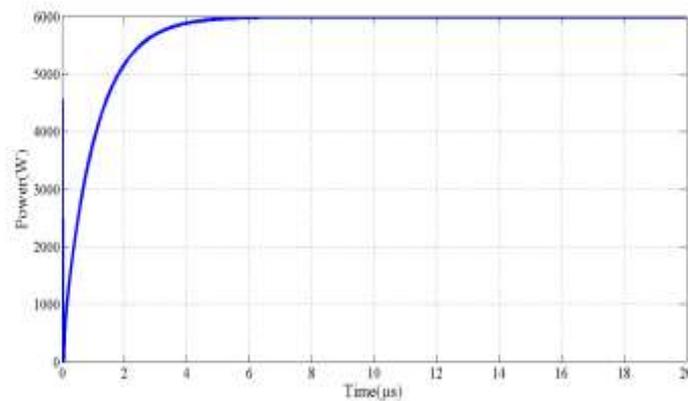


Figure IV.35. La puissance de la pile.

L'action du correcteur PID sur les différentes caractéristiques de la pile est constatée notamment dans les courbes de la tension, le courant est la puissance. Pour les paramètres liés à l'hydrogène et à l'oxygène l'action du PID était plus pertinente.

IV .3.5. La Logique Floue

La logique floue est très populaire aujourd'hui. En fait, il existe depuis longtemps et nous pouvons diviser son histoire de développement en trois étapes. C'est précisément à cause du paradoxe logique et du principe d'incertitude de Hersnberg qui ont conduit au développement de la «logique à valeurs multiples» ou de la «logique floue» dans les années 1920 et 1930. La base théorique de la logique floue a été établie

par le professeur Lotfi Zadeh en 1965. À cette époque, la théorie de la logique floue n'avait pas reçu beaucoup d'attention. En 1974, E.H. Mamdani a appliqué son principe à la construction du premier contrôleur flou. Depuis 1975, nous avons découvert la première application au niveau du système de contrôle. À partir de 1985 environ, les Japonais ont commencé à utiliser la logique floue dans les produits industriels pour résoudre les problèmes de régulation et de contrôle [95].

IV .3.5. 1. Le principe du régulateur floue

Dans la théorie des ensembles traditionnelle, quelque chose appartient ou n'appartient pas à un certain ensemble. Par exemple, est-ce la différence entre la température moyenne ou le conception de basse température? Ils sont relativement difficiles à spécifier avec précision. C'est à partir de ce constat que Zadeh (L. A. Zadeh) a avancé sa théorie. Il a défini les ensembles flous comme des termes linguistiques de négation de genre, zéro, affirmation, petit, grand ... Ces termes existent également dans la collection conventionnelle. Cependant, la différence entre ces deux théories des ensembles réside dans les limites des ensembles. En concentration floue, il permet aux choses d'appartenir en partie à une certaine concentration; c'est ce qu'on appelle le degré d'appartenance, qui peut varier de 0 à 1. Dans l'ensemble conventionnel, le degré d'appartenance est 0 et 1[96] .

A. Configuration Interne d'un Régulateur à Logique Floue

La majorité des contrôleurs flous développés utilisent le schéma simple proposé Par E. Mamdani .Ce schéma est illustré par la figure IV .30 Un régulateur flou est traditionnellement décomposé en trois étapes[97]:

- Fuzzification.
- Inférence floue.
- Défuzzification.

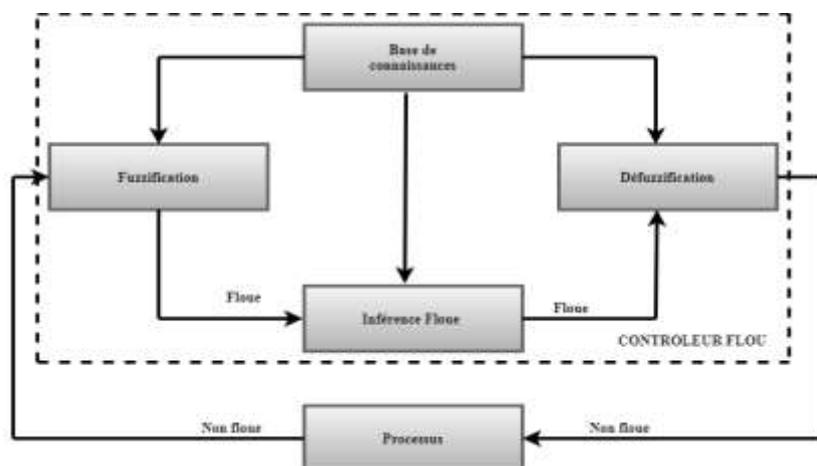


Figure IV .36. Structure interne d'un régulateur flou.

- **Fuzzification** : Elle présente la première étape de traitement flou, son objectif est de transformer les variables déterministes d'entrée en variables linguistiques, en définissant des fonctions d'appartenance pour différentes variables d'entrée
- **Inférence Floue** : L'inférence floue est le processus de formulation de la relation entre les entrées et les sorties par logique floue. Cette relation offre une base avec laquelle la décision est prise par le système flou
- **Défuzzification** : Cette étape consiste à transformer la valeur linguistique issue de régulateur flou en valeur numérique. On distingue trois méthodes différentes : celle du maximum qui correspond à un seul point qui est le point milieu de la zone activée avec l'indice le plus fort, celle de la moyenne des maxima et celle du centre de gravité . Il est toutefois reconnu que la méthode de centre de gravité donne les meilleurs résultats [98].

B. Outil Logique Floue sous Matlab

Pour construire notre régulateur flou (FuzzyLogic Controller), on commence tout d'abord par définir l'entrée et la sortie, On prendra pour entrer la température, et pour sortie la température, (On commence en tapant **Fuzzy** à la ligne de commande, on obtient alors le fis Editor de Matlab).

Ensuite on définira les plages de variations (les ensembles flous) et les fonctions d'appartenances en utilisant l'interface (Edit Member ship function) ; et ceci et pour l'entrée et pour la sortie. Les fonctions d'appartenances sont utilisées deux types trimf et trapmf (triangulaires et trapézoïdale). Une fois le type de fonction d'appartenance choisi ainsi que la plage de variation on appellera chaque partie de la fonction d'appartenance par un nom significatif.

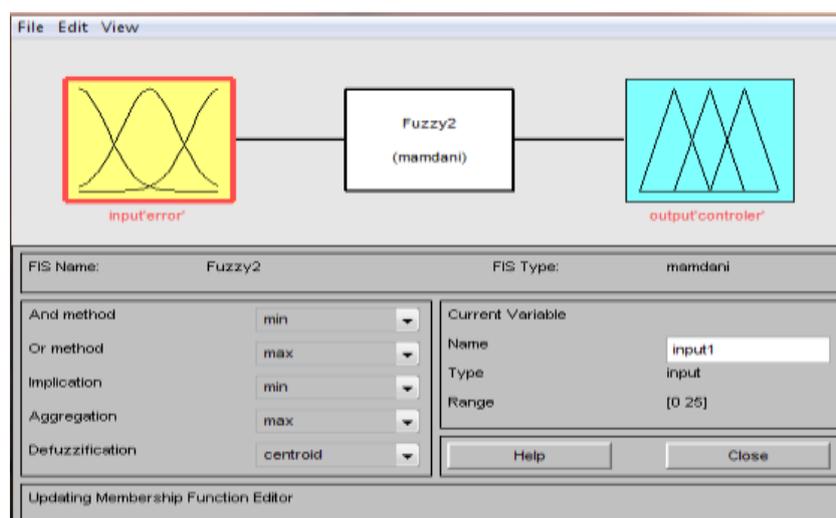


Figure IV.37. Interface de la logique floue sous Matlab.

