



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTRY OF HIGHER EDUCATION AND SCIENTIFIC RESEARCH
جامعة الشهيد لاربي التبسي - تبسة
Echahid Cheikh Larbi Tebessi University-Tebessa



علمية العلوم و التكنولوجيا

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE

DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN

FILIERE : ELECTROTECHNIQUE

SPECIALITE : Electrotechnique Industrielle

THEME

**Conception et Contrôle Optimale d'un Système de
Production Electrique à Base d'Hydrogène Vert**

Présenté par le binôme :

Barhoum Hana

Zaiz Ibtissam

DEVANT LE JURY :

Pr BOUKADOUM AzizPrésident

Dr BENDAKIR AbdelhakimExaminateur

Pr DIB DjalelEncadrant

2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur, Pr DIB Djalel, pour son soutien inestimable, sa patience et ses conseils avisés tout au long de ces cinq semestres de formation. Ses enseignements et son encadrement rigoureux ont été essentiels à la réalisation de ce travail.

Je remercie également tous nos enseignants pour leurs précieux enseignements qui ont participé à notre formation de Master en Electrotechnique Industrielle et qui ont grandement contribué à notre développement académique et scientifique.

Un remerciement spécial à Mr Ahmed qui nous a aidé dans le développement des simulations sous Matlab et ses conseils objectifs pour élaborer et concevoir nos blocs de simulation

الإهداء

من قال انا لها " نالها "

لم تكن الرحلة قصيرة ولا ينبغي لها ان تكون ,
لم يكن الحلم قريبا , ولا الطريق كان مبهوفا بالتسهيلات
لكنني فعلتها ونلتها .
الحمد لله حبا وشكرا وامتنانا الذي بفضلها انا اليوم انظر
الى حلم طال انتظاره وقد اصبح واقعا افتخر به ,
الى ملائكي الطاهر وقوتي بعد الله داعمتي الاولى والابدية " امي "
اهديك هذا الانجاز الذي لولا تضحياتك لما كان له وجود ممتنة لان
الله قد اصطفاك لي من البشر اما خير سند ومحوض
الى من دعمني بلا حدود واعطاني بلا مقابل " ابي "
الى من قبل فيهم : (سنشد عضدك باخيتك)
الي من مد يده دون كلل ولا ملل وقتي ضعفي
الى من عرفته معهم معنى الحياة " اخوتي " : منذر , ادم , اشرف
الى من امنو بقدراتي , و بوجودهم اكتسب القوة والمحبة " اخواتي "

سميلة , مراد

الى من تحلته بالاخاء وتميزت بالوفاء ورفيقة دربي " نادين "

الى صديقتي الخلوقة ورفيقة مشواري " ظود "

الى اساتذتي الاعزاء والى كافة اصدقائي واحبابي

دون استثناء شكرا جزلا على مساعدتكم لي

الإهداء

من قال انا لها نالها وانا لها وان ابك رغما عنها اتيت بها نلتها و غانقت اليوم مجدا عظيما فعلتها
بعد ان كانت مستحيلة كانت دروبا قاسية و طرقا خسرته بها الكثير و لكني وصلت
انتهت الرحلة لم تكون سهلة و ليس من المفترض ان تكون كذلك و مهما طالت فستمضي
بجلوها و مرها و ها انا بفضل الله عز وجل اتممت هذا العمل

الى من جعل الله الجنة تحته اقدامها و احتضني قلبها قبل يديها ملاكي الطاهر الى من سهلت
لي الشدائد بدعائها الى من غرست في روحي مكارم الاخلاق الى داعمتي الاولى في مسيرتي
الى فخري و اعزازي الى نبراس ايامي الى قوتي بعد الله ممتنة لان الله اصطفاك لي من البشر
اما يا خير سند و عوض امي العزيزة اطال الله عمرك اهديك هذا الانجاز الذي لولاك لم يكن
اهديك مراحلتي و انجازاتي كلها فالفضل و الثناء للمولى ثم لكفاحك الاجلي

الى فقيدي و معلمي الاول الى من علمني ان الدنيا كفاح و سلاحها العلم والتعلم الى من رافقتني
كلماته كنجوم تضيء لي الدرب الى من شهد معي بداية الطريق و انتظر معي نهايته و لكن
امر الله كان اسبق الى من لا ينفصل اسمي عن اسمه الى الرجل الابرز بحياتي الذي لا طالما
مهدته بهذا النجاح ها انا اتممت وعدي و اهديه لك الى فقيدي الحاضر في الروح قبل
الامكنة والدي العزيز رحمه الله

الى خيرة ايامي و صفوتها الى من مدت لي ايديهم في ضعفي و امنوا بقدرتي الى خلعي
الثابت

اخوتي صلاح الدين محمد امين اداكم الله ضلعا ثابتا لي

الى اختي وقره عيني الى مصدر قوتي الى نوري المضاء الذي لا ينطفئ يا من كنت لي عوناً و
سندا ورفيقة الروح

اختي ايمان

الى من سيشاركني رحلة الحياة الى رفيق دربي الى من راهن علي نجاحي الى من شاركني الفرح
و الحزن و شاطرنني لحظات النجاح و كان الاول دوما في مساندتي و تشجيعي خطيبي
الى الذين يبهمهم نجاحي و لكل من كان عوناً و سندا في هذا الطريق لأصدقاء السنين و

اصحاب الشدائد والازمات

Abstract

This thesis for obtaining a Master's degree in Industrial Electrotechnics explores the feasibility of using a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) powered by green hydrogen produced by an electrolyzer fueled by photovoltaic panels. The main objective is to design and optimize a clean electrical energy production system via green hydrogen capable of effectively meeting energy needs while minimizing environmental impact. The work is divided as follows:

- Hydrogen is produced by an electrolyzer powered by photovoltaic panels.
- Maximum power point tracking (MPPT) in the photovoltaic renewable source is implemented to maximize solar conversion efficiency.
- A PID controller is used to control the temperature and hydrogen flow to the fuel cell.
- Optimizing the hydrogen flow is crucial to improve the performance of the fuel cell.
- The work uses both classic PID control and intelligent control based on artificial neural networks (ANN).
- The PID controller is implemented to ensure stable and precise system regulation. The intelligent ANN control is used to improve system performance by dynamically adapting control parameters according to operational conditions.
- A detailed analysis of the PEMFC performance is conducted to evaluate its efficiency and reliability.
- Simulations following modeling are conducted to validate the results obtained.
- The proposed system is evaluated for its potential applications in various sectors, including transportation and stationary energy production.

The results show that integrating a PEMFC with a green hydrogen source is not only feasible but also beneficial in terms of sustainability and energy efficiency.

ملخص

يستكشف هذا العمل النهائي للحصول على درجة الماجستير في الهندسة الكهربائية الصناعية جدوى استخدام خلية وقود بغشاء تبادل البروتونات (PEMFC) التي تعمل بالهيدروجين الأخضر المنتج بواسطة محلل كهربائي يعمل بالألواح الكهروضوئية. الهدف الرئيسي هو تصميم وتحسين نظام إنتاج طاقة كهربائية نظيفة باستخدام الهيدروجين الأخضر، قادر على تلبية الاحتياجات الطاقوية بفعالية مع تقليل التأثير البيئي إلى الحد الأدنى. تم تقسيم العمل كما يلي:

- إنتاج الهيدروجين بواسطة محلل كهربائي يعمل بالألواح الكهروضوئية.
 - تنفيذ تتبع نقطة القدرة القصوى (MPPT) في المصدر المتجدد الكهروضوئي لتعظيم كفاءة التحويل الشمسي.
 - استخدام منظم PID للتحكم في درجة الحرارة وتدفق الهيدروجين إلى خلية الوقود.
 - يعد تحسين تدفق الهيدروجين أمراً حاسماً لتحسين أداء خلية الوقود.
 - يستخدم العمل كلاً من التحكم الكلاسيكي PID والتحكم الذكي القائم على الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN).
 - تنفيذ منظم PID لضمان تنظيم مستقر ودقيق للنظام. يتم استخدام التحكم الذكي ANN لتحسين أداء النظام من خلال التكيف الديناميكي لمعايير التحكم وفقاً للظروف التشغيلية.
 - إجراء تحليل مفصل لأداء خلية الوقود PEMFC لتقييم كفاءتها وموثوقيتها.
 - إجراء محاكاة بعد النمذجة للتحقق من النتائج المحصلة.
 - تقييم النظام المقترح لتطبيقاته المحتملة في مختلف القطاعات، بما في ذلك النقل وإنتاج الطاقة الثابتة.
- تُظهر النتائج أن دمج خلية الوقود PEMFC مع مصدر الهيدروجين الأخضر ليس فقط ممكناً ولكنه مفيد أيضاً من حيث الاستدامة وكفاءة الطاقة

Résumé

Ce travail de fin d'études pour l'obtention de diplôme de Master en électrotechnique industrielle explore la faisabilité de l'utilisation d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) alimentée par de l'hydrogène vert produit par un électrolyseur fonctionnant grâce à des panneaux photovoltaïques. L'objectif principal est de concevoir et d'optimiser un système de production d'énergie électrique propre via l'hydrogène vert capable de répondre efficacement aux besoins énergétiques tout en minimisant l'impact environnemental. Le volume de travail est partagé comme suit :

- L'hydrogène est produit par un électrolyseur alimenté par des panneaux photovoltaïques.
- Le contrôle de la puissance maximale (MPPT) dans la source renouvelable photovoltaïque est implémenté pour maximiser l'efficacité de la conversion solaire.
- Un régulateur PID est utilisé pour contrôler la température et le flux d'hydrogène vers la pile à combustible.
- L'optimisation du débit d'hydrogène est cruciale pour améliorer les performances de la pile à combustible.
- Le travail utilise à la fois le contrôle classique PID et le contrôle intelligent basé sur les réseaux de neurones artificiels (ANN).
- Le contrôleur PID est mis en œuvre pour assurer une régulation stable et précise du système. Le contrôle intelligent ANN est utilisé pour améliorer les performances du système en adaptant dynamiquement les paramètres de contrôle en fonction des conditions opérationnelles.
- Une analyse détaillée des performances de la PEMFC est réalisée pour évaluer son efficacité et sa fiabilité.
- Des simulations suite à des modélisations sont conduites pour valider les résultats obtenus
- Le système proposé est évalué pour ses applications potentielles dans différents secteurs, notamment les transports et la production d'énergie stationnaire.

Les résultats obtenus montrent que l'intégration d'une PEMFC avec une source d'hydrogène vert est non seulement viable mais aussi bénéfique en termes de durabilité et d'efficacité énergétique.

N°	Titre	page
Tableau II.1	Paramètres caractéristiques du panneau photovoltaïque utilisé dans le système	33
Tableau II.2	Paramètres électriques d'un électrolyseur	43
Tableau II.3	Paramètres du modèle	54
Tableau III.1	Caractéristiques du régulateur PID	65

	Titre	Page
Figure I. 1	Source d'énergie non renouvelable (centrale de charbon)	06
Figure I. 2	Source d'énergie non renouvelable (centrale de siemens de gaz).	06
Figure I. 3	Source d'énergie non renouvelable (centrale de pétrole)	07
Figure.I.4.	Source d'énergie non renouvelable (centrale nucléaire)	07
Figure I. 5	Source d'énergie non renouvelable (central thermique)	08
Figure I. 6	Source d'énergie renouvelable (biomasse)	09
Figure I. 7	Source d'énergie renouvelable (centrale hydraulique)	10
Figure I. 8	Source d'énergie renouvelable (l'énergie éolienne)	10
Figure I. 9	Source d'énergie renouvelable (centrale géothermique)	11
Figure I. 10	Source d'énergie renouvelable (Installation photovoltaïque)	12
Figure I. 11	les batteries électrochimiques	13
Figure I. 12	Les volants d'inertie.	14
Figure I. 13	Le stockage d'Air comprimé industriel	14
Figure I.14	Le stockage d'air comprimé en caverne.	15
Figure I. 15	Stockage hydrogène	15
Figure I. 16	Centrale de pompage hydraulique	16
Figure I. 17	Les batteries à circulation (flow batteries).	16
Figure I. 18	Le stockage de chaleur haute température avec turbine.	17
Figure I. 19	Liaison hydrogène	18
Figure I. 20	Production de l'hydrogène à partir des énergies renouvelables et stockage, Transport	19
Figure I. 21	Cycle de l'hydrogène vert	19
Figure I. 22	Electrolyseur de l'eau	21
Figure I. 23	Schéma de fonctionnement d'une pile à combustible	22
Figure I. 24	Différents types des PAC	23
Figure I. 25	Réactions chimiques des différentes piles.	24
Figure I.26	Schéma de principe d'une PEMFC	25
Figure II. 1	Circuit équivalent à une diode d'une cellule PV [42].	30
Figure II. 2	Caractéristique $2I_{pv}(V_{pv})$ et $P(V_{pv})$ dans les conditions standard	32
Figure II. 3	Caractéristique de P_{pv} en fonction de la tension V_{pv} d'un panneau solaire	34
Figure II. 4	Algorithme de la méthode P&O	35
Figure II.5	Modélisation d'un panneau PV avec la commande MPPT	36
Figure II.6	Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ et $P_{pv} = f(V_{pv})$	37
Figure II. 7	Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ et $P_{pv} = f(V_{pv})$	37
Figure II. 8	Effet de la commande MPPT sur la tension du panneau PV	38
Figure II. 9	Effet de la commande MPPT sur la Courant du panneau PV	38
Figure II. 10	Effet de la commande MPPT sur la puissance du panneau PV	39
Figure II. 11	Modélisation d'un électrolyseur sous Matlab/Simulink	43
Figure II. 12	Caractéristique V-I d'électrolyseur	44
Figure II. 13	Caractéristique variation du débit d'hydrogène avec le courant entrant I_{nH2pro} par l'électrolyseur	44
Figure II. 14	Influence de la température sur la caractéristique I-V de l'électrolyseur	44
Figure II. 15	Bouteille de stockage H2.	45
Figure II. 16	Modélisation de réservoir d'hydrogène sous Matlab/Simulink	45

Figure II. 17	L'hydrogène Stockée	46
Figure II. 18	Modèle R-C de la batterie	46
Figure II.19	Schéma d'hacheur type boost	47
Figure II. 20	Pile à combustible	48
Figure II. 21	Caractéristique de polarisation théorique du PAC.	49
Figure II. 22	Modèle statique simplifié de la pile à combustible (PEMFC)	51
Figure II. 23	Simulation d'une pile à combustible PEMFC	55
Figure II. 24	la caractéristique V(I)	55
Figure II. 25	la caractéristique P(I)	55
Figure III. 1	Composition de la fonction du régulateur.	60
Figure III. 2	Schéma de Principe du ne boucle de régulation.	61
Figure III. 3	Boucle ouverte	62
Figure III. 4	Boucle fermé	62
Figure III.5	Régulateur PID	62
Figure III.6	Les différentes techniques de l'IA	67
Figure III.7	Schéma d'un neurone biologique	68
Figure III.8	Structure d'un neurone artificiel	68
Figure III.9	Structure d'un neurone formel	69
Figure III.10	Architecture d'un réseau profond à plusieurs couches [15].	70
Figure III.11	Apprentissage supervisé [22]	71
Figure III.12	Apprentissage non-supervisé [22].	72
Figure III.13	Architecture de l'approche d'apprentissage actif semi-supervisé [24].	72
Figure III.14	Apprentissage par renforcement [25].	72
Figure III.15	Topologies des Réseaux de Neurones Artificiels	75
Figure III.16	Réseau multicouche	76
Figure III.17	Réseau à connexion locales	76
Figure III.18	Réseau à connexion récurrentes	76
Figure III.19	Réseau à connexion complète	77
Figure.IV.1	Simulation du système hybride PV-H2-PAC	79
Figure.IV.2	Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$, $I_{pv}=f(V_{pv})$	80
Figure. IV.3	Influence de l'irradiation solaire sur les caractéristiques $P_{pv}=f(V_{pv})$, $I_{pv}=f(V_{pv})$	80
Figure.IV.4	Effet de la commande MPPT sur la tension du panneau PV	80
Figure.IV.5	Effet de la commande MPPT sur le courant du panneau PV	80
Figure. IV.6	Effet de la commande MPPT sur la puissance du panneau PV	80
Figure.IV.7	Simulation d'électrolyseur avec commande PI	81
Figure. IV.8	La Température de l'électrolyseur	81
Figure. IV.9	Caractéristique variation du débit du H2 produit par l'électrolyseur avec le courant entrant $nH_2(I)$	81
Figure. IV.10	Tension de l'électrolyseur	82
Figure. IV.11	Simulation de la pile PEMFC avec le PI	82
Figure. IV.12	Contrôle de la Température dans la PEMFC avec PI.	82
Figure.IV.13	Caractéristique de la puissance produite $P(t)$ par la PEMFC.	83
Figure.IV.14	Les caractéristiques de $I(t)$	83
Figure.IV.15	Les caractéristiques de $V(t)$.	83
Figure.IV.16	caractéristique de la température	83
Figure.IV.17	Bloc de simulation de l'électrolyseur avec contrôleur ANN	84
Figure.IV.18	Contrôle du débit du H2 produit par l'électrolyseur avec le courant entrant $nH_2(I)$ par ANN	84