Convertisseurs. Les contrôleurs flous ne nécessitent pas un modèle mathématique. Au lieu de cela, ils sont conçus en fonction sur les connaissances générales de la plante. Les contrôleurs flous sont conçus pour s'adapter à différents points de fonctionnement. Flou Logic Controller est conçu pour contrôler la sortie de booster le convertisseur dc-dc en utilisant le style flou de Mamdani système de référence. Un variable d'entrée, erreur et contrôleur sont utilisés dans ce système de logique floue [99].

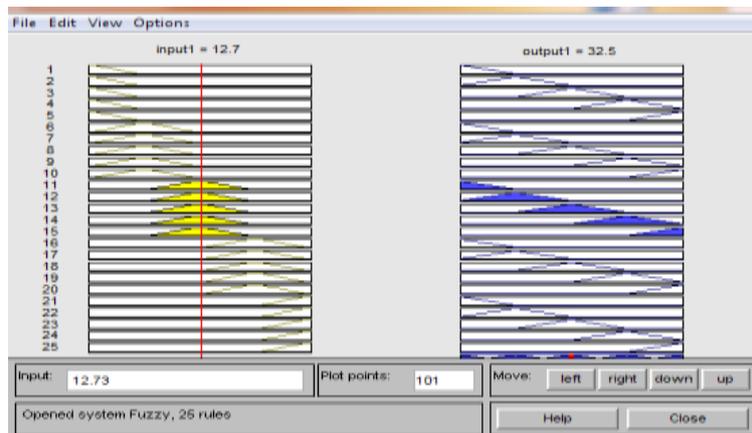


Figure IV.38. Interface de la logique floue.

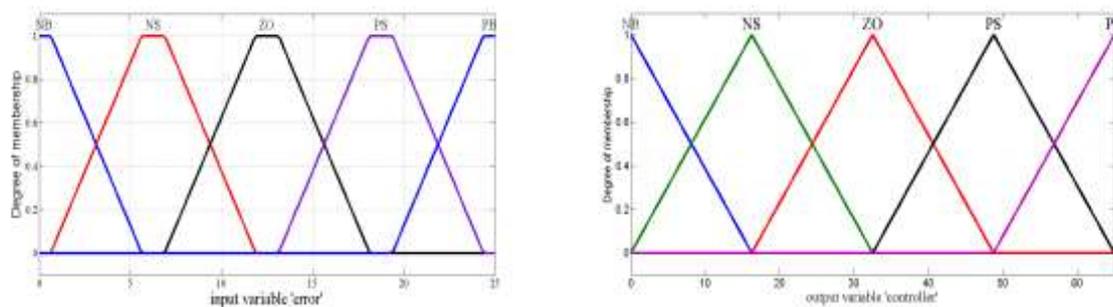


Figure IV.39. Fonctions d'appartenance de l'entrée (error) et à la sortie.

L'objectif est de contrôler la tension du convertisseur élévateur. L'erreur et le changement de erreur de la tension de sortie sera les entrées de flou contrôleur logique. C'est un seul entrée sont divisées en cinq groupes; NB : Gros négatif, NS : Petit négatif, ZO : Zone zéro, PS : petit positif et PB : grand positif et son paramètre Ces règles de contrôle flou pour l'erreur et le changement d'erreur peuvent être référencés dans le tableau qui est indiqué dans le tableau comme ci-dessous.

Controller \ Error	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	ZO
NS	NB	NB	NS	ZO	PS
ZO	NB	NS	ZO	PS	PB

PS	NS	ZO	PS	PB	PB
PB	ZO	PS	PB	PB	PB

Tableau IV .4. Règles du tableau pour l'erreur et de contrôleur

Les règles d'inférences seront alors définies comme suit

1. **SI** (error est NB) **ET** (contrôler est NB) **ALORS** (u est NB)
2. **SI** (error est NB) **ET** (contrôler est NS) **ALORS** (u est NB)
3. **SI** (error est NB) **ET** (contrôler est ZO) **ALORS** (u est NB)
4. **SI** (error est NB) **ET** (contrôler est PS) **ALORS** (u est NS)
5. **SI** (error est NB) **ET** (contrôler est PB) **ALORS** (u est ZO)
6. **SI** (error est NS) **ET** (contrôler est NB) **ALORS** (u est NB)
7. **SI** (error est NS) **ET** (contrôler est NS) **ALORS** (u est NB)
8. **SI** (error est NS) **ET** (contrôler est ZO) **ALORS** (u est NS)
9. **SI** (error est NS) **ET** (contrôler est PS) **ALORS** (u est ZO)
10. **SI** (error est NS) **ET** (contrôler est PB) **ALORS** (u est PS)
11. **SI** (error est ZO) **ET** (contrôler est NB) **ALORS** (u est NB)
12. **SI** (error est ZO) **ET** (contrôler est NS) **ALORS** (u est NS)
13. **SI** (error est ZO) **ET** (contrôler est ZO) **ALORS** (u est ZO)
14. **SI** (error est ZO) **ET** (contrôler est PS) **ALORS** (u est PS)
15. **SI** (error est ZO) **ET** (contrôler est PB) **ALORS** (u est PB)
16. **SI** (error est PS) **ET** (contrôler est NS) **ALORS** (u est NS)
17. **SI** (error est PS) **ET** (contrôler est ZO) **ALORS** (u est ZO)
18. **SI** (error est PS) **ET** (contrôler est PS) **ALORS** (u est PS)
19. **SI** (error est PS) **ET** (contrôler est PB) **ALORS** (u est PB)
20. **SI** (error est PS) **ET** (contrôler est PB) **ALORS** (u est PB)
21. **SI** (error est PB) **ET** (contrôler est NB) **ALORS** (u est ZO)
22. **SI** (error est PB) **ET** (contrôler est NS) **ALORS** (u est PS)
23. **SI** (error est PB) **ET** (contrôler est ZO) **ALORS** (u est PB)
24. **SI** (error est PB) **ET** (contrôler est PS) **ALORS** (u est PB)
25. **SI** (error est PB) **ET** (contrôler est PB) **ALORS** (u est PB)

IV .3.5. 2. Control de la PEMFC avec le régulateur flou

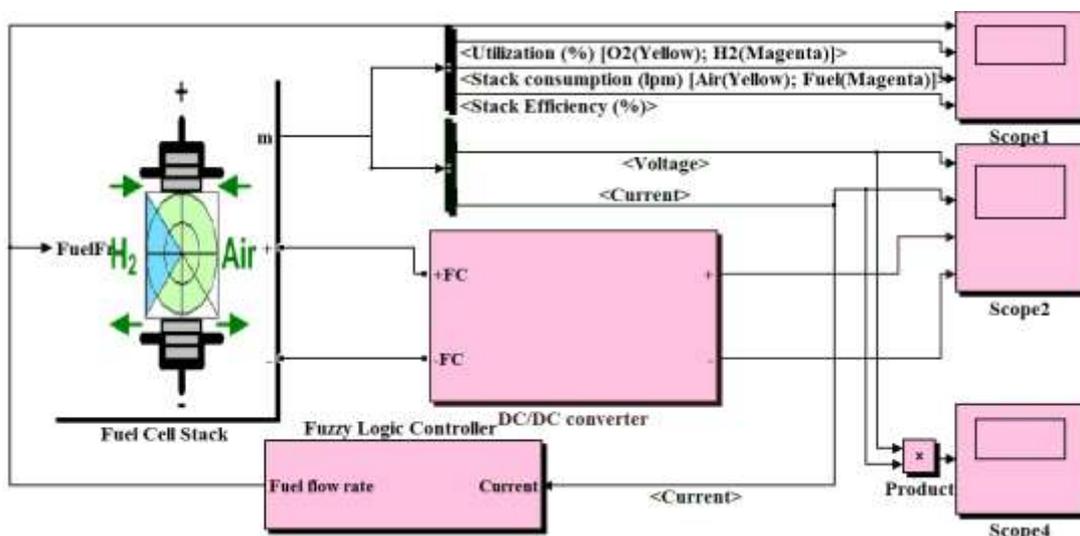


Figure IV.40.PEMFC (45V-dc, 6kW).

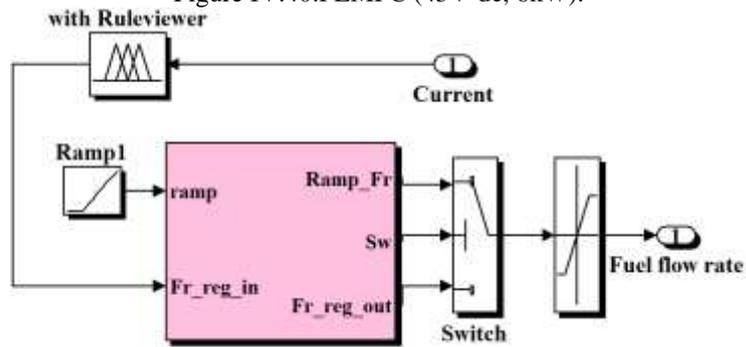


Figure IV.41.Control de flu.

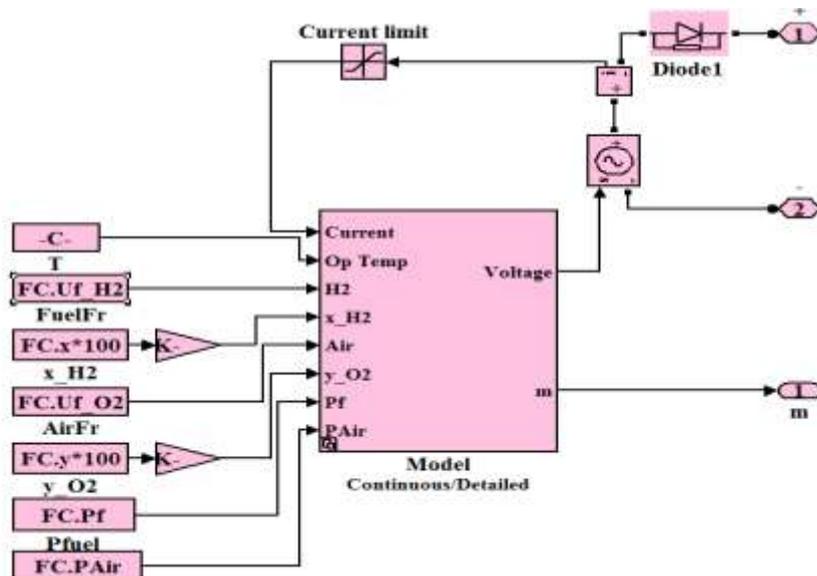


Figure IV.42.La pile à combustible.

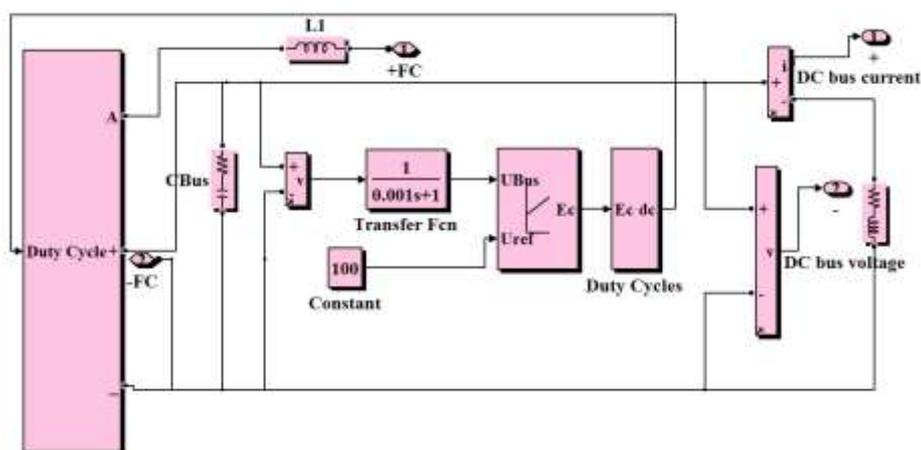


Figure IV.43.La convertisseur DC/DC

➤ Résultats et Analyse

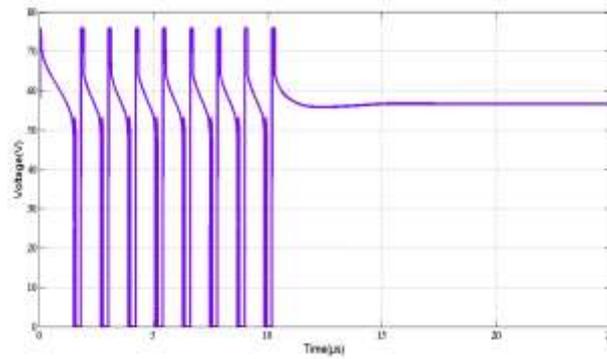


Figure IV.44.La tension de la pile.

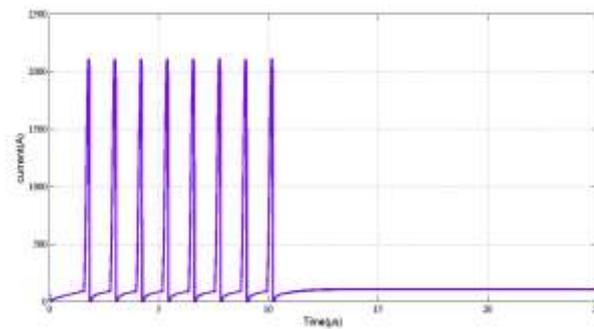


Figure IV.45.Le courant de la pile.

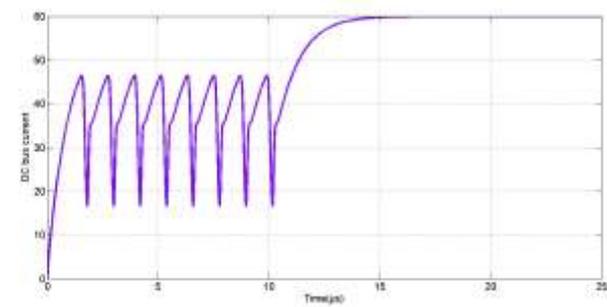


Figure IV.46.Le courant de DC/DC du convertisseur.