Figure. IV.19	Algorithme trainage de débuts de production d'hydrogène	85
Figure. IV.20	Performance des ANN, Entraînement, Test et Validation	85
Figure. IV.21	Résultats de la fonction Fit for Output	86
Figure. IV.22	Courbe de Performance de validation n(h2)	86
Figure. IV.23	Error histogram de H2	86
Figure. IV.24	Architecture de réseaux de neurone (couche d'entrée et cachée et sortie)	86
Figure. IV.25	Les fonctions d'activation pour chaque couche cachée (poids et biais).	87
Figure. IV.26	Contrôle de la tension de l'électrolyseur	87
Figure. IV.27	Algorithme trainage de la Température.	87
Figure. IV.28	Performance des ANN, Entraînement, Test et Validation	88
figure. IV.29	Fonction de sortie de la Température.	88
Figure. IV.30	Courbe de Performance de validation n(h2)	88
Figure. IV.31	Errer histogramme de Température	89
Figure. IV.32		89
Figure. IV.33	Architecture de réseaux de neurone (couche d'entrée et cachée et sortie)	89
Figure. IV.34	Les fonctions d'activation pour chaque couche cachée (poids et biais)	90
Figure. IV.35	Simulation de la pile PEMFC avec le ANN	90
Figure. IV.36	Les caractéristiques de P(t) par contrôle des réseaux de neurone	90
Figure.IV.37	Les caractéristiques de I(t) par contrôle des réseaux de neurone	90
Figure.IV.38	Les caractéristiques de V (t) par contrôle des réseaux de neurone	91
Figure.IV.39	Algorithme trainage de la Puissance	91
Figure. IV.40	Performance des ANN, Entraînement, Test et Validation	91
Figure. IV.41	Algorithme trainage de débuts de production d'hydrogène	92
Figure. IV.42	Courbe de Performance de validation de P(t).	92
Figure. IV.43	Errer histogramme de Puissance	92
Figure. IV.44		92
Figure. IV.45	Architecture de réseaux de neurone (couche d'entrée et cachée et sortie)	93
Figure. IV.46	Les fonctions d' activation pour chaque couche cachée (poids et biais)	93
Figure. IV.47	Block de thermique dans la pile contrôlée par ANN	93
Figure.IV.48	La température dans la pile contrôlée par ANN	93
Figure.IV.49	Algorithme trainage de la Puissance	94
Figure. IV.50	Performance des ANN, Entraînement, Test et Validation	94
Figure. IV.51	Algorithme trainage de Température	94
Figure. IV.52	Courbe de Performance de validation de P(t).	95
Figure. IV.53	Errer histogramme de Température. Dans la pile PEMFC	95
Figure. IV.54		95

PV	Panneau photovoltaïque
PAC	Pile à Combustible
PV/PAC	Système à base d'un Panneau photovoltaïque, et une pile à combustible
STC	Standard Test Conditions)
PEMFC	Pile à Combustible de types PEMFC
SOFC	SolideOxide Fuel Cell
PAFC	PhosphoricAcid Fuel Cell
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
AFC	Alkaline Fuel Cell
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
PV/ElctysH ₂ /PàC	Système à base d'un Panneau photovoltaïque, électrolyseur et une pile à
I_{nh}	la photo courant; [A]
I_{rsh}	Courant qui circule dans la résistance parallèle; [A]
I_d	Le courant de la diode ; [A]
I_0	Courant de saturation de la diode; [A]
Q	charge élémentaire (1.6.10 ⁻¹⁹ C)
K	constante de Boltzmann (1.38.10 ⁻²³ (SI))
N	Factor idéalité de la diode
N_s	Nombre de cellules
I_0	Courant de saturation de la diode; [A]
E_{g0}	L'énergie de gap du semi-conducteur utilisé dans la cellule en électronvolt
I_{rs}	Le courant de saturation Irs de la diode pour la température T_n
V_{oc}	La tension en circuit ouvert ; [V]
R_s	Résistance série
R_p r	Résistance en parallèle
G_n, T_n	Conditions STC
I_{cc}	Courant de court-circuit ; [A]
K_i, K_v	Coefficient de température
V_{elec_Cell}	La tension aux bornes de la cellule ; [V]
$V_{rév}$	La tension réversible de cellule ; [V]
r_1, r_2	Les paramètres de résistance ohmique
$K_{éle}, K_{T1}, K_{T1}$	Les paramètres de surtension V
ΔG	L'énergie libre de la réaction d'électrolyse

F	La constante de Faraday
$V_{rév}^0$	La tension de cellule réversible à l'état standard
Krév	Coefficient empirique de température
N_{H_2}	Débitde production d'Hydrogène
$f1, f2$	Paramètres de calcul du rendement Faradique; [$mA^2 \text{ cm}^{-4}$]
R_f	Résistance thermique de l'électrolyseur
T_a	La température ambiante [C°]
C_{cm}	La capacité thermique de l'eau de refroidissement ; [J/C°]
$T_{cm,e}$	La température de l'eau de refroidissement d'entrée [C°]
$T_{cm,s}$	La température de l'eau de refroidissement de sortie ; [C°]
V_{AHX}	Coefficient d'échange calorifique effective pour le processus
h_{cond}	Coefficient relatif à l'échange de chaleur en conduction
h_{conv}	Coefficient relatif à l'échange de chaleur en convection
U_{rev}	Tension réversible de la cellule
K_{rev}	Coefficient de température
s, t_1, t_2, t_3	Paramètres de surtension
A	Surface effective
P et V_m	Sont respectivement la pression et le volume molaire
Q_d	La quantité de charge manquante par rapport à Cbat
C_{bat}	La capacité (Ah) nominale de la batterie
A	Le rapport cyclique
MPPT	Algorithme de poursuite de point de puissance maximale
P&O	Méthode de perturbation et observation
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
Enerst	Dite tension réversible
P_{H_2}, P_{O_2}	Sont respectivement les pressions partielles de hydrogène et l'oxygène
ΔG	Le changement d'énergie libre ; [$J/K.mol$]
T	La température absolue opérationnelle ; [C°]
T_{ref}	La température de référence [K]
R	La constante universelle des gaz parfaits; [$8.314 \text{ J/K}\cdot\text{mol}$]

I_{stack}	Le courant de fonction de la pile ; [A]
$\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$	Représentent les coefficients paramétriques pour chaque modèle de pile
C_{O_2}	La concentration de l'oxygène dans l'interface du catalyseur de la cathode
R_c	La résistance protonique de la membrane
R_m	La résistance équivalente de la membrane pour le flux d'ions,
ρ_M	La résistivité spécifique de la membrane pour le flux d'électron
A	La surface active de la pile ; [cm ²]
L	La largeur de la membrane; [cm]
I_{stack}	Le courant de fonction de la pile ; [A]
Ψ	Fraction de l'aire ouverte d'une plaque perforée
q_{H_2}	Représente la débit molaire de l'hydrogène; [Kmol/s]
V_{pac}	Tension réelle d'une pile unitaire; [V]
I_{pac}	Le courant de la pile à combustible ; [A]
J	La densité de courant; [A/cm ²]
I_{max}	La densité de courant maximale; [A/cm ²]
V_{an}^2	Le volume de l'anode; [V]
n_{H_2}	Le nombre d'atome d'hydrogène dans le canal de l'anode
P_{H_2}	Pression partielle d'hydrogène ; [atm]
O_{H_2}	Pression partielle d'oxygène; [atm]

Sommaire

Remerciements	
Dédicace	
Listes des tableaux	
Listes des Figures	
Listes des notation et symboles	
<i>Introduction générale</i>	
<i>Chapitre I: État de l'art sur l'hydrogène vert et pile combustible</i>	
I. Introduction	05
I.1. Source de production de l'énergie électrique	05
I.1.1. Sources classiques	06
I.1.2. Sources renouvelables	08
I.2. Stockage de l'énergie électrique	12
1.2.1 Les batteries électrochimiques	13
1.2.2. Les accumulateurs à volants d'inertie (FES) : (Flywheel Energy Storage)	13
1.2.3. Les systèmes à air comprimé en bouteilles	14
1.2.4. Le stockage d'air comprimé en caverne CAES (Compressed Air Energie Storage)	14
1.2.5. Les systèmes électrolyseur-hydrogène-pile à combustible (ou à PAC réversible)	15
1.2.6. Les systèmes hydrauliques gravitaires centrales de pompage-turbinage (pumedhydro)	15
1.2.7. Les batteries à circulation (flow batteries)	16
1.2.8. Le stockage de chaleur haute température avec turbine	17
I.3. L'hydrogène	17
I.4. Production et transport et stockage	18
I.5. L'hydrogène vert	19
I.6. Electrolyseur de de l'eau	20
I.7. Pile à combustible PAC	21
I.7.1. Concept générale	21
I.7.2. Les différents Type de PAC	22
I.7.3. Pile à membrane à électrolyte polymère (PEMFC)	24
I.8. Conclusion	25
<i>Chapitre II : modélisation du système</i>	
II.1 Introduction	30
II.2. Modélisation du panneau photovoltaïque	30
II.2.1. Etude de la source photovoltaïque du système	33
II.2.2 Commande MPPT du PV	33
II.2.3. Résultats et interprétations	35
II.2.3.1. Influence de la température	36
II.2.3.2- Influence de l'éclairement	37
II.2.4. Caractéristique électrique du module photovoltaïque avec l'algorithme MPPT	38
II.2.5. Analyse des résultats	39
II.3. Modélisation de l'électrolyseur	39
II.3.1. Débit de production d'Hydrogène	40
II.3.2. Modèle thermique	41
II.3.3. Implémentation du modèle d'électrolyseur dans Matlab/Simulink	42
II.3.3.1. Caractéristiques d'électrolyseur	43
II.3.3.2. Influence de la Température	44

II.4. Modélisation de réservoir d'hydrogène	45
II.4 .1. Caractéristiques de réservoir d'hydrogéné	45
II.5. Modélisation des éléments de stockage d'énergie	46
II.6. Modélisation de l'hacheur boost (élevateur)	47
II.7 Modélisation de la pile PEMFC	47
II.7.1 Modèle de tension	48
III.7.2. Calcul des pressions partielles	51
II.7.2.1. Les hypothèses du modèle de calcul des pressions partielles	51
II.7.2.2. Calcul de la pression partielle d'hydrogène	52
I.8. Résultats de la simulation du PEMFC	54
III.8.1. Caractéristique Tension/ Courant et Puissance	55
III.9. Conclusion	55
Chapitre III: Contrôleurs classiques et intelligents	
III.1. Introduction	60
III.2. Les contrôleurs classiques	60
III.3. L'objectif global de la régulation	60
III.4. Eléments constitutifs d'une boucle de régulation	61
III.4.1 Une boucle de régulation	61
III.4.2 Le régulateur reçoit deux informations	61
III.5 Les types de boucles	61
III.6 Régulateur PI	62
III.6.1 Correcteur à Action Proportionnelle (P)	63
III.6.2 Correcteur à Action Intégrale (I)	63
III.7 Correcteur proportionnel intégral PI	64
III.8 Les Avantages et Inconvénients	64
III.9 l'intelligence artificielle	64
III.10 Les techniques de l'AI	65
III.10.1 Réseaux neurone	65
III.10.2 Neurone formel	66
III.11 Fonctionnement d'un réseau de neurones artificiel	67
III.12 Les différents types de réseaux de neurones artificiels	68
III.13 Apprentissage des réseaux de neurones	69
III.13.1 Apprentissage supervisé (back-propagation)	69
III.13.2 Apprentissage non-supervisé	69
III.13.3 Apprentissage semi-supervisé	70
III.13.4 Apprentissage par renforcement	70
III.14 Les avantages et les inconvénients des réseaux de neurone	71
III.15 Méthodologie pour l'utilisation des réseaux de neurones	72
III.26 Topologie de réseaux de neurones	73
III.17 Conclusion	73
Chapitre IV:	
IV.1. Introduction	79
IV.2 Simulation du système hybride PV-H ₂ -PAC	79
IV.3. partie PV	79
IV.4. Partie Electrolyseur avec contrôleur PI	81
IV.5. Partie PEMFC Avec la commande PI	82
IV.5.1. Partie PEMFC Avec la commande PI	83

IV.7. Contrôle de l'électrolyseur par l'ANN	84
IV.7.1.2. La propriété D'apprentissage de la technique de réseaux de neurones	86
IV.7.1.3. Résultats du contrôleur ANN de la Température	87
IV.7.1.4. La propriété D'apprentissage de la technique de réseaux de neurones	89
IV.8. Contrôle de la PEMFC par l'ANN	90
IV.8.1.1. Résultats de puissance de la pile	91
IV.8.1.2. Propriété d'apprentissage de l'Ann	93
IV.8.1.3. Résultats de la Température	94
IV.9. Analyse comparative des Résultats entre le contrôleur PID et l'ANN	95
IV.10. Conclusion generale	101

Introduction générale

Introduction générale :

Les préoccupations environnementales croissantes et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre ont conduit à une recherche intensive de sources d'énergie alternatives et durables. Les énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire, éolienne, et l'hydrogène vert, sont au cœur de cette transition énergétique. L'hydrogène vert, produit par électrolyse de l'eau en utilisant de l'électricité provenant de sources renouvelables, est particulièrement prometteur pour son potentiel à produire de l'électricité propre et pour sa capacité de stockage d'énergie.

Ce mémoire de fin d'études vise à explorer l'utilisation de l'hydrogène vert pour produire de l'électricité propre via une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC). Le travail sera structuré en quatre chapitres principaux, chacun abordant une composante essentielle du système à hydrogène vert lié à la PEMFC. Les objectifs spécifiques sont de :

1. Étudier l'état de l'art des systèmes à hydrogène vert et des PEMFC.
2. Modéliser les différentes parties du système.**
3. Présenter en general les théories des contrôleurs classiques et des contrôleurs intelligents tout en se focalisant sur les PID et les réseaux de neurones artificiels (ANN).
4. Appliquer ces contrôleurs pour l'optimisation du système dans un cadre pratique de simulation sous Matlab23

Le present mémoire est reaprti sur 4 volets comme suit :

Chapitre 1 : État de l'Art

Ce chapitre fournit une revue exhaustive des technologies actuelles liées à l'hydrogène vert et aux PEMFC. Il couvre les procédés de production de l'hydrogène vert, notamment l'électrolyse alimentée par des sources d'énergie renouvelable comme les panneaux photovoltaïques. De plus, il explore les avancées récentes dans les technologies de pile à combustible, leurs applications potentielles, et les défis actuels liés à leur efficacité, durabilité, et coût.

Chapitre 2 : Modélisation des Différentes Parties du Système

La modélisation constitue une étape cruciale pour comprendre et optimiser le système à hydrogène vert. Ce chapitre développe des modèles mathématiques pour chaque composant clé du système, incluant :

- Une source photovoltaïque comme source d'électricité pour alimenter l'Electrolyseur
- La production d'hydrogène par électrolyse.
- Le stockage et la gestion de l'hydrogène.
- Le fonctionnement de la pile à combustible PEMFC.

Les modèles permettront de simuler le comportement du système sous diverses conditions et d'identifier les paramètres critiques influençant ses performances.

Chapitre 3 : Théorie des Contrôleurs Classiques et Intelligents

Ce chapitre introduit les principes des contrôleurs classiques PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé) et des contrôleurs intelligents basés sur les réseaux de neurones artificiels (ANN). Les contrôleurs PID sont largement utilisés pour leur simplicité et leur efficacité dans de nombreux systèmes industriels. Les contrôleurs intelligents, quant à eux, offrent des avantages supplémentaires en termes de capacité d'apprentissage et d'adaptation à des conditions changeantes. Le chapitre se concentre sur la théorie sous-jacente à ces contrôleurs, leurs avantages, limitations, et les critères de conception.

Chapitre 4 : Application Pratique et Contrôle du Système

Le dernier chapitre applique les théories et modèles développés dans les chapitres précédents pour la gestion et l'optimisation du système à hydrogène vert. Des simulations et des expériences pratiques seront menées pour comparer les performances des contrôleurs PID et ANN dans la régulation de la production et de l'utilisation de l'hydrogène, ainsi que dans le maintien de la stabilité et de l'efficacité de la pile à combustible PEMFC. Les résultats obtenus permettront de démontrer la faisabilité et l'efficacité des solutions proposées pour améliorer la performance globale du système.

Notre objectif dans ce présent travail vise à contribuer à la recherche et au développement de solutions énergétiques durables en explorant l'utilisation de l'hydrogène vert et des PEMFC. Par une approche méthodique allant de l'état de l'art à l'application pratique des théories de contrôle, il cherche à fournir des réponses concrètes aux défis actuels de la transition énergétique et à proposer des solutions innovantes pour une production d'électricité propre et efficace.

Chapitre I

État de l'art sur l'hydrogène vert et pile combustible

I. Introduction :

La production d'énergie à partir de l'hydrogène est un domaine en pleine expansion qui suscite un intérêt croissant en raison de ses avantages environnementaux et de son potentiel pour une transition énergétique durable. L'hydrogène est considéré comme un vecteur énergétique clé car il peut être produit à partir de sources renouvelables telles que l'énergie solaire et éolienne, et stocké pour une utilisation ultérieure. Lorsque l'hydrogène est utilisé comme combustible, il ne produit que de l'eau et de la chaleur comme sous-produits, ce qui en fait une option propre et respectueuse de l'environnement. De plus, l'hydrogène peut être utilisé dans une variété d'applications, notamment pour alimenter des véhicules à hydrogène des piles à combustible pour la production d'électricité et le stockage d'énergie.

Dans ce chapitre, nous allons en apprendre sur L'état de l'art sur l'hydrogène vert et son rôle crucial dans la transition vers un avenir énergétique durable.

I.1. Source de production de l'énergie électrique :

Les centrales électriques sont des sites industriels qui transforment diverses sources d'énergie naturelle en électricité pour alimenter les consommateurs, qu'ils soient particuliers ou industriels. Le réseau électrique assure le transport et la distribution de l'électricité jusqu'aux consommateurs finaux.

Il existe cinq principaux types de centrales électriques :

- Les centrales à combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) dites centrales

Thermiques classiques.

- Les centrales nucléaires qui sont également des centrales que l'on peut qualifier de

Thermiques.

- Les centrales hydroélectriques.

- Les centrales solaires ou photovoltaïques.

- Les centrales éoliennes.

Les éléments indispensables à la production de courant électrique sont:

Une turbine en mouvement.