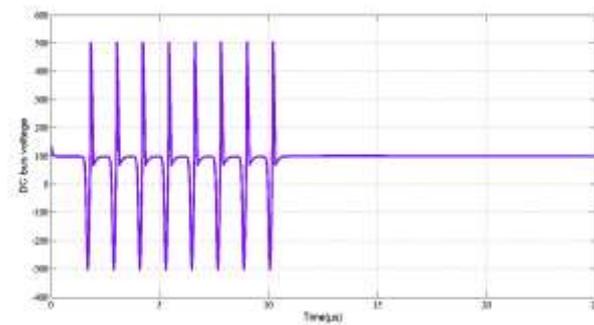


Figure IV.47.La tension DC /DC en fonction du temps.

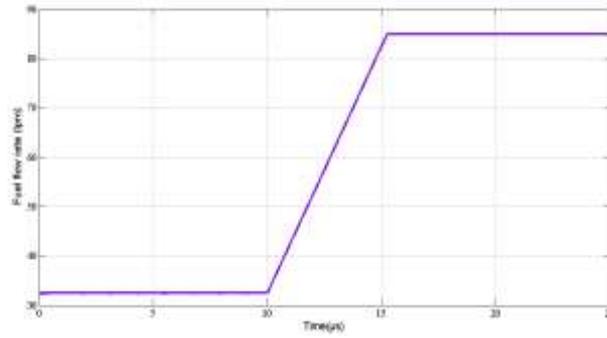


Figure IV.48.Débit de carburant dans la pile.

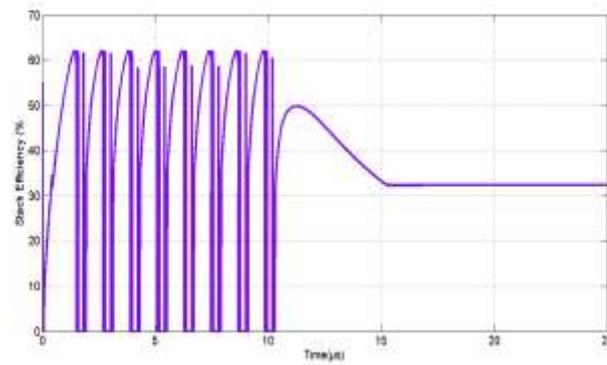


Figure IV.49.Le rendement de la pile.

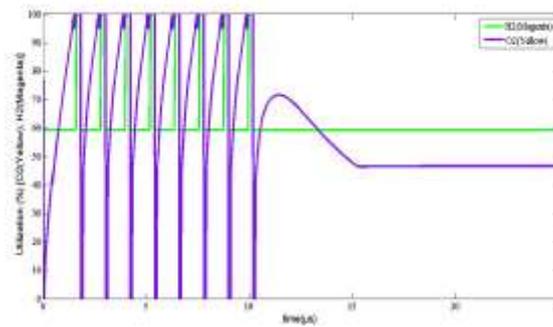


Figure IV.50.Utilisation de la O2 et H2.

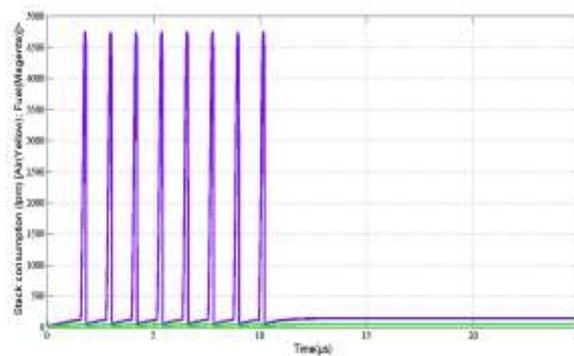


Figure IV.51.Consommation de pile (Air et Fuel).

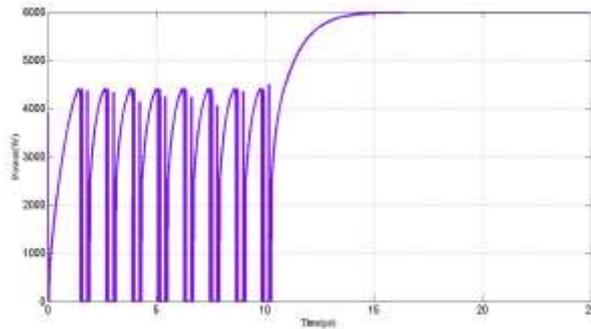


Figure IV.52.La puissance de la pile.

IV .4 .Comparaison entre les actions avec et sans régulateur PID/floue dans le contrôle du PEMFC

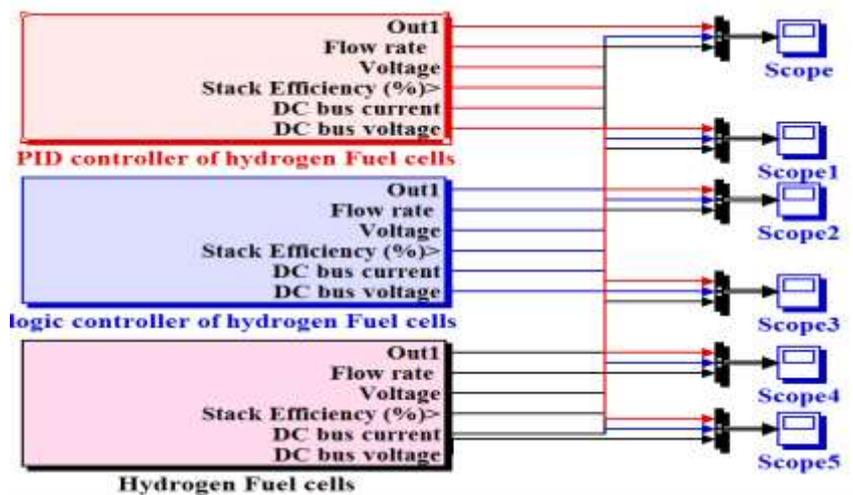


Figure IV.53.bloc de comparaison entre les actions de control du correcteur PID et la logique floue dans la PEMFC.

➤ **Résultats et Analyse**

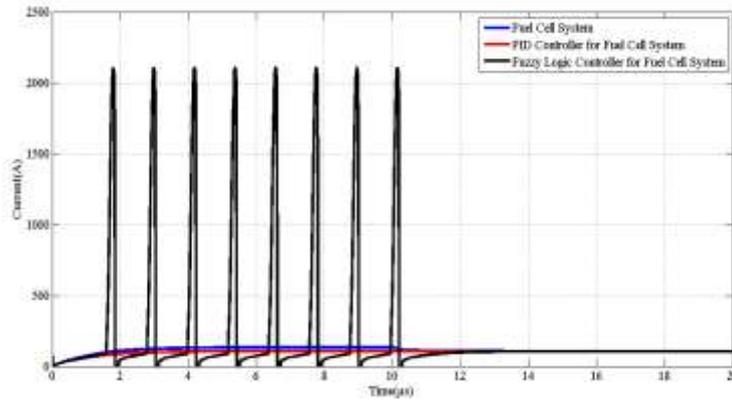


Figure IV.54. Le courant de la pile.

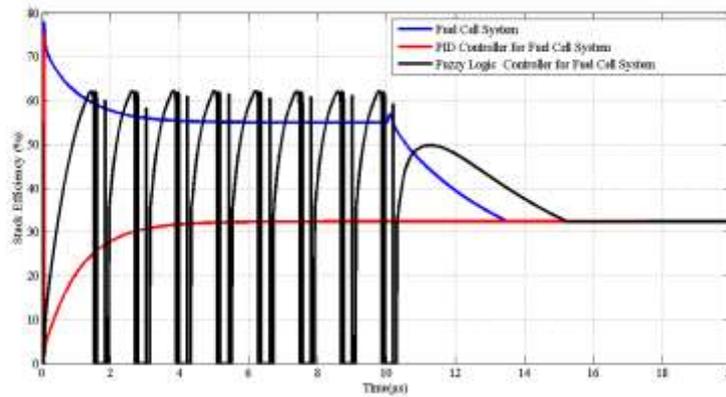


Figure IV.55. Le rendement de la pile.

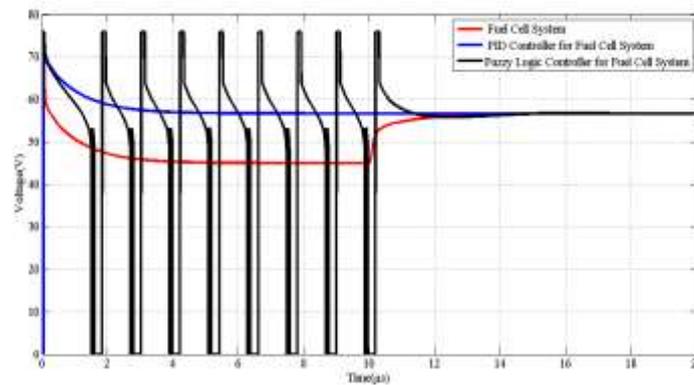


Figure IV.56. La tension de la pile.

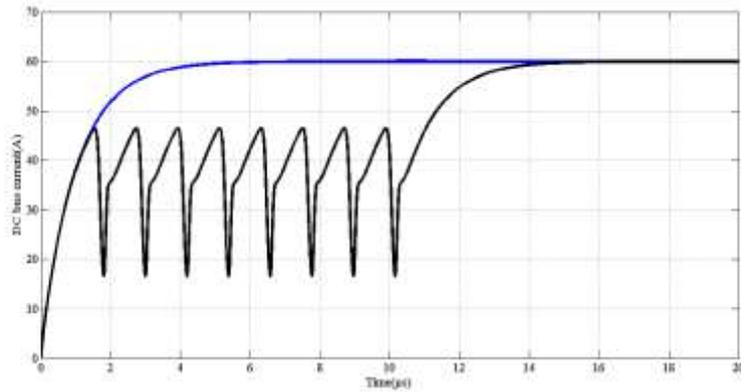


Figure IV.57. Le courant de DC/DC.

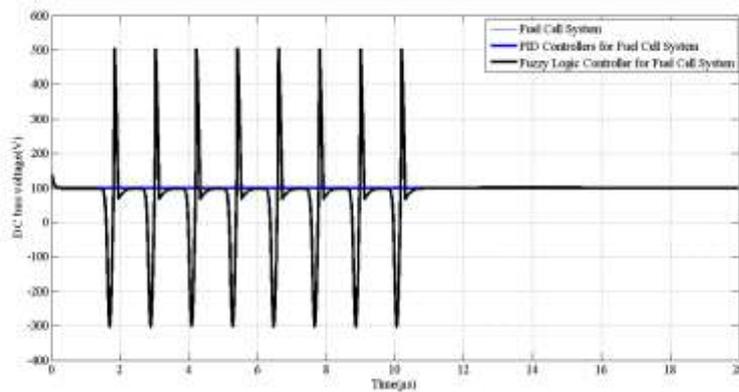


Figure IV.58. La tension de DC/DC.

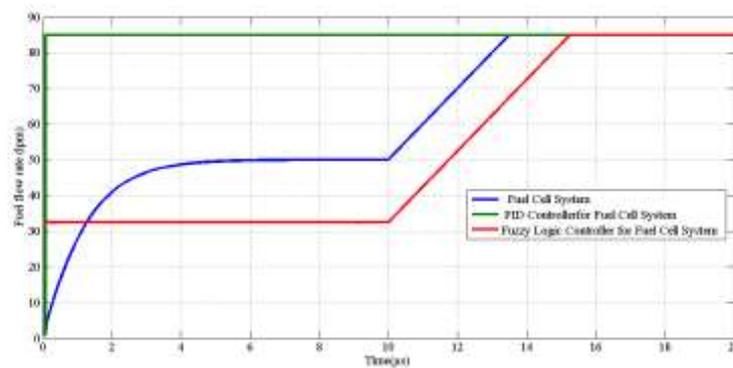


Figure IV.59. Débit de carburant en fonction du temps.

IV .5. Analyse des résultats PID/Floue

Le contrôle des piles à combustible a été examiné en plus de l'utilisation de la logique floue pour contrôler les piles à combustible. Et test de contrôle PID, comme le montrent les résultats de la simulation, les performances de la logique floue sont meilleures que celles du contrôle PID. En général, pour les systèmes à pile à combustible, l'humidification est nécessaire soit à l'air, soit à l'hydrogène, ou à la fois à l'air et à l'hydrogène dans les entrées de la pile à combustible. De plus, la teneur en eau est très importante pour la conduction protonique dans les membranes échangeuses de

protons. En cas de déshydratation de la membrane, les performances électriques sont réduites en raison de pertes ohmiques importantes.

IV .6 . Conclusion

Le contrôle de la pile pour un comportement meilleur dans tous les aspects physique, thermique et électrique était nécessaire pour donner à ce travail un apport propre et peu particulier par rapport aux travaux déjà réalisés dans ce type de sujets.

Le régulateur classique et le régulateur flou forment les outils choisis pour contrôler la PEMFC où les résultats étaient très satisfaisants.

L'étude comparative entre les trois situations de la pile (non contrôlée, action du PID et action du Flou) à montrer l'importance de chaque type du contrôleur où le rendement était nettement meilleur par action du contrôleur Flou alors que la tension de la pile était plus élevée et plus stable par action du PID.

Conclusion Générale

Dans cette étude de la Pile PEMFC, nous avons traité ses caractéristiques physiques, thermiques et électriques pour mieux comprendre le fonctionnement de ce type de pile.

A travers cette étude, nous avons remarqué que cette technologie est très simple, mais elle est, en même temps, délicate à l'utilisation du fait de plusieurs phénomènes contribuent internes et externes au bon fonctionnement.

La température, la pression le choix du matériaux des électrodes poreuses et le type de l'électrolyte (membrane) présentent un défi majeur pour une pile sélective.

De même L'architecture de la pile (dimensions des électrodes et la membrane), l'humidification de la membrane ainsi que les conditions opératoires jouent un rôle prépondérant qui influence les performances de cette dernière. Il est indisponible de trouver le meilleur compromis entre ses différents paramètres pour augmenter le rendement de la pile.

La modélisation statique et dynamique par des modèles inspirés de la littérature La pile à combustible à membrane échangeuse de proton PEMC était nécessaire à présenter dance travail pour tenir en compte la plupart des paramètres influant les performances de la pile. La simulation de la pile PEMFC sous Matlab par l'élaboration des programmes et sous Simulink ont donné des résultats très motivants comparés à d'autres déjà réalisée et publiés par d'autres auteurs

Le contrôle de la pile par des techniques classique (correcteur PID) et nouvelles (la logique Floue) sur la pile PEMFC était l'apport principale de nos efforts dans ce mémoire pour découvrir ainsi les performances de la pile comme étant un source d'énergie prometteuse.