➤ Un alternateur c'est-à-dire un aimant entraîné par la turbine et entouré d'une bobine qui produit le courant électrique[1]

I.1.1. Sources classiques :

Une énergie non renouvelable n'est disponible qu'en quantité limitée, et n'est pas en mesure de se renouveler. Le charbon, le gaz, le pétrole ainsi que le nucléaire sont des énergies non renouvelables, aussi appelées énergies fossiles [2].

- **Le charbon:**

Le charbon représente une source d'énergie particulièrement bon marché, accessible à un prix très avantageux. Aussi, sa demande est en constante augmentation. D'après les études réalisées, on estime que les réserves de charbon disponibles permettraient de répondre aux besoins pendant encore 150 ans. Toutefois, le charbon est une source de pollution non négligeable et sa combustion entraîne des rejets de CO₂ dans l'atmosphère, responsable du réchauffement Climatique.



Figure I.1 : Source d'énergie non renouvelables (centrale de charbon)

- **Le gaz:**

Il s'agit de l'énergie que vous utilisez peut-être chez vous pour vous chauffer ou cuire vos aliments. Le gaz naturel est particulièrement limité, sa consommation ne sera plus permise d'ici 70 ans, en raison de l'épuisement des ressources.



Figure I.2 : Source d'énergie non renouvelable (centrale de Siemens de gaz).

- **Le pétrole:**

Cette énergie fossile est employée dans la fabrication de carburants et de plastique, La consommation mondiale de pétrole représente 82,4 milliards de barils aussi, les réserves devraient s'épuiser d'ici 40 ans. Toutefois, d'autres ressources existent, mais elles se situent trop profondément dans le sol pour être réellement exploitables.



Figure I.3 : Source d'énergie non renouvelable (centrale de pétrole)

- **L'énergie nucléaire:**

L'énergie nucléaire est produite dans des centrales nucléaires utilisant de l'uranium enrichi pour la fission nucléaire, produisant de la chaleur pour générer de l'électricité. Bien que l'uranium soit présent dans la nature, son extraction coûte cher et impacte le coût de l'électricité nucléaire, qui reste cependant parmi les moins chères à produire.

L'énergie nucléaire est ainsi une source d'énergie potentiellement très propre et très efficace. Elle est produite en faisant fissionner les atomes d'uranium ou de plutonium, ce qui libère une grande quantité d'énergie sous forme de chaleur. Cette chaleur peut ensuite être utilisée pour produire de l'électricité dans une centrale nucléaire. Les centrales nucléaires

manière directe. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue [03].

Il y a cinq sources essentielles d'énergies dites renouvelables : le vent (éoliennes), l'eau (Barrages hydroélectriques), le soleil (panneaux solaires), et biomasse et la chaleur du sol (géothermie)

- **La biomasse:**

L'énergie de la biomasse, ou bioénergie, est l'énergie qui est extraite des matières organiques non fossiles comme le bois, la paille, les huiles et les déchets végétaux des secteurs forestiers agricole et industriel. Tout comme l'énergie des combustibles fossiles, la bioénergie provient de l'énergie solaire emmagasinée dans les plantes par la photosynthèse. À l'heure actuelle l'énergie de la biomasse provient en très grande partie des solides (copeaux, granulats, charbon, ordures ménagères) et des liquides (lessives de cuisson) provenant de la cuisson du bois dans l'industrie papetière [04].

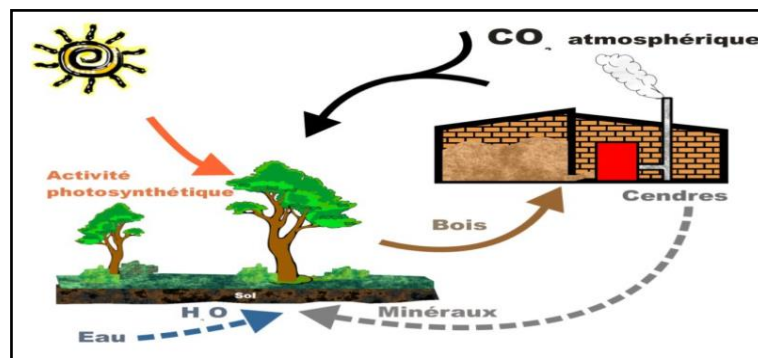


Figure I.6 : Source d'énergie renouvelable (biomasse)

- **L'énergie hydraulique:**

L'énergie hydraulique provient du mouvement de l'eau, qu'il s'agisse de chutes d'eau, de cours d'eau, de courants marins, de marées ou de vagues. Ce mouvement peut être directement exploité, par exemple à travers un moulin à eau, ou plus couramment converti en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique [05].

Cette forme d'énergie dépend du cycle de l'eau, qui est alimenté par l'action du soleil. L'eau des océans et de la terre s'évapore sous l'effet de la chaleur solaire, se condense en nuages qui se déplacent avec le vent, et finalement provoquent des précipitations lorsqu'ils rencontrent des zones de température plus basse au-dessus des continents. Ces précipitations alimentent les eaux des lacs, des rivières et des océans, contribuant ainsi à la disponibilité de l'énergie hydraulique en tant que source renouvelable majeure [06].

On distingue différents types de centrales hydroélectriques suivant la hauteur de chute :

1. Centrales de haute chute : Elles ont des hauteurs de chutes supérieures à 300m et utilisent des turbines Pelton. Ces centrales se situent généralement dans les Alpes et d'autres régions très montagneuses. Elles ont une capacité de réservoir relativement faible.
2. Centrales de moyenne chute : Elles ont des hauteurs de chute comprises entre 30m et 300m et utilisent des turbines Francis. Ces centrales sont alimentées par l'eau retenue derrière un barrage construit dans le lit d'une rivière en région montagneuse. Elles possèdent un réservoir de grande capacité.
3. Centrales de basse chute : Elles ont des hauteurs de chute inférieures à 30m et utilisent des turbines Kaplan ou Francis. Ces centrales sont installées sur les fleuves ou les rivières à fort débit [04].

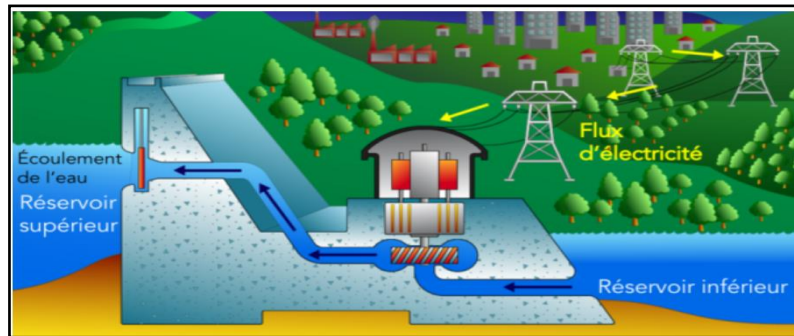


Figure I.7 : Source d'énergie renouvelable (centrale hydraulique)

- **L'énergie éolienne:**

L'énergie éolienne est produite grâce à la force du vent agissant sur les pales des éoliennes. Ces structures sont installées à terre (onshore) et en mer (offshore) dans des zones où le vent est à la fois puissant et constant. Afin de générer de l'électricité, le vent doit souffler à une vitesse minimale pour mettre en mouvement le rotor, généralement à partir de 4 m/s (14,4 km/h). Ce dernier entraîne alors l'arbre relié à l'alternateur, convertissant ainsi l'énergie mécanique en énergie électrique. Plus la vitesse du vent est élevée, plus la génératrice peut produire d'énergie, jusqu'à atteindre sa vitesse de fonctionnement maximale. Au-delà de cette limite, généralement fixée à 12 m/s (43 km/h), la production est souvent limitée pour éviter d'endommager la génératrice. En cas de vents très forts dépassant les 25 m/s (90 km/h), les éoliennes sont généralement arrêtées pour préserver leur intégrité structurelle [05].

Parmi les différentes composantes d'une éolienne le rotor, les pales, le multiplicateur, le générateur, le mécanisme d'orientation de la nacelle, le système hydraulique.

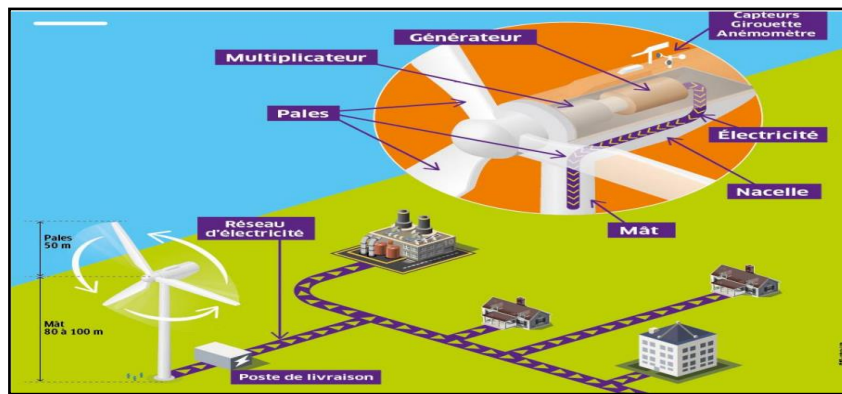


Figure I.8 : Source d'énergie renouvelable (l'énergie éolienne)

- **L'énergie géothermique :**

L'énergie géothermique est l'énergie thermique stockée et produite dans la terre. La température augmente à mesure que l'on descend vers le centre de la Terre. Cette chaleur est principalement générée par la radioactivité naturelle des roches de la croûte terrestre, ainsi que par les échanges thermiques avec les zones internes de la Terre, dont les températures peuvent atteindre jusqu'à 4300°C. Cependant, pour exploiter cette chaleur, il est nécessaire que les formations géologiques souterraines soient poreuses ou perméables et contiennent des aquifères.

On distingue quatre types de géothermie :

la haute, la moyenne, la basse et la très basse énergie [04]

1. Haute énergie (>150°C) : Profonde et chaude, utilisée pour produire de l'électricité.
2. Moyenne énergie (100-150°C) : Chaleur des nappes profondes pour l'électricité et le chauffage.
3. Basse énergie (30-100°C) : Pour le chauffage urbain et certaines industries.
4. Très basse énergie (<30°C) : Utilisée pour la climatisation et le chauffage avec des pompes à chaleur géothermiques.

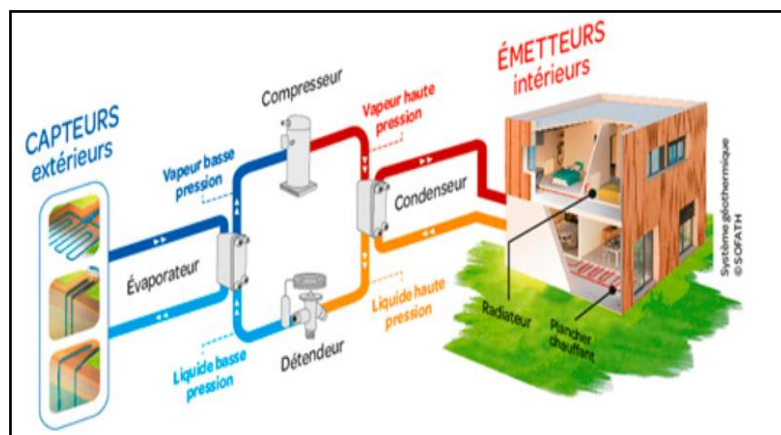


Figure I.9 : Source d'énergie renouvelable (centrale géothermique)

- **L'énergie solaire (photovoltaïque) :**

L'effet photovoltaïque se produit lorsque des photons sont absorbés par un matériau semi-conducteur, ce qui génère une tension électrique. Les cellules photovoltaïques transforment le rayonnement solaire en courant continu, pouvant être utilisé pour alimenter des appareils ou recharger des batteries. Les panneaux photovoltaïques, composés de cellules à base de silicium, ont la capacité de convertir les photons en électrons. Lorsque la demande en énergie dépasse la capacité d'une seule cellule, les cellules sont regroupées pour former un module photovoltaïque, parfois appelé à tort panneau solaire. Ces modules ont d'abord été utilisés pour alimenter des satellites en orbite, puis des équipements dans des endroits isolés. La réduction des coûts de

Production a permis d'étendre l'utilisation de l'énergie photovoltaïque à la production d'électricité sur les réseaux électriques [04].

Cette installation de photovoltaïque nécessite des panneaux solaires, un onduleur et un compteur. Les panneaux solaires convertissent la lumière en électricité continue, l'onduleur transforme cette électricité en courant alternatif compatible avec le réseau, et le compteur mesure la quantité d'électricité injectée dans le réseau [08].

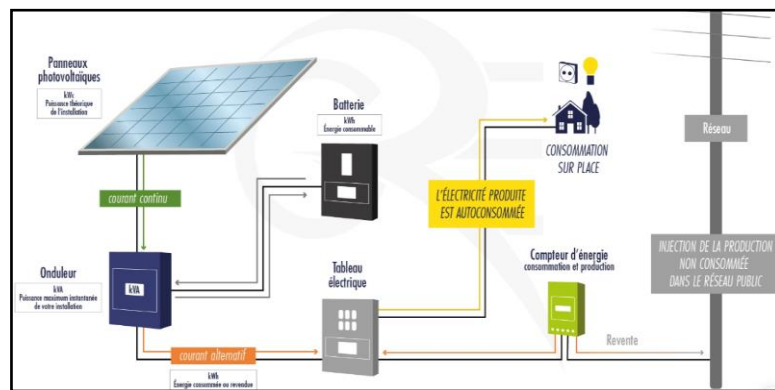


Figure I.10 : Source d'énergie renouvelable (Installation photovoltaïque)

I.2 Stockage de l'énergie électrique :

Le stockage de l'énergie électrique est sans aucun doute le défi le plus complexe de toute la chaîne de valeur de l'électricité, principalement en raison de son coût jugé prohibitif, sauf dans le cas des applications électroniques portables où les utilisateurs acceptent ce coût car ils n'ont pas vraiment d'autre choix ! La situation dans le secteur des transports est particulière : nos besoins en mobilité, qui ont été développés à une époque d'abondance des ressources fossiles, nous obligent à continuer à utiliser des carburants, de préférence liquides. En effet, la densité énergétique des carburants liquides dépasse largement celle des moyens de stockage d'électricité

(près de 100 fois plus élevée : plus de 10 kWh/kg pour un carburant liquide contre environ 100 Wh/kg pour des batteries électrochimiques performantes de type lithium). Ainsi, il est très probable que l'électricité, qui deviendra le principal vecteur énergétique des transports terrestres à l'avenir, sera produite à partir de ces carburants.

Bien que les condensateurs et inductances soient réputés être les seuls moyens de stockage direct de l'électricité, la notion de "stockage direct" est en réalité plus nuancée. On pourrait en effet considérer que dans ces composants, le stockage se fait sous forme électrostatique ou électromagnétique plutôt que sous forme purement électrique [09].

1.2.1 Les batteries électrochimiques:

Les batteries électrochimiques sont les principales technologies de stockage d'électricité, offrant diverses variantes telles que le plomb-acide, le nickel-cadmium, le nickel-métal-hydrure, le lithium, le sodium-soufre, le zinc-air, etc. Elles se distinguent par leur haute densité énergétique (jusqu'à 150 Wh/kg et 2000 W/kg pour le lithium) et leur avancée technologique, bien que leurs capacités restent limitées à quelques kWh. Cependant, leur principal inconvénient réside dans leur durée de vie relativement courte lors de cycles de charge/décharge intensifs. Ces batteries sont souvent utilisées pour des applications portables, de secours ou couplées au réseau, stockant des quantités d'énergie allant de quelques Wh à quelques dizaines de kWh. Malgré cela, les technologies plomb, NiCd et NaS ont été déployées dans des projets de stockage à grande échelle.

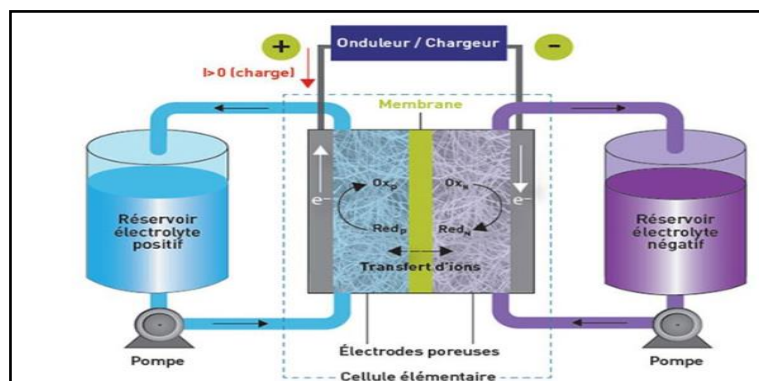


Figure I.11 : Les batteries électrochimiques

1.2.2 Les accumulateurs à volants d'inertie (FES) :

Les accumulateurs inertiels sont généralement classés, aux côtés des supercondensateurs et des SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage), comme des systèmes à faible constante de temps. C'est dans ce domaine qu'ils ont trouvé leurs premières applications commerciales, notamment dans les UPS de Piller et Caterpillar. Cependant, ils peuvent également être utilisés

pour des systèmes plus lents, avec une constante de temps de l'ordre de l'heure, ce qui élargit leur champ d'application, comme illustré par Beacon Power, La figure 11 montre un exemple d'architecture [Ber_03] ainsi qu'un exemple de réalisation commercialisée.

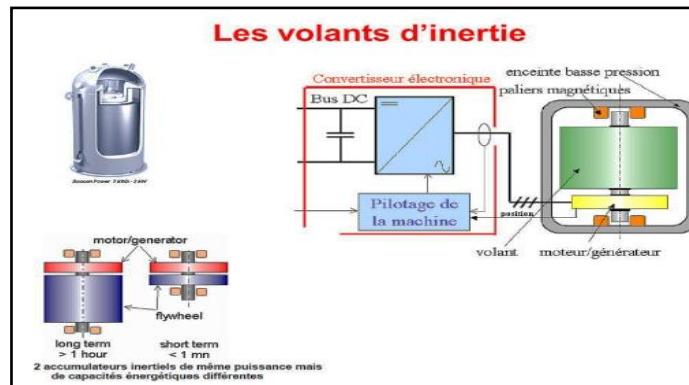


Figure I.12 : Les volants d'inertie.