Une étude comparative entres les deux techniques de commande utilisées est présentée au terme de ce travail où l'influence de chaque technique de commande sur la performance de la pile était flagrante.

Références bibliographiques

- [1] Observ'ER, « La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde », Collection chiffres et statistiques, Onzième inventaire, Edition 2009.
- [2] <https://www.superprof.fr/ressources/scolaire/physiquechimie/seconde/mecanique/sources-energie.html>
- [3] A.GUIDOUM, «caractérisation hydrologique et analyse du transport solide en suspension dans trois ensembles hydrographiques du nord-est algérien etude de cas dans la seybouse, les hautes plaines constantinoises et chott melghir (coupe nord-sud) », thèse de doctorat, université mohamed khider – biskra, 2017.
- [4] M. KADDOUR, I. BOUSTER, «Etude d'un système de conversion éolienne connecté au réseau», Mémoire du Master UNIVERSITE BADJI-MOKHTAR –ANNABA, 2018/2019.
- [5] C. Ferlat, « Le stockage hydraulique gravitaire et la production hydroélectrique sur les pentes réunionnaises – Etude du stockage de l'énergie photovoltaïque », étude de l'ARER, septembre 2009.
- [6] C. DARRAS, « Modélisation de systèmes hybrides Photovoltaïque/ Hydrogène : Applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE (ANR PAN-H) ». Thèse de doctorat, université de Corse, 2010.
- [7] J. Kasperski , « Rotational type of a gravitational ejector refrigerator – A system balance of the refrigerant analysis ». International Journal of Refrigeration 2010;33:3–11.
- [8] H. AZZI, «Etude et modélisation d'une pile à combustible ». Thème, université de Bejaia, 2016.
- [9] S. Samia, «Contribution à l'optimisation d'un système hybride (PV/éolien) avec stockage d'énergie connecté au réseau électrique ».Thèse de doctorat , université Ferhat Abbas-Setif , 2018.
- [10] AFH2, Mémemton de l'hydrogène, « Stockage de l'hydrogène dans les solides », 2007
- [11] B. Multon, J. Aubry, P. Haessig et H. Ben Ahmed, «Systèmes de stockage d'énergie électrique». Techniques de l'Ingénieur BE8100 2013.
- [12] <http://www.periodni.com/fr> , 2015.
- [13] Guyton de morveau, lavoisier, berthollet et de fourcroy : *MC' thode* de nomenclature chimique. 1787. <http://www.cnrtl.fr/definition/hydrogene>. Octobre 2015.
- [14] G.O. Cimuca, « Système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens », thèse de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre Lille, soutenue 2005.
- [15] Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer, « Le Livre Bleu des engagements du Grenelle de la Mer », 2009.

- [16] M. Obadia, «Le stockage de l'énergie électrique : une dimension incontournable de la transition énergétique : 130.
- [17] fSI R. Lin, Y. Weng, X. Un. ~Uld F. Xiong. " R;.lpid cold stan of }Tolon elchange mellllbl"Jlle fuel ccII, by lIhe p~inle cin::uit board lcc.:hllology," 1111. J. H)dn,~, 'n El" ,,,),. ,ot. 39. pp. Ig369-Ig37g. DeL 20 14.
- [18] <http://www.cnrtl.fr/definition/hydrogene>. Octobre 2015.
- [19] G. Marbán et T. Valdés-Solís « Towards the hydrogen economy ? », *Int. J. Hydrogen Energy*, 32(2):1625–1637, 2007.
- [20] INERIS, « Les techniques de production de l'hydrogène et les risques associés », rapport d'étude N° DRA-08-95313-07833B, juin 2008 .
- [21] T.Alleau , « Pourquoi l' hydrogène ? » *In Pollutec, Paris*, 30 novembre 2005.
- [22] <http://www.iea.org/textbase/papers/2006/hydrogen.pdf>. [Consulté en octobre 2015].
- [23] G. Gondor , « Pour le stockage de l'hydrogène : Analyse thermodynamique de la formation d'hydrures métalliques et optimisation du remplissage d'un réservoir ». *Mechanics of materials*. Université de Franche-Comté, 2008.
- [24] <http://www.periodni.com/fr>. octobre 2015.
- [25] J.C. Crivello, « Contribution à l'étude des propriétés thermodynamiques et électroniques d'hydrures de composés de Haucke ». Thèse de doctorat, Université Paris Sud - Paris XI, 2005.
- [26] A. Zuttel «Materials for hydrogen storage». *Master. Today*, 6:24–33, 2003.
- [27] D .Mori et K. Hirose « Recent challenges of hydrogen storage technologies for fuel cell vehicles ». *In Proceedings World Hydrogen Technologies Convention*, 2007.
- [28] N .LEMTA, L.THIAIS et L. BESANCON : *Projet SOLHY* « Analyse et développement d'une SOLution HYbride combinant les voies solide et gazeuse pour le stockage d'hydrogène ». Action concertée énergie CNRS - Ministère de la Recherche, 2006.
- [29] http://www.ieahia.org/pdfs/Hydrogen_Gaps_and_Priorities.pdf. octobre 2015.
- [30] 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.
- [31] A. A. NGUYEN, « Modélisation Dynamique Du 'Coeur' de la pile à combustible de type PEM », thèse de doctorat, institut national polytechnique de Lorraine, Nancy, juillet 2010.
- [32] F Z. Zerhouni, «Développement et optimisation d'un générateur énergétique hybride propre à base de PV-PAC», thèse de doctorat, USTOMB, 2009.

- [33] 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.
- [34] Réaction d'Oxydo-réduction: Réaction chimique, Équation chimique, Potentiel d'oxydo-réduction, Oxydo- réduction en chimie organique (Français) Broché – 23 septembre 2010 de [Frederic P. Miller](#) (Sous la direction de), [Agnes F. Vandome](#) (Sous la direction de), [John McBrewster](#).
- [35] L'oxydoréduction. Concepts et expériences (Français) Broché – 5 mai 1998 de [Sarrazin](#) (Auteur).
- [36] S. Busquet, «Etude d'un système autonome de production d'énergie couplant un champ photovoltaïque, un électrolyseur et une pile à combustible : réalisation d'un band d'essai et modélisation», thèse de doctorat, école des mines de Paris, 2003.
- [37] K. Kordesch and G. Simader, « Fuels Cells and Their Applications». New York : Wiley, 1996.
- [38] Pile à combustible : définition, fonctionnement, enjeux, histoire [Internet]. 2011 [cité juin 2020]. Disponible sur <https://www.connaissancedesenergies.org/fichepedagogique/pilea-combustible>.
- [39] « J.-M. Tarascon, “L'énergie : stockage électrochimique et développement durable.” Collège de France, 2011. ».
- [40] « Larminie and A. Dicks. Fuel cell systems explained. Wiley. »
- [41] 3M Company, 3M Membrane Electrode Assembly (MEA), http://www.3m.com/about3m/technologies/fuelcells/our_prod.jhtml.
- [42] J. Lachaize , « Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des Systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction », thèse de doctorat, institut national polytechnique de TOULOUSE,2004 .
- [43] Les piles basses températures PEMFC CLEFS CEA N°44 - hiver 2000-2001.
- [44] P. Stevens, F. Novel-Cattin, A. Hammou, C. Lamy, M.Cassir Techniques de l'Ingénieur : Piles à combustible 2001 – Ref : D 3 340.
- [45] « E. Middelman, W. Kout, B. Vogelaar, J. Lenssen, and E. de Waal. Bipolar plates for pem fuel cells. Journal of Power Sources, 118 :44{46, 2003. ».
- [46] « B. F. C. I. Park. (2005) The basic structure of a fuel cell. [Online]. Available : www.fuelcellpark.com ».
- [47] « R. Saisset, “Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques,” Ph.D. dissertation, Thèse Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique Industrielle de l'ENSEEIH, Toulouse, FRANCE,2004 ».

- [48] Electrochemistry Encyclopedia <http://electrochem.cwru.edu/> [Consulté en juin 2015].
- [49] G. Fontès, « Modélisation et caractérisation de la pile PEM pour l'étude des interactions avec les convertisseurs statiques », thèse de doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, septembre 2005.
- [50] M.JOURDANI, «simulation numérique couplée des phénomènes thermo- fluide, électrochimique et mécanique dans une pile à combustible type PEMFC», these de doctorat, université mohammed V - RABAT, 02 mars 2019.
- [51] « P. Stevens, F. Novel-Cattin, A. Hammou, C. Lamy, and M. Cassir, "Piles à combustible," Techniques de l'Ingénieur, no. D 3340, 2001. »
- [52] « A. Laurent, P.-C. Jean-Philippe, R. O. Y. Francis, and G. Xavier, "GENEPAC : pile à combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC," Tech. l'ingénieur, Véhicule propre, vol. base docum, no. ref. article : in52, 2013. »
- [53] « J.-M. Tarascon, "L'énergie : stockage électrochimique et développement durable." Collège de France, 2011. ».
- [54] « S. Laveissiere, "Les technologies de l'hydrogène au CEA," no. 33, pp. 1–24, 2012. »
- [55] « B. James and A. Spisak, "Mass Production Cost Estimation of Direct H2 PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2012 Update," Strateg. Anal. Inc., no. January, pp. 1–62, 2014. ».
- [56] « myFC PowerTrek. Site PowerTrek, [en ligne] : <http://www.powertrekk.com> (Page consultée le 11/11/2014). »
- [57] « Batteries Nickel-Cadmium. Site Vehicules, [en ligne] : https://vehicules.com/wiki/Batteries_Accumulateurs_Nickel_Cadmium ».
- [58] 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*, thèse de master, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen.
- [59] C.Gongrand, « Analyse des transferts d'eau dans les micropiles à combustible », thèse de doctorat, institut national polytechnique de TOULOUSE, 2006.
- [60] B.Wahdame , «Analyse et optimisation du fonctionnement de piles à combustible par la méthode des plans d'expériences», thèse de doctorat, université de technologie de belfortmontbeliard et université de franchè-comte, Année 2006.
- [61] V.A.Danilov, and M.O. Tade, *An alternative way of estimating anodic and cathodic transfer coefficients from PEMFC polarization curves*. Chemical Engineering Journal, 2010 . 156(2): p. 496-499.

- [62] D. CANDUSSO, « Hybridation du groupe électrogène à pile à combustible pour l'alimentation d'un véhicule électrique », thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble, novembre 2002.
- [63] J. Larminie and A. Dicks. « Fuel Cell Systems Explained ». John Wiley Sons 2003.
- [64] S. Busquet, «Etude d'un système autonome de production d'énergie couplant un champ photovoltaïque, un électrolyseur et une pile a combustible : réalisation d'un band d'essai et modélisation», thèse de doctorat, école des mines de Paris,2003.
- [65] J. C. Amphlett, R.M. Baumert, R.F Mann, B.A. Peppley, P.R. Roberge and T.J. Harris, « PerformanceModelling of the Ballard Mark IV Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell, Mechanistic Model Development», Journal of the Electrochemical Society, Vol. 142,N°8, 1995.
- [66] M.W Fowler, R.F. Mann, J.C Amphlett, B.A. Peppley and P.R. Roberge, «Incorporation of Voltage DegradationintoaGeneralisedSteady State Electrochemical Model for a PEM Fuel Cell», Journal of Power Sources, Vol. 106, pp. 274 - 283, 2002.
- [67] J.M. Corrêa, F.A. Farret and L.N. Canna, 'An Analysis of the Dynamic Performance of Proton Exchange Membrane Fuel CellsUsing an Electromechanical Model', in Proc. IEEE IECON'01, pp. 141 – 146, 2001.
- [68] F. Amrouche, 'Caractérisation Expérimentale d'un Assemblage -Stacks- de Piles à Combustible à Membrane Echangeuse de Protons', Mémoire de PFE, USTHB, Novembre 2004 .
- [69] A.R. Maher and S. Al-Baghdadi, 'Modelling of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance Based on Semi-Empirical Equations', RenewableEnergy, Vol. 30, pp. 1587 - 1599, 2005.
- [70] National EnergyTechnologyLaboratory, 'Fuel CellHandbook', 6th Ed., pp. 2 – 9, 2002.
- [71] H. Wendt et G. Kreysa, 'Génie Electrochimique : Principes et Procédés', Ed. Dunod, p. 372, Paris, 2001.
- [72] C.N. Maxoulis, D.N. Tsinoglou, G.C. Koltsakis, 'Modelling of Automotive Fuel Cell Operation in Driving Cycles', Energy Conversion and Management, Vol. 45, pp. 559 – 573, 2004.
- [73] O. Morisot, 'Evaluation et Analyse Technico-Economique des Systèmes Piles à Combustible - Hiérarchisation des Verrous sur la Voie des Applications Stationnaires', Rapport final de l'étude EASYPAC, Août 2001.
- [74] Y. Wang and C-Y. Wang, 'TransientAnalysis of Polymer Electrolyte Fuel Cells', Electrochimica Acta, Vol. 50, pp. 1307 – 1315, 2005.

- [75] J.C. Amphlett, R.M. Baumert, R.F. Mann, B.A. Peppley, P.R. 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, pp. 349 - 356, 1994.
- [76] O. Morisot, 'Evaluation et Analyse Technico-Economique des Systèmes Piles à Combustible - Hiérarchisation des Verrous sur la Voie des Applications Stationnaires', Rapport final de l'étude EASYPAC, Août 2001.
- [77] D. Chu and R. Jiang, «Performance of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) Stacks - Part I, Evaluation and Simulation of an Air Breathing PEMFC Stack», Journal of Power Sources, Vol. 83, pp. 128 - 133, 1999.
- [78] J.M. Corrêa, F.A. Farret, M. Godoy Simes and V.A. Popov, «Sensitivity Analysis of the Modelling Parameters Used in Simulation of Proton Exchange Membrane Fuel Cells», Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), -Accepted for Publication- 2004.
- [79] J.M. Corrêa, F.A. Farret, J.R. Gomes and M. Godoy Simes, «Simulation of Fuel-Cell Stacks Using a Computer - Controlled Power Rectifier with the Purposes of Actual High-Power Injection Applications», IEE Transactions on Industry Applications, Vol. 39, N°4, July/August 2003.
- [80] J.M. Corrêa, F.A. Farret and L.N. Canna, «An Analysis of the Dynamic Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells Using an Electromechanical Model», in Proc. IEEE IECON'01, pp. 141 – 146, 2001.
- [81] Jeferson M. Corrêa, Felix A. Farret, Luciane N. Canha, Marcelo G Simões, «An Electrochemical-Based Fuel Cell Model Suitable for Electrical Engineering Automation Approach», IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 51, n° 5, 1103 -1112, octobre 2004.
- [82] L.ARAB, Z. CHEBBI, « ETUDE ET SIMULATION D'UNE PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEM », mémoire de master, Université Bouira, 2016.
- [83] P. Prouvost. 2010. Automatique control et régulation. 2émeed.
- [84] M. Bouacida. 2010. Régulation classique en industrie.
- [85] R. Farkh , «COMMANDE PID DES SYSTEMES A RETARD ».thèse,2011.
- [86] K.Aström.1995.Hägglund. Pid controllers: theory, design and tuning. Second edition. Instrument society of America.
- [87] Y. Bendaha , «contribution a la commande avec et sans capteur mecanique d'un actionneur électrique » ,Thèse doctorat ,2013.
- [88] C. Lann, «Le PID utilisé en régulation de position et/ou de vitesse de moteurs électriques»,Imperial college London, 2006/2007.