1.2.3 Les systèmes à air comprimé en bouteilles :

Il est intéressant de noter que les systèmes à air comprimé en bouteilles utilisent un compresseur électrique pour comprimer de l'air à haute pression (200 bars ou plus) dans des bouteilles. Cependant, ce processus de compression ou de détente entraîne des pertes énergétiques, qui peuvent parfois être valorisées dans certaines applications. De plus, le rendement électrique de ces systèmes est souvent médiocre.

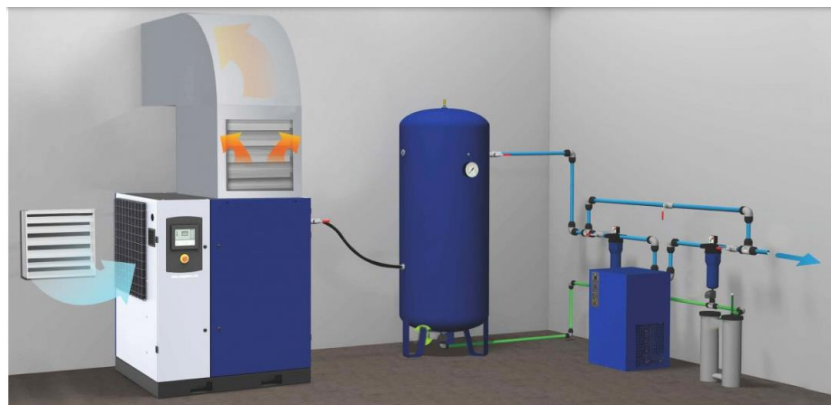


Figure I.13 : le stockage d'Air comprimé industriel

1.2.4 Le stockage d'air comprimé en caverne CAES (Compressed Air Energie Storage) :

Le stockage d'air comprimé en caverne, également connu sous le nom de CAES (Compressed Air Energy Storage), est une technologie relativement mature avec plusieurs installations de grande puissance déjà en place. La mise en place de systèmes CAES nécessite des conditions géologiques favorables permettant la création de grandes cavités, telles que d'anciennes mines de sel par exemple.

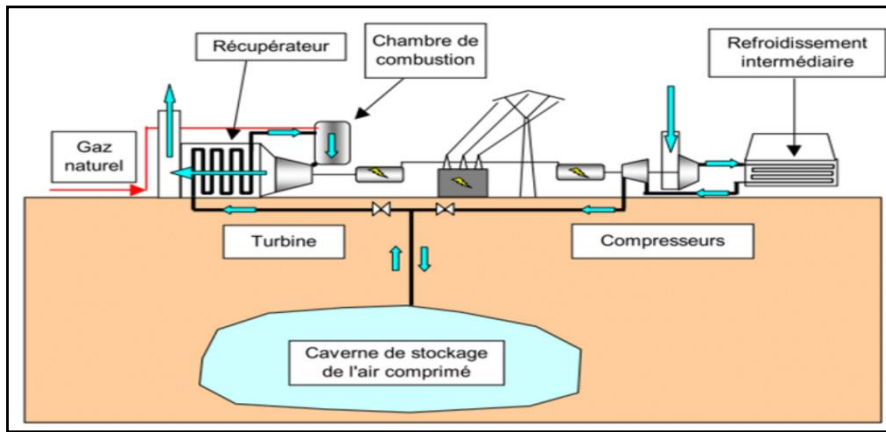


Figure I.14 : Le stockage d'air comprimé en caverne.

1.2.5 Les systèmes électrolyseur-hydrogène-pile à combustible (ou à PAC réversible):

Cependant, la production d'hydrogène par ces systèmes pourrait devenir avantageuse dans le cadre de réseaux d'hydrogène bien développés. Cette approche permettrait de convertir les surplus d'électricité en hydrogène, qui pourrait ensuite être injecté dans ces réseaux pour une utilisation directe, par exemple dans les transports. Cette utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique pourrait contribuer à une meilleure intégration des énergies renouvelables intermittentes dans le système énergétique global.

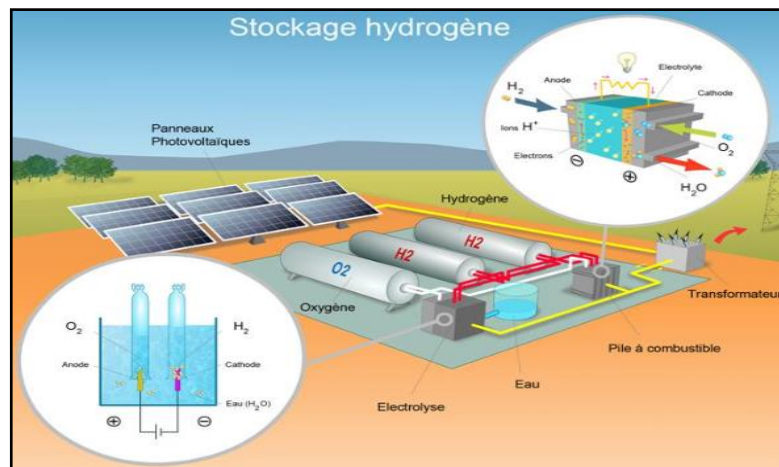


Figure I.15 : Stockage hydrogène.

1.2.6 Les systèmes hydrauliques gravitaires centrales de pompage-turbinage (pumped hydro) :

Les systèmes hydrauliques gravitaires, tels que les centrales de pompage-turbinage (pumped hydro), sont actuellement la technologie dominante dans de nombreuses grandes puissances. Ces systèmes ont des rendements sur cycle compris entre 65 et 80%, ce qui en fait une option relativement efficace pour le stockage d'énergie à grande échelle. La contrainte principale associée à ce type de technologie est la nécessité de disposer de sites présentant un relief adapté pour la construction de réservoirs en altitude. Il est important de noter qu'une grande

quantité d'eau stockée en hauteur ne se traduit pas nécessairement par une grande quantité d'énergie stockée.

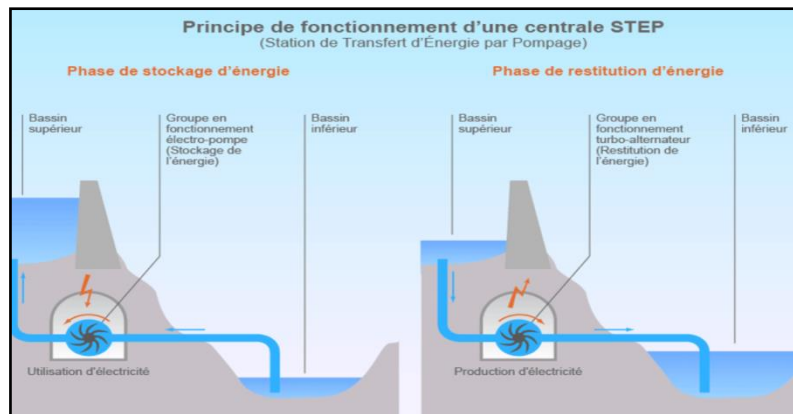


Figure I.16 : Centrale de pompage hydraulique.

1.2.7 Les batteries à circulation (flow batteries) :

Les batteries à circulation, aussi appelées flow batteries, offrent une solution innovante pour contourner les limitations des accumulateurs électrochimiques classiques. Dans ces derniers, les réactions électrochimiques génèrent des composés solides qui sont stockés directement sur les électrodes, limitant ainsi la capacité de stockage locale. En revanche, dans les batteries à circulation d'électrolyte, les composés chimiques responsables du stockage de l'énergie restent sous forme liquide et en solution dans l'électrolyte. Cette approche permet de pomper l'électrolyte vers des réservoirs externes dont le volume représente l'énergie stockée, offrant ainsi une plus grande flexibilité en termes de capacité de stockage. Il y a trois technologies principales en développement dans le domaine des batteries à circulation, utilisant des électrolytes à base de Zinc-brome (ZnBr), Sodium-brome (NaBr) et Vanadium-brome (VBr). Ces technologies présentent un grand potentiel pour le stockage d'énergie à grande échelle, notamment dans le contexte des réseaux électriques intelligents et des énergies renouvelables intermittentes.

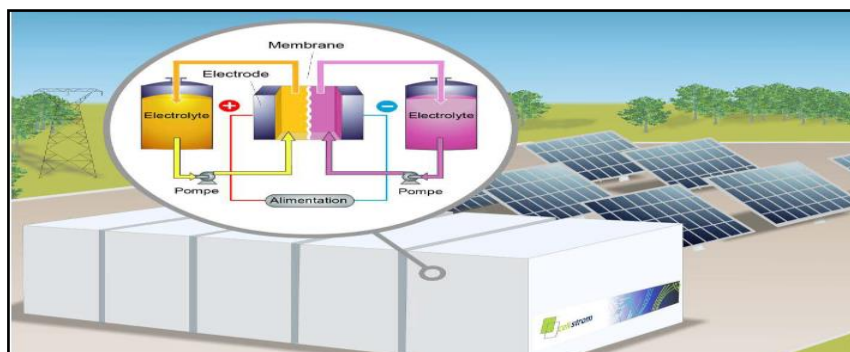


Figure I.17 : Les batteries à circulation (flow batteries).

1.2.8 Le stockage de chaleur haute température avec turbine :

Le stockage de chaleur haute température avec turbine est un système encore à l'état de projet qui n'a pas encore été réalisé, mais qui suscite un intérêt croissant. Dans ce système, des réfractaires sont chauffés par des résistances électriques lors de la phase de stockage de chaleur. L'air chaud ainsi généré est ensuite injecté dans une turbine à cycles combinés pour récupérer l'énergie accumulée, avec des rendements attendus autour de 60%. Ce type de stockage de chaleur présente l'avantage de ne pas être limité par des contraintes géologiques, contrairement à d'autres technologies de stockage d'énergie. De plus les pertes d'autodécharge sont relativement faibles surtout pour des systèmes de grandes dimensions. En outre, les coûts d'investissement envisagés pour ce type de système sont parmi les plus bas, ce qui en fait une option attrayante du point de vue économique.

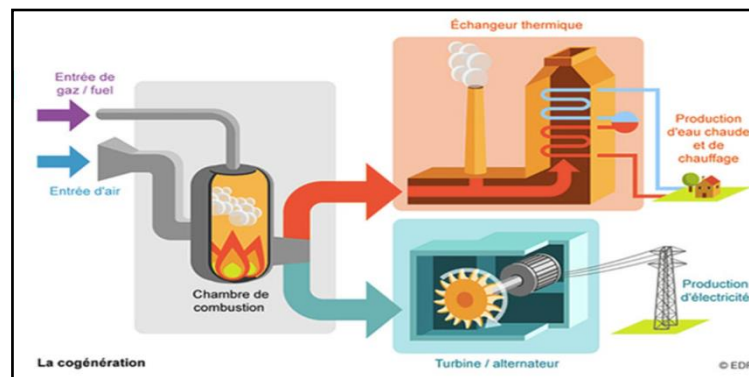


Figure 1.18 : le stockage de chaleur haute température avec turbine.

I.3 L'hydrogène :

L'hydrogène, nom vient du grec signifiant "qui produit de l'eau", est un élément chimique de symbole H. Il est incolore, inodore et insipide, et possède un numéro atomique de 1. Initialement, l'hydrogène était souvent confondu avec d'autres gaz. C'est grâce aux travaux du chimiste anglais Henry Cavendish en 1766 que l'hydrogène a été identifié comme un gaz distinct. Cavendish a démontré que l'hydrogène était produit par l'action de l'acide sulfurique sur les métaux. Il a également montré que l'hydrogène pouvait se combiner avec l'oxygène pour former de l'eau.

Comme la plupart des éléments gazeux, l'hydrogène est un élément chimique diatomique, composé de molécules à deux atomes. Il a les points d'ébullition et de fusion les plus bas après l'hélium, fondant à $-259,2^{\circ}\text{C}$ et bouillant à $-252,77^{\circ}\text{C}$. Sous pression atmosphérique à 0°C , il est un gaz avec une densité de 0,089 et une masse atomique de 1,007. L'hydrogène liquide, obtenu pour la première fois en 1898 par Sir James Dewar, est incolore avec une densité de 0,070. Lorsqu'évaporé rapidement sous faible pression, il se transforme en un solide incolore. Ces

caractéristiques uniques font de l'hydrogène un élément d'intérêt dans divers domaines scientifiques [10].

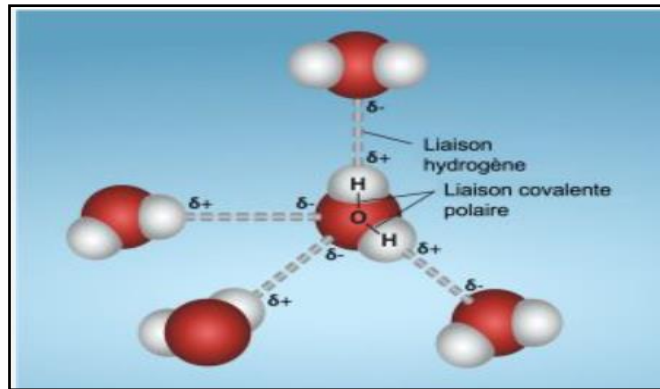


Figure I.19 : Liaison hydrogène

I.4 Production et transport et stockage :

Le développement des systèmes de production d'hydrogène nécessite une compréhension approfondie des aspects suivants :

1. Conditions techniques de fabrication : Cela inclut la pureté de l'hydrogène, la pression requise, les quantités produites, l'utilisation des sous-produits, etc.
2. Définition et développement des technologies d'utilisation de l'hydrogène.
3. Établissement de partenariats pour la commercialisation des technologies associées à l'hydrogène.

Le coût de l'hydrogène livré dépend de la production, du stockage et des frais de transport. Certains marchés peuvent favoriser une production centralisée à haut débit, tandis que d'autres préféreront une production décentralisée de petite taille. Il est essentiel d'analyser la taille optimale des procédés de production d'hydrogène, de stockage et d'infrastructures de distribution en fonction des spécificités régionales. Les coûts globaux doivent être compétitifs par rapport aux autres sources d'énergie alternatives [11]. Les méthodes thermiques de production d'hydrogène sont prometteuses. La dissociation directe présente le meilleur rendement thermique, suivi de la thermochimie, de l'électrolyse et de la photocatalyse. L'électrolyse peut être utilisée pour le stockage des énergies intermittentes dans des régions éloignées ou non connectées au réseau électrique [1 2].

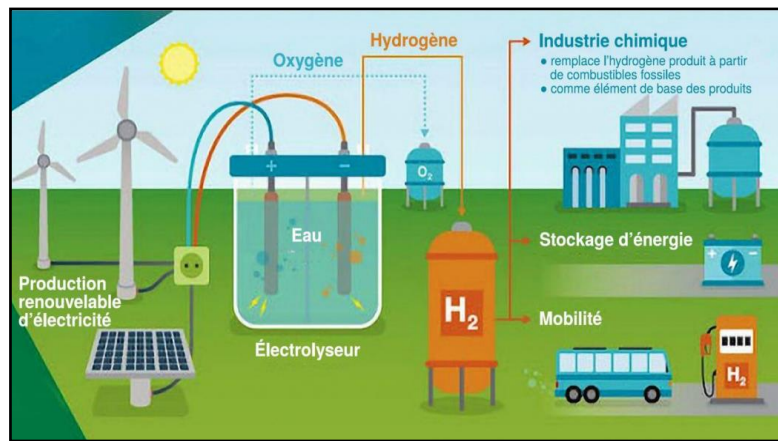


Figure I.20 : Production de l'hydrogène à partir des énergies renouvelables et stockage, Transport.

I.5 L'hydrogène vert :

L'hydrogène est l'élément chimique le plus simple, avec un noyau composé d'un unique proton et un seul électron. La molécule de dihydrogène (H₂) est formée de deux atomes d'hydrogène. En général, on utilise le terme "hydrogène" pour désigner le dihydrogène.

Bien que l'hydrogène soit abondant à la surface de la Terre, il n'existe pas à l'état pur et est toujours lié à d'autres éléments chimiques, notamment dans des molécules telles que l'eau et les hydrocarbures. Les organismes vivants, qu'ils soient animaux ou végétaux, contiennent également de l'hydrogène, ce qui fait de la biomasse une source potentielle d'hydrogène.

Pour extraire l'hydrogène de sources primaires telles que les hydrocarbures, la biomasse ou l'eau, une certaine quantité d'énergie est nécessaire. Ainsi, l'hydrogène est considéré comme un vecteur énergétique, tout comme l'électricité.

L'hydrogène pourrait être une source d'énergie quasi inépuisable, à condition de pouvoir le produire en quantité suffisante et à un coût compétitif, idéalement à partir d'énergies nucléaires et renouvelables.

La technologie de l'hydrogène englobe l'ensemble des technologies étudiées pour produire de l'hydrogène, le stocker et le convertir à des fins énergétiques [13].

L'hydrogène est en effet le vecteur d'énergie le plus polyvalent. Contrairement aux sources d'énergie conventionnelles qui ne peuvent être converties en énergies utiles (mécanique, thermique ou électrique) que par un seul processus, la combustion, l'hydrogène peut être converti de quatre manières différentes :

- ✓ Etre directement transformé en vapeur.

- ✓ Être converti directement en chaleur par combustion catalytique.
- ✓ Être converti directement en électricité par des procédés électrochimiques.
- ✓ Agir comme une source de chaleur et /ou dissipateur de chaleur par réaction chimique [13].

Afin de lutter contre les émissions de plus en plus importantes de gaz à effet de serre plusieurs experts internationaux recommandent l'utilisation du carburant hydrogène. En effet la combustion de l'hydrogène ne produit que de l'eau ; utilisé dans les piles à combustible, il produit de l'électricité à un rendement supérieur aux machines thermiques. L'hydrogène est intéressant, car il contribue à la préservation de l'environnement en une boucle fermée (Figure 19) et résout les problèmes de pollutions particulièrement où l'effet de serre est important.

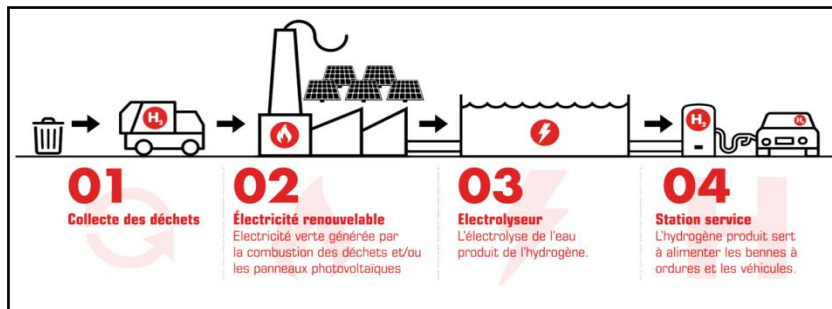


Figure I.21 : Cycle de l'hydrogène vert

I.6 Electrolyseur de de l'eau :

L'électrolyse de l'eau est un processus qui utilise un courant électrique pour décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène. Cela se fait dans une cellule électrolytique contenant solution d'eau avec un électrolyte (comme de l'acide sulfurique ou de l'hydroxyde de sodium), Lorsque le courant passe à travers la cellule des réactions chimiques se produisent aux électrodes [06]. De là nous concluons l'électrolyseur pour la production d'hydrogène est un système complexe composé de cellules disposées en série, d'appareils pour assurer les conditions d'entrée optimales en eau et électricité, de stockage de l'hydrogène en sortie, et d'un dispositif pour gérer la chaleur produite. L'optimisation de ces différents éléments est essentielle pour assurer un fonctionnement efficace et fiable de l'électrolyseur [14].

A l'anode (électrode positive) : L'oxydation de l'eau produit de l'oxygène gazeux (O₂)

La demi-réaction à l'anode est : $2 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{O}_2(\text{g}) + 4 \text{H}^+(\text{aq}) + 4 \text{e}^-$

Cette réaction montre que l'eau est oxydée, produisant de l'oxygène gazeux, des ions hydrogène (H⁺) et des électrons.

A la cathode (électrode négative) : La réduction des ions hydrogène (H⁺) produit de l'hydrogène gazeux (H₂). La demi-réaction à la cathode est : $4 \text{H}^+(\text{aq}) + 4 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}_2(\text{g})$. Cette

réaction montre que les ions hydrogène sont réduits, produisant de l'hydrogène gazeux. Donc, à l'anode, l'oxydation de l'eau produit de l'oxygène gazeux, tandis qu'à la cathode, la réduction des ions hydrogène produit de l'hydrogène gazeux. Qui peuvent être utilisés à diverses fins [06]. La réaction de décomposition s'écrit :

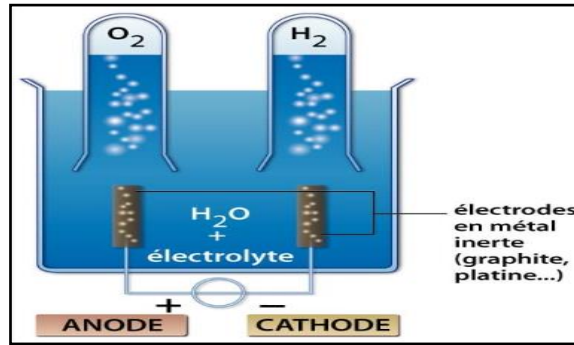
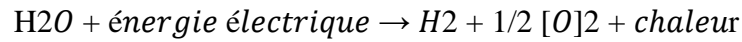


Figure I.22 : Electrolyser de l'eau

Donc l'électrolyse de l'eau est une méthode de production d'hydrogène propre, efficace et respectueuse de l'environnement, offrant un hydrogène de haute pureté adapté à diverses applications industrielles et énergétiques [15].

I.7 Pile à combustible PAC :

La pile à combustible fonctionne en exploitant la réaction d'oxydation de l'hydrogène sur une électrode (anode) et la réduction de l'oxygène sur une autre électrode (cathode). Cette réaction électrochimique génère de l'électricité, de la chaleur et de l'eau comme sous-produits.

I.7.1. Concept générale :

La pile à combustible nécessite en effet uniquement de l'hydrogène et de l'oxygène pour fonctionner. L'hydrogène est généralement fourni à l'anode de la pile à combustible, tandis que l'oxygène (généralement de l'air) est fourni à la cathode. Ces deux réactifs réagissent à travers la membrane électrolytique de la pile à combustible pour produire de l'électricité de manière propre et efficace.

Dans le côté de l'anode l'hydrogène se décompose selon la demi réaction (l'oxydation de



Dans le côté de la cathode l'oxygène se décompose selon le demi réaction (la réduction de



Le bilan global de la réaction se produisant dans une pile à combustible est :

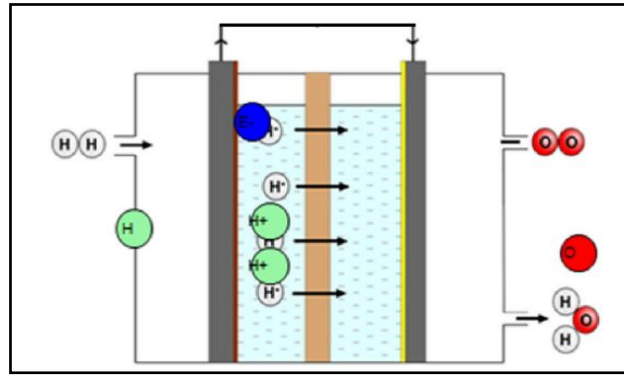
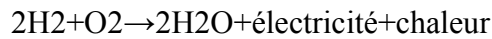


Figure I.23 : Schéma de fonctionnement d'une pile à combustible.

Les électrolytes des piles à combustible peuvent être de nature liquide ou solide, et leur choix dépend du type de pile à combustible utilisé. Certaines piles fonctionnent à haute température, comme les piles à combustible à oxyde solide (SOFC), tandis que d'autres fonctionnent à basse température, comme les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC). Les piles à combustible nécessitant des catalyseurs en métal noble, tels que le platine, pour améliorer les réactions aux électrodes sont courantes, en particulier pour les réactions d'oxydation de l'hydrogène et de l'oxygène. En ce qui concerne les carburants et les oxydants utilisés dans les piles à combustible, elles peuvent fonctionner avec divers assortiments de carburants et d'oxydants. Cependant, l'hydrogène est largement reconnu comme le carburant le plus efficace en raison de sa réactivité électrochimique élevée par rapport aux autres carburants tels que les hydrocarbures ou les alcools. L'hydrogène est donc souvent privilégié pour son rendement élevé et sa propreté en termes d'émissions. De même, l'oxygène est considéré comme le meilleur oxydant en raison de sa haute réactivité et de son abondance dans l'air.

L'utilisation de l'oxygène de l'air comme oxydant dans les piles à combustible simplifie le processus et réduit les coûts, tout en contribuant à une réaction efficace et propre pour la production d'électricité [16].

I.7.1. Les différents Type de PAC :

Les piles à combustible sont classifiées en différents types en fonction de la nature de l'électrolyte utilisé, ce qui influence également la température de fonctionnement de la pile. Voici quelques exemples de types de piles à combustible en fonction de leur électrolyte :

- **AFC (Alkaline Fuel Cell) :** Pile à combustible alcaline utilisant une solution d'électrolyte alcalin, souvent de l'hydroxyde de potassium ou de l'hydroxyde de sodium. Elle fonctionne à des températures relativement basses.

- **MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)** : Pile à combustible à carbonate fondu utilisant un électrolyte à base de sels fondus de carbonates alcalins. Elle fonctionne à des températures élevées.
- **SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)** : Pile à combustible à oxyde solide utilisant un électrolyte solide en céramique conductrice d'oxygène. Elle fonctionne à des températures très élevées.
- **PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)** : Pile à combustible à acide phosphorique utilisant de l'acide phosphorique comme électrolyte. Elle fonctionne à des températures modérées.
- **PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)** : Pile à combustible à membrane polymère échangeuse de protons utilisant une membrane polymère conductrice de protons. Elle fonctionne à des températures relativement basses et est largement utilisée dans les applications mobiles.
- **DMFC (Direct Méthanol Fuel Cell)** : Pile à combustible alimentée directement par le méthanol, sans nécessiter de reformage externe. Elle utilise souvent une membrane polymère pour l'échange de protons et fonctionne à des températures modérées [17].

Chaque type de pile à combustible a ses avantages et ses inconvénients en termes de performances, de coûts et d'applications spécifiques, ce qui permet de répondre à divers besoins en matière de production d'électricité propre et efficace.

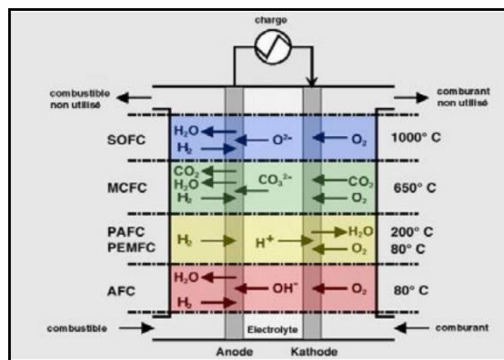


Figure I.24 : Différents types des PAC.

La figure (Fig.I.5) présente les réactions à l'anode et à la cathode. Les PAC sont groupées en fonction du type d'ion qui assure le transfert de charge.

Systèmes	Anode	Electrolyte	Cathode	Température
AFC	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\leftarrow OH^- \leftarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$	60-80 °C
PEMFC PAFC DMFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\rightarrow H^+ \rightarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	60-220 °C
MCFC	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^{2-} \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$\leftarrow CO_3^{2-} \leftarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$	600-660 °C
ITSOFC SOFC	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^{2-} \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4O^{2-} \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	$\leftarrow O^{2-} \leftarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$	600-1000 °C

Figure I.25 : Réactions chimiques des différentes piles.

I.7.3. Pile à membrane à électrolyte polymère (PEMFC) :

La technologie des piles à combustible à membrane polymère échangeuse de protons (PEMFC) est en effet devenue très populaire, notamment après l'introduction des membranes Nafion dans les années 80. Les PEMFC fonctionnent à des températures relativement basses, généralement autour de 80°C, afin de maintenir l'eau à l'état liquide dans la membrane. Cette membrane permet le passage des protons H⁺ tout en bloquant le passage des autres gaz, dans les PEMFC, un catalyseur à base de platine est utilisé aux électrodes pour faciliter les réactions d'oxydation de l'hydrogène à la cathode et de réduction de l'oxygène à l'anode. Cependant, le monoxyde de carbone présent dans le carburant peut être absorbé sur ce catalyseur, ce qui peut réduire l'efficacité de la pile à combustible. Les plaques bipolaires des PEMFC peuvent être conçues de trois manières différentes : en composite, en métal ou en graphite. Chaque type de plaque a ses propres caractéristiques en termes de conductivité électrique, de résistance aux réactions chimiques et de durabilité.

Les PEMFC présentent plusieurs avantages, tels qu'une densité de puissance élevée, un poids léger et un faible volume, ce qui les rend particulièrement adaptées aux applications mobiles et aux véhicules électriques. Leur efficacité, leur compacité et à démarrer rapidement en font une technologie prometteuse pour la production d'électricité propre et efficace [18].

Le principe de base de fonctionnement de la pile à combustible repose en effet sur le concept d'électrolyse inverse de l'eau. Les combustibles utilisés peuvent être de l'hydrogène pur ou des hydrocarbures. Pour utiliser des combustibles tels que le méthane ou d'autres alcools, des températures de fonctionnement plus élevées sont nécessaires. C'est pourquoi l'hydrogène pur est souvent privilégié pour les piles à combustible fonctionnant à basse température, car les carburants traditionnels sont moins réactifs à ces températures la réaction chimique fondamentale qui se produit dans une pile à combustible est une réaction d'oxydoréduction électrochimique.

Elle met en jeu l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur. La réaction chimique globale est la suivante : $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + \text{électricité} + \text{chaleur}$

Cette réaction génère de l'électricité en produisant de l'eau et de la chaleur comme sous-produits. Elle est au cœur du fonctionnement des piles à combustible et illustre le processus par lequel l'énergie chimique contenue dans l'hydrogène est convertie en électricité de manière propre et efficace [19].

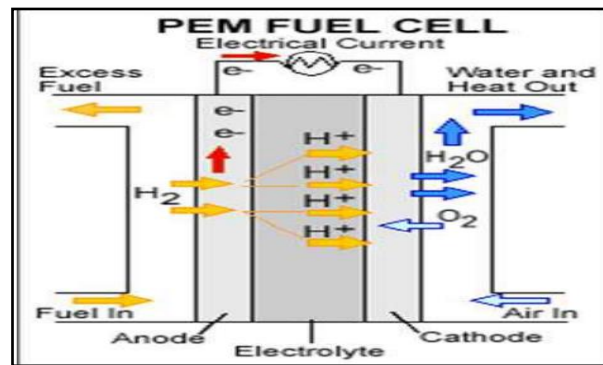


Figure I.26 : Schéma de principe d'une PEMFC

I.8 Conclusion :

Ce premier chapitre a été consacré à une présentation générale de l'état de l'art dans le domaine de l'hydrogène vert et les pile combustible PEMFC que montre des avancées significatives et prometteuses pour le développement de technologies propres et efficaces dans le domaine de la production d'énergie. Nous avons Commencé par donner les sources de production de l'énergie électrique que nous utiliserons dans notre système, comme (l'énergie Solar PV), puis nous abordons la manière de la stocker, En deuxième lieu nous parlé sur l'hydrogène et comment production et stockée, en En troisième lieu nous avons parlé sur l'hydrogène vert et expliqué fonctionnement d'électrolyser de l'eau et leur différent type de pile combustible de PAC.

Chapitre II

Modélisation des systèmes hydrogène vert/PEMFC

II.1 Introduction :

Il est en effet crucial de développer des méthodes de production et de stockage d'hydrogène vert efficaces et durables pour favoriser la transition vers une économie plus propre et plus respectueuse de l'environnement. L'utilisation de sources d'énergie renouvelable pour alimenter le processus d'électrolyse de l'eau est essentielle pour garantir que l'hydrogène produit est réellement vert, c'est-à-dire sans émissions de carbone.

Les différentes méthodes de stockage de l'hydrogène, telles que le stockage comprimé, le stockage liquide et le stockage par hydrures métalliques, offrent des avantages et des défis spécifiques en termes de capacité de stockage, d'efficacité, de sécurité et de coûts. Chaque méthode de stockage peut être adaptée en fonction des besoins spécifiques d'une application donnée. Il est également important de souligner que la recherche et le développement de nouvelles technologies de production et de stockage de l'hydrogène vert sont en constante évolution, avec de nombreuses avancées et innovations émergentes pour améliorer la performance et la durabilité de ces processus, En ce qui concerne la modélisation, le contrôle et la simulation d'un panneau photovoltaïque, ces outils sont essentiels pour comprendre et optimiser le fonctionnement de ces systèmes de production d'énergie solaire. En utilisant des modèles mathématiques et des simulations, il est possible d'analyser le rendement du panneau photovoltaïque en fonction de différents paramètres, de concevoir des systèmes plus efficaces et de mettre en place des stratégies de contrôle pour maximiser la production d'énergie solaire.

II.2 Modélisation du panneau photovoltaïque :

Un module PV est composé de cellules solaires connectées en série et en parallèle qui convertissent la lumière du soleil en électricité, qui est ensuite collectée et convertie en courant alternatif pour alimenter les appareils électriques.[20]

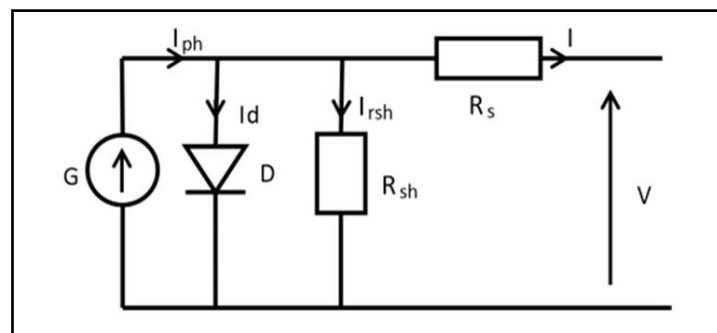


Figure II.1 : Circuit équivalent à une diode d'une cellule PV [42].

Le circuit équivalent du modèle général se compose d'un photo-courant (I_{ph}), d'une diode, d'une résistance parallèle (R_{sh}) exprimant un courant de fuite et d'une résistance série (R_s) due

aux contacts entre les semi-conducteurs et les parties métalliques, comme sur la figure (II.1). En appliquant la loi de Kirchhoff, le courant sera obtenu par l'équation suivante : [21]

$$I = I_{ph} - I_d - I_{rsh} \quad (II.1)$$

I_{ph} est un courant généré par la lumière ou la photo courant. est donnée par l'équation suivant:

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i \cdot (T - 298)] \cdot \frac{G}{1000} \quad (II.2)$$

I_{ph} : courant qui circule dans la résistance parallèle, est donnée par l'équation suivante :

$$I_{rsh} = \frac{V+I \cdot R_s}{R_p} \quad (II.3)$$

I_d : le courant de la diode, il est donné Par l'équation suivante :

$$I_d = I_0 \cdot \left[\exp \left(\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot K \cdot N_s \cdot T} \right) - 1 \right] \quad (II.4)$$

I_0 : le courant de saturation de la diode (A)

Q : Charge élémentaire (1.6.10-19 C).