- [89] P. DECAULNEI J.C. GILLE, M. PELEGRIN « Méthodes modernes d'étude des systèmes asservis ». DUNOD 1960.
- [90] P. Welander. 02/01/2010. Understanding derivative in pid control control engineering. Article
- [91] K.J.Astrom and T.Hagglund, « Automatic tuning of PID Controllers» .Research Triangle Park, NC : Instrum . Soc .Amer.1988.
- [92] K.J.Astrom and T.Hagglund, « Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins»,Automatica, vol.0, pp.645-651,1984.
- [93] M.Fellah. 2013. Automatique 1 et 2 (asservissements linéaires continus). Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique. Université Djillali Liabès – Sidi Bel-Abbès.
- [94] K. J. Astrom and T. Hagglund, "PID Controllers : Theory, Design,and Tuning", 2nd ed. Research Triangle Park, NC : Instrument Society of America, 1995.
- [95] I.Borne ,« Introduction à la commande floue », Edition: Technip,01-03-1998.
- [96] M. Bouchon ,« La logique floue », Edition: PUF,15-08-2007.
- [97] M. Bernadette Bouchon, Laurent Foulloy, Mohammed Ramdani « Logique floue ‘Exercices corrigés et exemples d'applications’ », Edition: Cépaduès,15-01-1998.
- [98] L. Gacogne , « Eléments de logique floue», Edition: Hermès - Lavoisier,22-01-1997.
- [99] J. Godjevac, « Idées nettes sur la logique floue», première édition: Presse Polytechnique et universitaire Romandes, 1999.

المخلص: أصبح ظهور الهيدروجين في حياتنا اليومية كناقل للطاقة واعدًا كوقود ممتاز لخلية كهربائية. تحظى تقنية خلية وقود غشاء التبادل البروتوني (PEMFC) باهتمامنا في أطروحة الماستر النهائية هذه في الهندسة الكهربية الصناعية. يمكن تلخيص جوهر هذا العمل على النحو التالي:

- عرض الخصائص الفيزيائية والحرارية والكهربائية لفهم أفضل لتشغيل هذا النوع من بطاريات PEMC حيث لاحظنا أن هذه التقنية بسيطة للغاية ، لكنها في الوقت نفسه حساسة للاستخدام بسبب العديد من الظواهر الداخلية المساهمة وخارجية الأداء السليم.
- تمثل درجة الحرارة والضغط واختيار المادة للأقطاب المسامية ونوع المنحل بالكهرباء (الغشاء) تحديًا كبيرًا للبطارية الانتقائية. لا يمكن العثور على أفضل حل وسط بين معاييرها المختلفة لزيادة كفاءة البطارية.
- أعطت النمذجة الثابتة والديناميكية للمكس والمحاكاة في Matlab من خلال تطوير البرامج وفي Simulink نتائج محفزة للغاية مقارنة بالآخرين التي تم تنفيذها بالفعل ونشرها من قبل مؤلفين آخرين.
- كان التحكم في المكس من خلال التقنيات التقليدية (مصحح PID) والجديد (المنطق الضبابي) على مكس PEMFC هو المساهمة الرئيسية لجهودنا في هذه الأطروحة لاكتشاف أداء المكس كمصدر للطاقة الواعدة. تم تقديم دراسة مقارنة بين تقنيتي التحكم المستخدمتين في نهاية هذا العمل حيث كان تأثير كل تقنية تحكم على أداء البطارية واضحًا

Résumé : L'émergence de l'hydrogène dans notre vie quotidienne comme vecteur énergétique est devenu promettant comme étant un combustible d'excellence à une pile électrique. La technologie des piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) présente notre intérêt d'étude dans ce travail de mémoire de fin d'étude de master en Electrotechnique industrielle. L'essentiel élaboré dans ce volume de mémoire peut se résumer comme suit :

- Présentation des caractéristiques physiques, thermiques et électriques pour mieux comprendre le fonctionnement de ce type de pile PEMC où nous avons remarqué que cette technologie est très simple, mais elle est, en même temps, délicate à l'utilisation du fait de plusieurs phénomènes contribuent internes et externes au bon fonctionnement.
- La température, la pression le choix du matériaux des électrodes poreuses et le type de l'électrolyte (membrane) présentent un défi majeur pour une pile sélective. Il est indisponible de trouver le meilleur compromis entre ses différents paramètres pour augmenter le rendement de la pile.
- La modélisation statique et dynamique de la pile et sa simulation sous Matlab par l'élaboration des programmes et sous Simulink ont donné des résultats très motivants comparés à d'autres déjà réalisée et publiés par d'autres auteurs
- Le contrôle de la pile par des techniques classique (correcteur PID) et nouvelles (la logique Floue) sur la pile PEMFC était l'apport principale de nos efforts dans ce mémoire pour découvrir ainsi les performances de la pile comme étant un source d'énergie prometteuse.
- Une étude comparative entres les deux techniques de commande utilisées est présentée au terme de ce travail où l'influence de chaque technique de commande sur la performance de la pile était flagrante.

Abstract: The emergence of hydrogen in our daily lives as an energy carrier has become promising as an excellent fuel for an electric cell. Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) technology is of interest to us in this final master's thesis work in Industrial Electrical Engineering. The gist of this volume of brief can be summarized as follows:

- Presentation of the physical, thermal and electrical characteristics to better understand the operation of this type of PEMC battery where we have noticed that this technology is very simple, but it is, at the same time, delicate to use because of several contributing phenomena internal and external to the proper functioning.
- Temperature, pressure, choice of material for porous electrodes and type of electrolyte (membrane) present a major challenge for a selective battery. It is not possible to find the best compromise between its various parameters to increase the efficiency of the battery.
- The static and dynamic modeling of the stack and its simulation in Matlab by the development of programs and in Simulink gave very motivating results compared to others already carried out and published by other authors.
- The control of the stack by traditional techniques (PID corrector) and new (fuzzy logic) on the PEMFC stack was the main contribution of our efforts in this thesis to thus discover the performances of the stack as being a source of promising energy.
- A comparative study between the two control techniques used is presented at the end of this work where the influence of each control technique on the performance of the battery was obvious.