K : constante de Boltzmann (1.38.10-23(SI)

N : coefficient d'idéalité de la cellule

N_s : nombre de cellules connectées en série

I_0 : courant de saturation de la diode donné par :

$$I_0 = I_{rs} \cdot \left(\frac{T}{T_n} \right) \cdot \exp \left[\frac{q \cdot E_{go} \cdot \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right)}{n \cdot K} \right] \quad (II.5)$$

Avec :

E_{go} : est l'énergie de gap du semi -conducteur utilisé dans la cellule en électronvolt (eV) .

I_{rs} : Le courant de saturation I_{rs} de la diode pour la température , T_n est donné par :

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\frac{q \cdot V_{oc}}{e^{n \cdot K \cdot N_s \cdot T - 1}}} \quad (II.6)$$

Avec :

Nous remplaçons dans l'équation (1), l'équation V_{oc} : est la tension en circuit ouvert caractéristique tension-courant d'une cellule solaire est donnée comme suit :

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot K \cdot N_s \cdot T}\right) - 1 \right] - I_{rsh} \quad (II.7)$$

La puissance générée par la cellule photovoltaïque s'obtient en multipliant l'expression précédente par la tension de sortie (V) et s'écrit comme.

$$P = V \cdot I_{ph} - V \cdot I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot K \cdot N_s \cdot T}\right) - 1 \right] - V \cdot I_{rsh} \quad (II.8)$$

Dans la description générale d'un panneau photovoltaïque, l'allure générale de la caractéristique d'un panneau photovoltaïque sous conditions standard 1000W/m² et 25°C est de la forme suivante : La figure II.2. Représente les caractéristiques courant-tension I_{pv} (V_{pv}) du module PV pour un éclairage et une tension donnée (G_n = 1000W/ m², T_n=25°C).

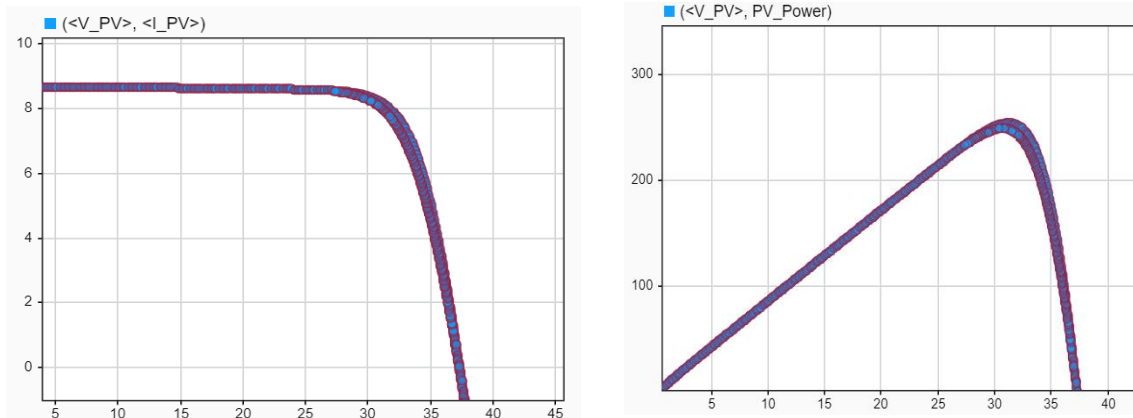


Figure II.2 : Caractéristique 2I_{pv}(V_{pv}) et P (V_{pv}) dans les conditions standar.

On remarque dans la caractéristique (courant-tension) que le module photovoltaïque possède trois zones de fonctionnement qui sont :

1. La zone (1) : le courant reste presque constant quel que soit la tension, pour cet intervalle, le module photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant
2. La zone (2) : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.
3. La zone (3) : correspond au coude de la caractéristique, la région intermédiaire en les deux zones précédentes, elle représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, ou le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

II.2.1. Etude de la source photovoltaïque du système

Pour choisir judicieusement le panneau solaire photovoltaïque qui va alimenter l'électrolyseur par l'électricité nécessaire à l'opération d'électrolyse, il est important de prendre en

compte les caractéristiques du panneau solaire et les besoins en énergie de l'électrolyseur. Le modèle retenu est un panneau solaire photovoltaïque avec une diode et deux résistances (R_{set} et R_{sh}) d'une puissance crête de 250W. Les caractéristiques à prendre en compte pour choisir ce panneau solaire sont les suivantes :

- ✓ Puissance crête ($P_{crête}$) : La puissance crête de 250W indique la puissance maximale que le panneau solaire peut produire dans des conditions optimales de luminosité et de température.
- ✓ Tension de circuit ouvert (V_{oc}) : Il s'agit de la tension maximale que le panneau solaire peut produire lorsqu'il n'est pas connecté à un circuit électrique.
- ✓ Courant de court-circuit (I_{sc}) : C'est le courant maximal que le panneau solaire peut produire lorsqu'il est court-circuité.
- ✓ Tension de fonctionnement optimale : Il s'agit de la tension à laquelle le panneau solaire fonctionne de manière optimale pour alimenter l'électrolyseur.
- ✓ Efficacité du panneau solaire : Il est important de choisir un panneau solaire avec une bonne efficacité pour maximiser la conversion de l'énergie solaire en électricité.

Panneau de marque SIEMENS SM 110-24 de 110 W. Avec les paramètres ci-dessous [22]

Tableau. II.1: Paramètres caractéristiques du panneau photovoltaïque utilisé dans le système

Puissance maximale du panneau P_{max}	250 Wc
Coefficient de température K_i K_v	4.3 Ma/°C 135.0 Mv/°C
Courant de court-circuit I_{cc}	8.63 A
Tension en circuit ouvert V_{co}	37.4 V
Résistance série R_s Résistance en parallèle R_p	0.4 Ω 131 Ω
Nombre de cellules N_s	60
Factor idéalité de la diode n	0.95
Conitions STC	1000 W/m ² 25°C

II.2.2. Commande MPPT du PV :

L'algorithme Perturbé and Observe (P&O) qui est couramment utilisé pour améliorer le Maximum Power Point Tracking (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques. L'algorithme P&O est une méthode itérative qui vise à obtenir le point de puissance maximale en mesurant les caractéristiques d'un panneau solaire, telles que la tension et le courant.

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension du panneau solaire d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et à analyser le comportement de la variation de la puissance produite par le panneau solaire. Cela permet de suivre et de maintenir le panneau solaire à son point de puissance maximale, même en cas de variations des conditions d'éclairement solaire.

La figure. II.3. Représente Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} .

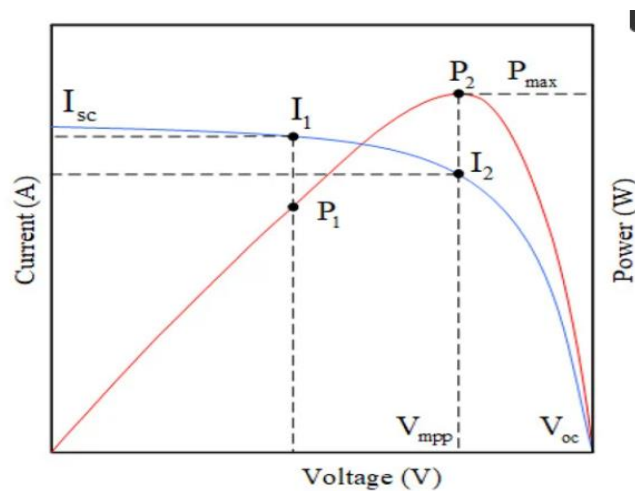


Figure II.3: Caractéristique de P_{pv} en fonction de la tension V_{pv} d'un panneau solaire [23]

Pour mettre en œuvre cet algorithme de commande MPPT de type P&O, il est en effet nécessaire d'avoir deux capteurs : un capteur mesurant le courant et un capteur mesurant la tension des panneaux solaires photovoltaïques. Ces capteurs permettent de surveiller en temps réel les caractéristiques électriques du panneau solaire et de calculer la puissance produite à chaque instant.

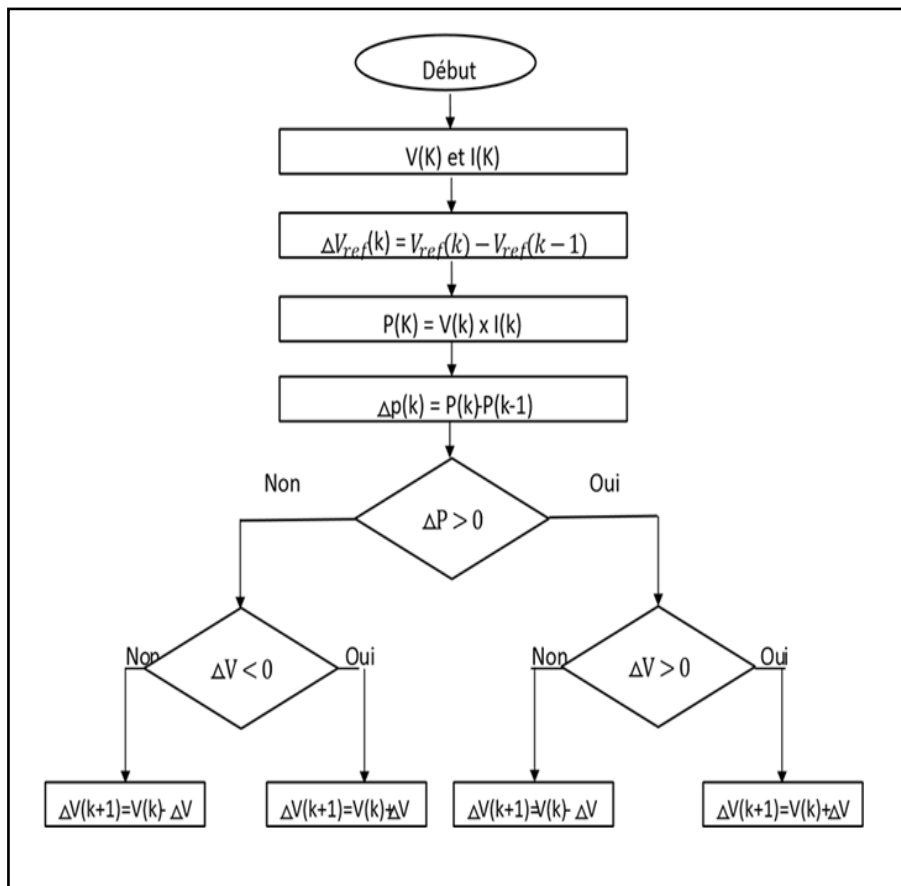


Figure II.4 : Algorithme de la méthode P&O

II.2.3. Résultats et interprétations :

La simulation du système sous commande MPPT avec PO à partir paramètres standard de module PV sous environnement Matlab-Simulink est à la base de cette partie pour estimer le comportement de cette source renouvelables sous conditions standard.

La figure ci-dessous présente le schéma sous Matlab-Simulink du système photovoltaïque avec la commande MPPT suivant l'Algorithme P&O.

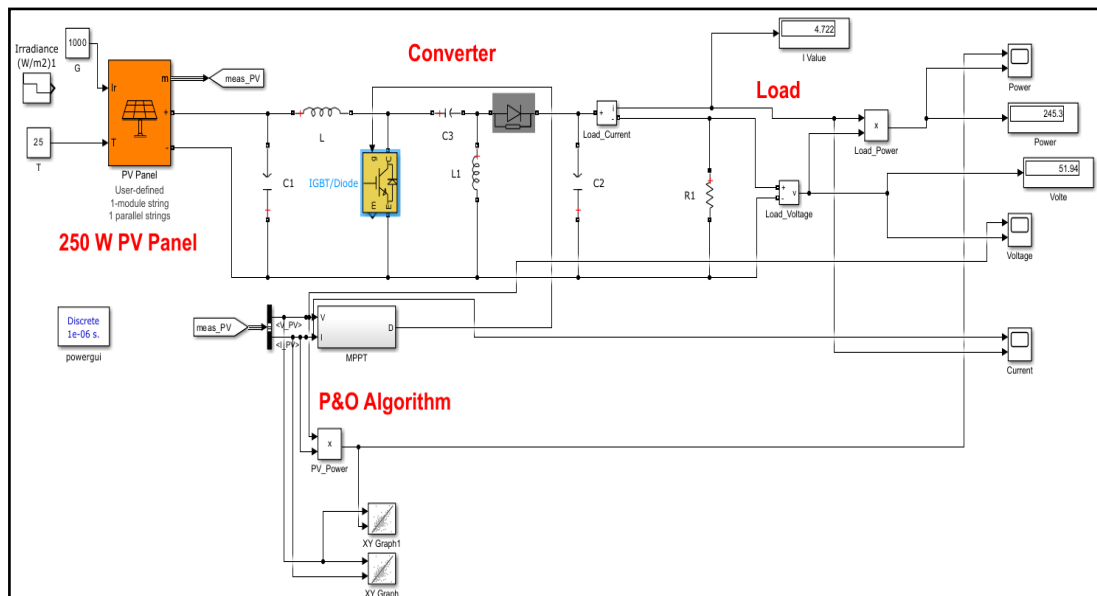


Figure. II.5: Modélisation d'un panneau PV avec la commande MPPT

II.2.3.1. Influence de la température :

Effectivement, la température joue un rôle crucial dans les performances des panneaux solaires photovoltaïques. Lorsque les cellules solaires sont exposées à la lumière du soleil, une partie de l'énergie absorbée est convertie en électricité, mais une autre partie est dissipée sous forme de chaleur, ce qui peut augmenter la température des cellules solaires.

L'augmentation de la température des cellules solaires peut avoir plusieurs conséquences sur les performances des panneaux photovoltaïques, notamment:

- ✓ Diminution de l'efficacité : Une augmentation de la température peut entraîner une diminution de l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en électricité, car la chaleur peut réduire la conductivité des matériaux et augmenter les pertes thermiques.
- ✓ Réduction de la tension : La température élevée peut provoquer une diminution de la tension de sortie des panneaux solaires, ce qui peut affecter la puissance maximale produite par le système.
- ✓ Augmentation du courant : En revanche, une augmentation de la température peut également entraîner une augmentation du courant de sortie des panneaux solaires, ce qui peut compenser en partie la diminution de la tension.

Nous avons tracé les caractéristiques P_{pv} - V_{pv} et I_{pv} - V_{pv} comme la figure (II.6) (II.7), pour des différentes températures, et avec un ensoleillement constant $G= 1000 \text{ W/m}^2$.

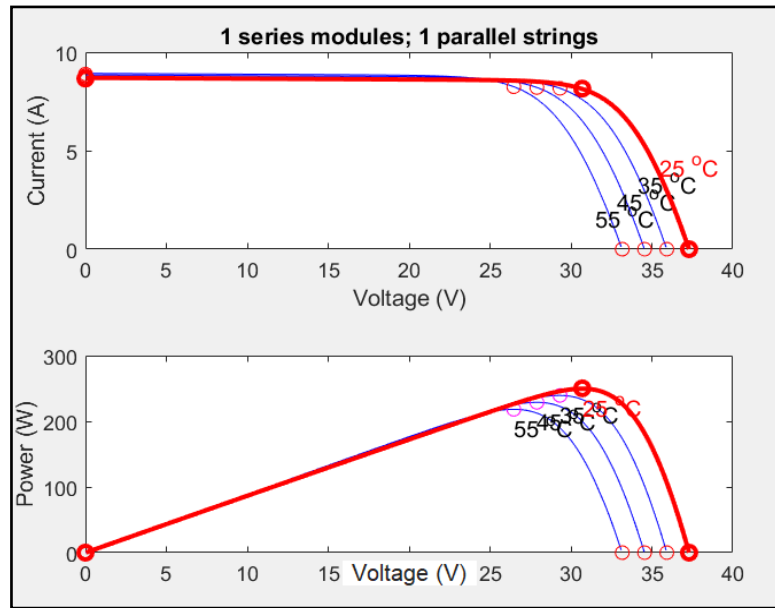


Figure. II.6 : Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ et $P_{pv} = f(V_{pv})$

C'est exactement ça, la température peut avoir un impact significatif sur les performances des cellules photovoltaïques, en particulier sur la tension de circuit ouvert. Il est important de prendre en compte cet effet lors de la conception et de l'installation de systèmes photovoltaïques pour assurer une efficacité optimale.

II.2.3.2. Influence de l'éclairement :

Elle met en évidence l'importance de l'éclairement sur la production d'énergie électrique d'un panneau solaire et introduit les graphiques I-V et P-V qui illustrent les variations de ces caractéristiques en fonction de l'éclairement, à une température constante $T = 25^\circ\text{C}$.

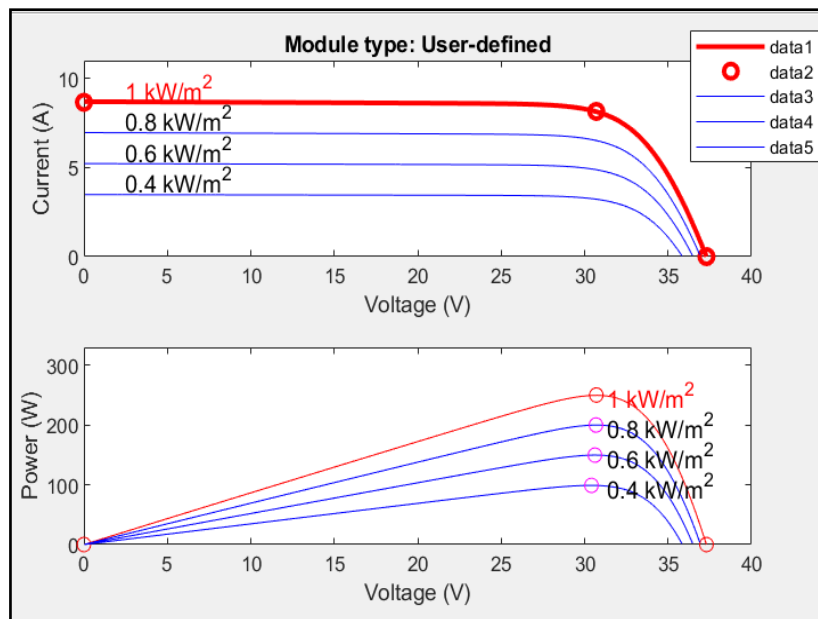


Figure. II.7 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ et $P_{pv} = f(V_{pv})$

II.2.4. Caractéristique électrique du module photovoltaïque avec l’algorithme MPPT :

En contrôlant le courant et la tension du panneau photovoltaïque, le MPPT permet d'optimiser le point de fonctionnement du panneau, indépendamment des courants et tensions de la charge connectée au système. Cela permet d'obtenir une efficacité maximale de conversion de l'énergie solaire en électricité et d'augmenter la performance globale du système photovoltaïque. Le MPPT est un élément essentiel dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la production d'énergie solaire en maintenant le panneau solaire à son point de puissance maximale, même dans des conditions environnementales changeantes.

L’application de la commande MPPT basée sur la méthode de perturbation et observation (P&O) sous conditions Standard (1000W/m^2 , $T=25^\circ\text{C}$) a abouti au résultat suivant :

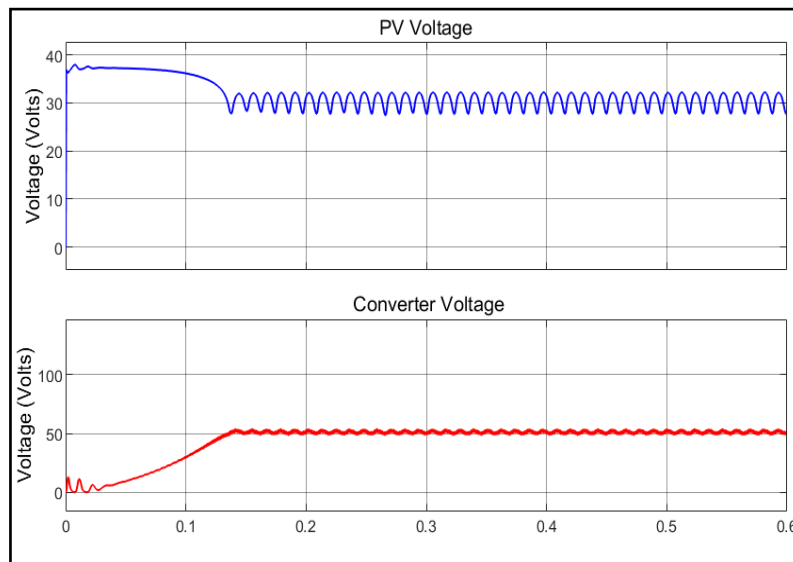


Figure. II.8 : Effet de la commande MPPT sur la tension du panneau PV

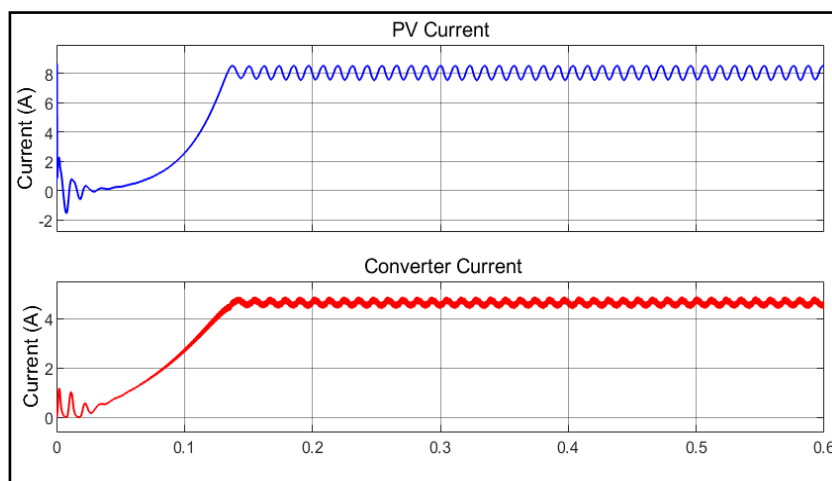


Figure.II.09 : Effet de la commande MPPT sur le courant du panneau PV

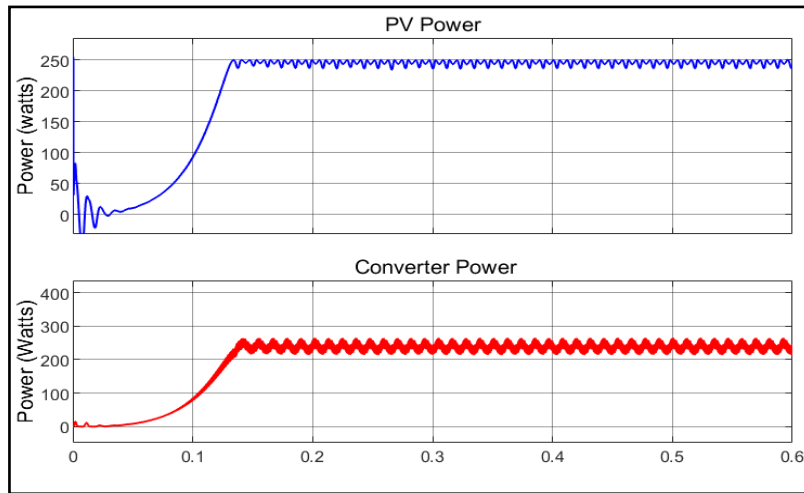


Figure. II.10 : Effet de la commande MPPT sur la puissance du panneau PV

II.2.5. Analyse des résultats :

L'influence de la température et de l'éclairement G est maitrisée par la commande MPPT par PO. Pour la puissance est maintenue à son maximum pour un intervalle de temps répartie sur trois cycles de variation [0s 2 s] ; [2s 4s] et [4s 6s].

II.3 Modélisation de l'électrolyseur :

L'électrolyse de l'eau est un processus important dans la production d'hydrogène, car l'hydrogène ainsi produit peut-être utiliser comme source d'énergie propre et renouvelable dans divers domaines, tels que le stockage d'énergie, les piles à combustible, les véhicules à hydrogène, etc.

Les électrolyseurs utilisés pour réaliser l'électrolyse de l'eau sont généralement composés de deux électrodes (une anode et une cathode) plongées dans une solution conductrice d'électrolyte (habituellement de l'eau salée ou une solution acide). Lorsque l'électricité est appliquée aux électrodes, des réactions d'oxydation et de réduction se produisent à chaque électrode, entraînant la séparation de l'eau en hydrogène et oxygène.



L'électricité est nécessaire pour le processus de production d'hydrogène. Les caractéristiques U-I d'un électrolyseur avancé sont définies comme [46] :

$$V_{\text{élec-Cell}} = V_{\text{rév}} + \frac{r_1 + r_2 T}{A} I + K_{\text{éle}} \ln \left(\frac{K_{T1} + \frac{K_{T2}}{T} + \frac{K_{T3}}{T^2}}{A} I + 1 \right) \quad (II.10)$$

Avec :

Véléc Cell : la tension aux bornes de la cellule (V) ;

V_{rév} : la tension réversible de cellule (V) ;

r₁, r₂ : les paramètres de résistance ohmique (Ω. m², Ω. m²/°C) ;

K_{elé}, K_{T1}, K_{T1}, K_{T1} : les paramètres de surtension V, m²/A, m².°C/A, m².) C²/A ;

La tension minimale ou réversible é d'une cellule d'électrolyseur correspond à l'énergie libre (ΔG) nécessaire pour décomposer la molécule d'eau, elle est donnée par la formule suivante :

$$V_{\text{rév}} = -\frac{\Delta G}{2 F} \quad (II. 11)$$

Δ : est l'énergie libre de la réaction d'électrolyse (J/mol) ;

F : La constante de Faraday (96.487 C/K.mol) ;

V_{rév} : peut-être exprimé comme une équation empirique comme :

$$V_{\text{rév}} = V_{\text{rév}}^0 - K_{\text{rév}} (T - 25) \quad (II. 12)$$

Avec :

V_{rév}⁰ : est la tension de cellule réversible à l'état standard (V) ;

K_{rév} : est coefficient empirique de température de é (V/°C) ;

Pour un électrolyseur constitué de n_c cellules en séries, la tension de sortie est définie comme:

$$V_{\text{élec}} = n_c \cdot V_{\text{élec, cell}} \quad (II.13)$$

II.3.1. Débit de production d'Hydrogène :

La loi de Faraday établit en effet une relation fondamentale entre la quantité de matière produite ou consommée lors d'une réaction électrochimique et la quantité d'électricité qui passe à travers le circuit. Plus précisément, la loi de Faraday stipule que la quantité de matière produite ou consommée est directement proportionnelle à la quantité de charge électrique qui a traversé le circuit. Dans le cas de l'électrolyse de l'eau pour produire de l'hydrogène, la loi de Faraday peut être appliquée pour déterminer le taux de production d'hydrogène en fonction du taux de transfert d'électrons aux électrodes de l'électrolyseur [24].

$$\dot{n}_{\text{H}_2, \text{prod}} = \eta_F \frac{N_c F}{2 F} \quad (II. 14)$$

Avec :

\dot{n}_{H_2} : débit de production d'Hydrogène (mole/sec) ;

η_F : rendement faradique ;

Rendement Faradique : est le rapport entre la quantité réelle et théorique de production maximale d'hydrogène. Une expression empirique pour la représentation de l'efficacité faraday est donnée par [47] .

$$\eta_F = \frac{\left(\frac{1}{A}\right)^2}{f_1 + \left(\frac{1}{A}\right)^2} f_2 \quad (II. 15)$$

Avec :

f_1, f_2 , ($mA^2 cm^{-4}$) , paramètres de calcul du rendement Faradique, Objectif de La Ventilation électrolyseur pour maintenir une température constante du système.

II.3.2. Modèle thermique :

La température de fonctionnement de l'électrolyseur affecte ses performances. Le taux de variation de température de l'électrolyseur est proportionnel à la différence de taux de chaleur généré, moins la perte de chaleur, et refroidissement chaleur, peut être exprimé comme [25] :

Avec:

$$C_t \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{gen} - \dot{Q}_{loss} - \dot{Q}_{cool} \quad (II. 16)$$

$C_t \dot{Q}_{gen}$: est la puissance calorifique : est la capacité thermique globale de l'électrolyseur ;
générée à l'intérieur de l'électrolyseur. Elle peut être écrite comme :

$$\dot{Q}_{gen} = \eta_c (V - V_{th}) \cdot I \quad (II. 17)$$

Avec :

Est la tension thermique: $V_{th} = -\frac{\Delta H}{2 F}$ (II. 18)

\dot{Q}_{pert} : perte de puissance calorifique. Elle peut être déterminée par :

$$\dot{Q}_{pert} = \frac{1}{R_t} (T - T_a) \quad (II.19)$$

R_t : est résistance thermique de l'électrolyseur ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)

T_a : La température ambiante ($^{\circ}\text{C}$)

$\dot{Q}_{\text{refroidissement}}$: La perte de puissance calorifique dû au refroidissement, peut être exprimée par

$$\dot{Q}_{\text{refroidissement}} = C_{\text{cm}}(T_{\text{cm,s}} - T_{\text{cm,e}})$$

(II.20)

Avec :

C_{cm} ; La capacité thermique de l'eau de refroidissement ($\text{J}/^{\circ}\text{C}$)

$T_{\text{cm,e}}$; La température de l'eau de refroidissement d'entrée ($^{\circ}\text{C}$):

$T_{\text{cm,s}}$: La température de l'eau de refroidissement de sortie, peut être exprimée :

$$T_{\text{cm,e}} = T_{\text{cm,s}} + (T - T_{\text{cm,e}}) \left(1 - \exp\left(-\frac{V_{\text{AHX}}}{C_{\text{cm}}}\right) \right) \quad (\text{II. 21})$$

Avec :

V_{AHX} : coefficient d'échange calorifique effective pour le processus de refroidissement, peut être exprimée par :

$$V_{\text{AHX}} = h_{\text{cond}} + h_{\text{conv}} \cdot I \quad (\text{II. 22})$$

h_{cond} : coefficient relatif à l'échange de chaleur en conduction ($\text{W}/^{\circ}\text{C}$);

h_{conv} : coefficient relatif à l'échange de chaleur en convection ($\text{W}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{A})$);

II.3.3. Implémentation du modèle d'électrolyseur dans Matlab/Simulink

Sur la base des équations mathématique présentées avant dans les modèle thermique et électrochimique, le modèle dynamique d'un l'électrolyseur alcalin a été développé sous Matlab/Simulink à l'aide des paramètres rapportés dans le tableau suivant :

Tableau. II.2 : Paramètres électrique d'un électrolyseur

Parameters		Valeur
Tension réversible de la cellule	U_{rev}	1.23 V
Coefficient de température	K_{rev}	$1.9310^{-3} \text{ V/}^\circ\text{C}$
Résistance ohmique $r_1 ; r_z$		$7.310^{-5} \Omega \cdot \text{m}^2$
Paramètres de surtension $s ; t_1$		0.185 V ; - 1.002m ² /A
t_2		8.4 24 m ² °C/A
t_3		247.3 m ² °C ² /A
Surface effective; A		0.25 m ²
Paramètres de calcul du rendement Faradique		0.96 cm ⁴ A ² / 250 m
Coefficient de transfert de chaleur $h_{conv} h_{cond}$		0.02 W/°C. A 7 W/°C
Capacité thermique C_t		625 KJ/°C
Résistance thermique R_t		0.167 C/W°

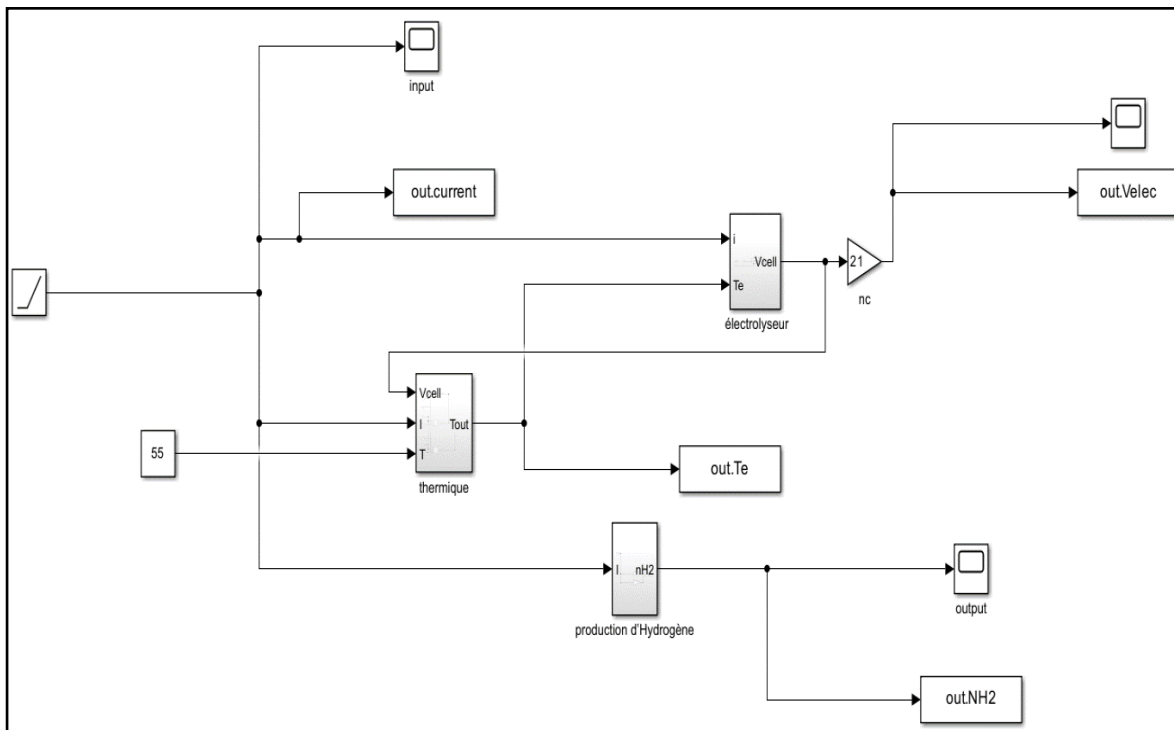


Figure.II.11 : Modélisation d'un électrolyseur sous Matlab/Simulink

II.3.3.1. Caractéristiques d'électrolyseur :

La figure. II.14 représente la variation de la tension en fonction de courant avec une température constante $T= 55\text{ C}^\circ$. D'après cette courbe que les caractéristiques d'électrolyseur sont non linéaires, On peut distinguer trois parties différentes sur la courbe caractéristique V-I, la première partie la tension augmente en une fonction exponentielle et immédiatement, la deuxième partie elle se manifeste sous forme linéaire, et dans la dernière partie la forme du signal de la tension se présente sous forme non linéaire.

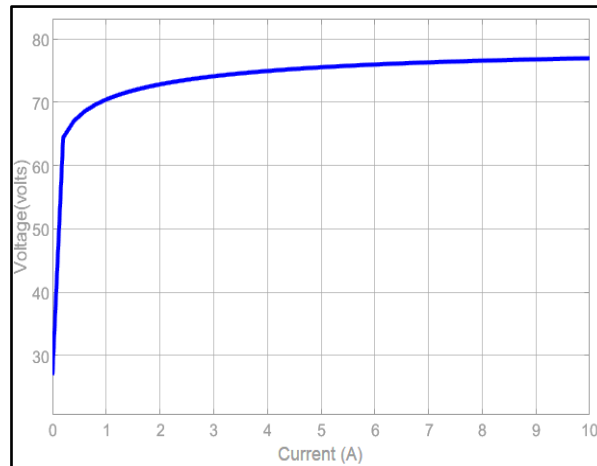


Figure II.12 : Caractéristique V-I d'électrolyseur

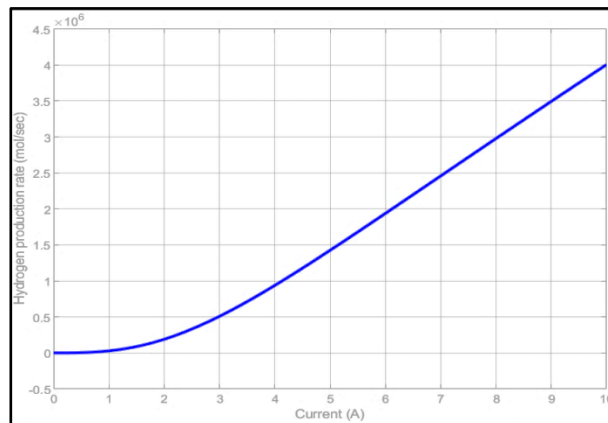


Figure II.13: caractéristique variation du débit d'hydrogen avec le courant entrant I-nH2pro par l'électrolyseur

II.3.3.2. Influence de la Température :

L'électrolyseur est sensible à la température. Pour voir l'influence de cette dernière, nous avons tracé les caractéristiques I_{pv}-V_{pv} comme la figure (II.14). Pour des différentes températures.

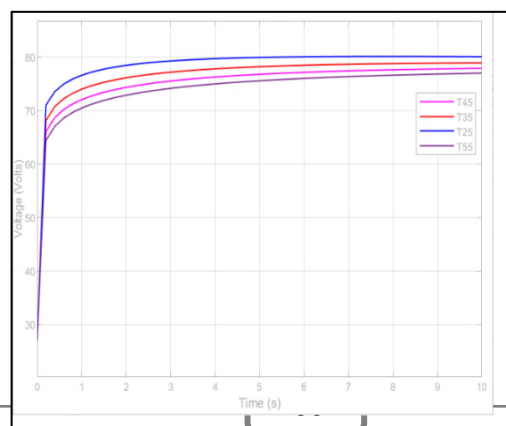


Figure II.14: influence de la température sur la caractéristique I-V de l'électrolyseur

II.4 Modélisation de réservoir d'hydrogène :

L'hydrogène que produit l'électrolyseur est stocké dans un réservoir, dit réservoir d'hydrogène. Ce dernier fournit de l'hydrogène à la pile à combustible en l'absence de production d'énergie photovoltaïque afin de répondre à la demande de charge du consommateur. Le nombre de moles stockées dans le réservoir, est exprimé comme suit [26].

$$n_{H_2} = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} (n_{H_2 \text{ pro}} - n_{H_2 \text{ req}}) dt + n(t_0) \tag{II.23}$$

Le stockage sous forme gazeuse est la méthode de stockage la mieux adaptée et la moins complexe pour notre système. Cette méthode est décrite et modéliser dans ce qui suit [48]



Figure II.15 : Bouteille de stockage H2.

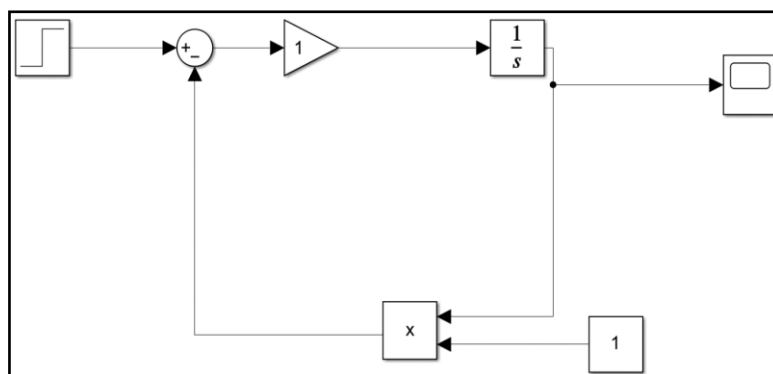


Figure.II.16 : Modélisation de réservoir d'hydrogène sous Matlab/Simulink

II.4.1. Caractéristiques de réservoir d'hydrogène:

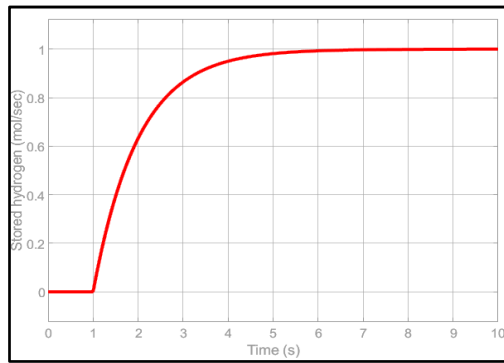


Figure.II.17 : L'hydrogène Stockée

Modélisation du réservoir pressurisé :

L'hydrogène gazeux comprimé ou l'hydrogène liquide peuvent être stockés dans des réservoirs en utilisant différentes techniques comme le stockage physique de l'hydrogène. Cette technique de stockage est utilisée pour calculer la pression de stockage d'hydrogène, couplée au débit, comme dicté par l'équation suivante [27][28].

$$P_b - P_{bi} = z \times \frac{q_{H_2} R_b}{M_{H_2} V_b} \tag{II.24}$$

Où est la pression du réservoir qui est mesurée en (Pascal), est la pression initiale du réservoir de stockage en (Pascal), R est la constante de gaz universelle (J/mol.K), est la température de fonctionnement (K), est le volume du réservoir (m³) et z est le facteur de compressibilité en fonction de la pression, comme indiqué dans l'équation suivante.

$$z = \frac{PV_m}{RT} \tag{II.25}$$

Où P et sont respectivement la pression et le volume molaire.

II.5 Modélisation des éléments de stockage d'énergie :

Pour la modélisation on représente une batterie par le circuit électrique suivant :

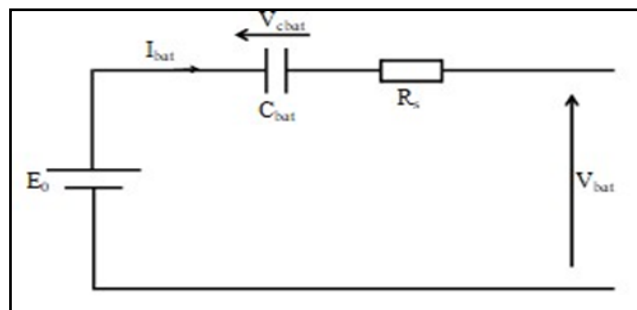


Figure.II.18 : Modèle R-C de la batterie

Ce modèle comprend une E0 modélisant la tension a vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie (Cbat) et une résistance interne (Rs).

La tension aux bornes de la batterie donnée par [29] :

$$V_{\text{bat}} = E_0 - R_s \cdot I_{\text{bat}} - V_{\text{cbat}} \quad (II.26)$$

On définit également l'état de charge (EDC) de la batterie par :

$$\text{EDC} = 1 - \frac{Q_d}{C_{\text{bat}}} \quad (II.27)$$

Q_d : la quantité de charge manquante par rapport à C_{bat} ;

C_{bat} : la capacité (Ah) nominale de la batterie ;

II.6 Modélisation de le hacheur boost (élevateur) :

La tension de sortie du module photovoltaïque et de la pile à combustible sont élevées e Utilisant Le convertisseur Boost, la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée. La figure (II.6) représente la structure d'un hacheur de type Boost utilisé lorsqu' on désire augmenter la tension disponible d'une source continue [30] :

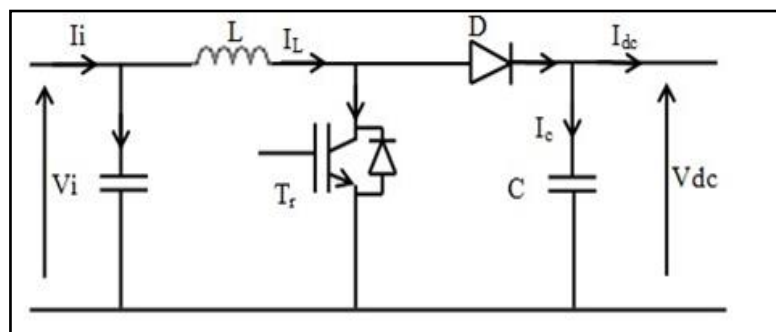


Figure II.19 : schéma d'hacheur type boost [30]

En mode de conduction continue le fonctionnement de ce convertisseur peut être divisé en deux phases selon l'état du transistor T_r .

Dans la première phase T_r est passant, la tension aux bornes de l'inductance vaut

$$V_L = V_i \quad \#(II.28)$$

Le courant traversant l'inductance augmente linéairement ; dans la deuxième phase le transistor est bloqué, la diode devient passante. La tension aux bornes de inductance vaut

$$V_i = V_L + V_{dc} \quad \#(II.29)$$

Dans cette phase le condensateur C se charge en même temps par le courant stocké dans l'inductance et par le générateur. Les équations électriques de le hacheur boost sont [52]

$$V_i = L \cdot \frac{dI_L}{dt} + (1 - a) \cdot V_{dc} \quad (II.30)$$

a : le rapport cyclique;

II.7 Modélisation de la pile PEMFC:

Pour les piles à combustible avec un électrolyte conducteur de protons (PEMFC), l'hydrogène est oxydé à l'anode et les protons sont transportés à travers la membrane vers la cathode selon la réaction :



Et à la cathode, l'oxygène est réduit selon la réaction :



Les électrons circulent par le circuit externe durant ces réactions. Une fois arrivés à la cathode, les protons se recombinent avec les ions oxygène pour former de l'eau selon la réaction :

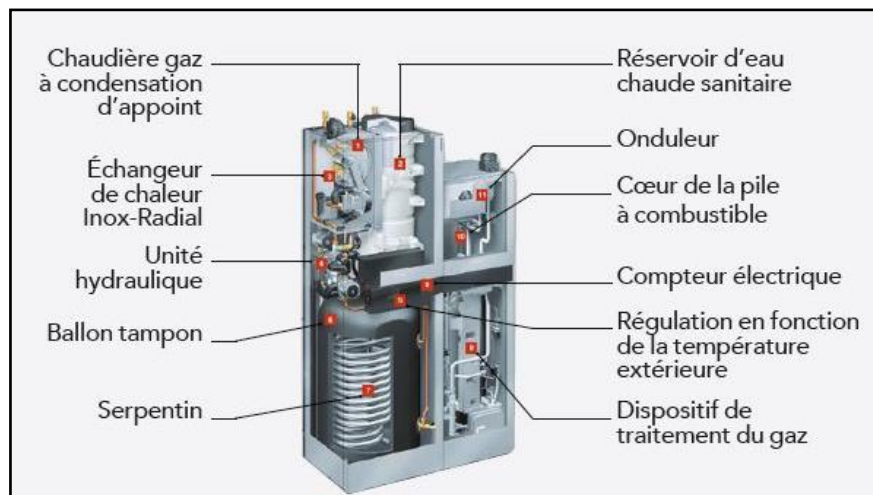
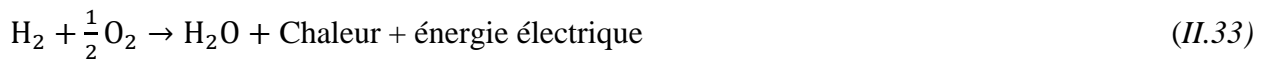


Figure II.20 : Pile à combustible.

II.7.1 Modèle de tension :

Dans le cadre de l'étude sur les modèles quasi statiques pour décrire la réaction chimique dans une cellule de pile à combustible, le modèle d'évolution de la tension proposé par Amphlett combine des lois élémentaires et des modèles empiriques. Les transports de matière sont pris en compte via les équations de Maxwell, les potentiels d'équilibre thermodynamique sont définis par l'équation de Nernst, les surtensions d'activation sont calculées à l'aide des équations de Tafel, et la résistance interne est déterminée par les équations de Nernst-Planck. En fin de compte, la tension de la cellule peut être exprimée en utilisant la loi d'Ohm [31].

Nous pouvons exprimer la tension de cellule par :

$$V_{\text{cell}} = E_{\text{nerst}} - V_{\text{act}} - V_{\text{ohm}} - V_{\text{conc}} \quad (II.34)$$

Les pertes, souvent appelées polarisation, dans une cellule de pile à combustible proviennent principalement de trois sources : la polarisation d'activation (V_{act}), la polarisation ohmique (V_{ohm}) et la polarisation de concentration (V_{conc}). Ces pertes entraînent une chute de tension dans la pile, même si elle est considérée comme ayant un potentiel idéal E_{nerst} .

$$V_{\text{cell}} = E_{\text{nerst}} - \text{pertes} \quad (II.35)$$

E_{nerst} Dite tension réversible : est le potentiel d'équilibre thermodynamique défini en Utilisant l'équation de Nernst.

Avec :

$$E_{\text{nerst}} = \frac{\Delta G}{2F} - \frac{\Delta S}{2F} (T - T_{\text{ref}}) + \frac{RT}{2F} \left[\ln(P_{\text{H}_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{\text{O}_2}) \right] \quad (II.36)$$

$P_{\text{H}_2}, P_{\text{O}_2}$ Sont respectivement les pressions partielles d'hydrogène et l'oxygène (atm).

ΔG : Le changement d'énergie libre (J/K.mol) .

ΔS : Le changement d'entropie (J/K.mol).

F : La constante de Faraday (96.487 C/K.mol).

T : La température absolue opérationnelle.

T_{ref} : La température de référence (K).

R : La constante universelle des gaz parfaits (8.314 J/K.mol).

L'expression de l'équation de Nernst arrangé avec un calcul numérique se présente comme suit:

$$E_{\text{nerst}} = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3} (T - 298.15) + 4.31 \cdot 10^{-5} \cdot T \left[\ln(P_{\text{H}_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{\text{O}_2}) \right]$$

(II.37)

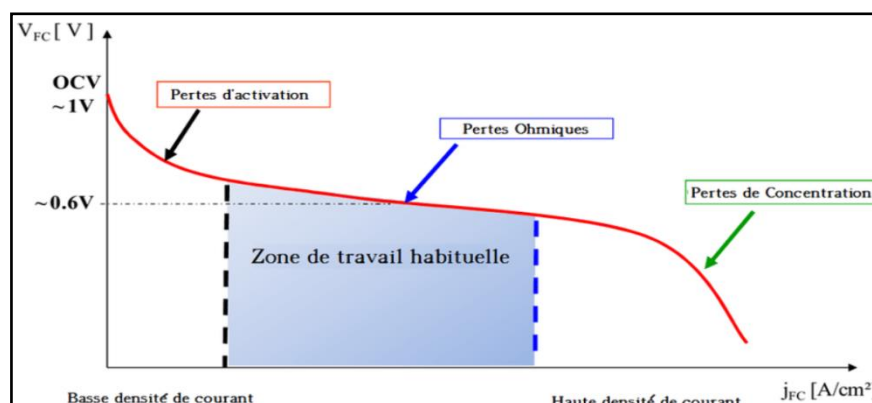


Figure II .21 : Caractéristique de polarisation théorique du PAC.[31]

La température de la membrane et les pressions partielles du gaz varient en fonction du courant. Une augmentation du courant entraîne une diminution des pressions d'hydrogène et d'oxygène, mais une augmentation de la température.

☒ Polarisation d'activation (Charge transfert kinetics)

La polarisation d'activation est donnée par la relation de Tafel: [31]

$$V_{act} = -[\xi_1 + \xi_2 \cdot T + \xi_3 \cdot T \cdot \ln([C_{O_2}]) + \xi_4 \ln(I_{stack})] \quad (II.38)$$

Avec :

I_{stack} : Le courant de fonction de la pile $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$: Représentent les coefficients paramétriques pour chaque modèle de pile. [31]

Est C_{O_2} la concentration de l'oxygène dans l'interface du catalyseur de la cathode donnée par la relation :

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{-498}{T}\right)} \quad (II.39)$$

Polarisation ohmique :

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance rencontrée par le flux d'ions en traversant la membrane et par la résistance des électrons dans les électrodes et le circuit électrique. La membrane et les électrodes obéissent à la loi d'Ohm, et les pertes ohmiques peuvent être exprimées par l'équation suivante :

$$V_{ohm} = I_{stack} \cdot (R_m + R_c) \quad (II.40)$$

R_c : est la résistance protonique de la membran

R_m : La résistance équivalente de la membrane pour le flux d'ions, elle est calculée Par

Relation:

$$R_m = \frac{\rho_M l}{A} \quad (II.41)$$

Où :

ρ_M : La résistivité spécifique de la membrane pour le flux d'électron.

A : La surface active de la pile en (cm²).

l: La largeur de la membrane en (cm).

I_{stack} : Le courant de fonction de la pile.

Dans ce travail on a considéré que la membrane est en Nafion. [32],[31]

$$\rho = \frac{181,6 \cdot \left[1 + 0,03 \left(\frac{I_{stack}}{A} \right) + 0,062 \left(\frac{T}{303} \right)^2 \cdot \left(\frac{I_{stack}}{A} \right) \cdot \left(\frac{I_{stack}}{A} \right)^{2,5} \right]}{\left[\Psi - 0,643 - 3 \left(\frac{I_{stack}}{A} \right) \right] \exp \left[4,18 \frac{T-303}{T} \right]} \quad (II.42)$$

Avec :

Ψ : Fraction de l'aire ouverte d'une plaque perforée.

☒ Polarisation de concentration (Mass Transport) :

La polarisation de concentration est donnée par la relation suivante :

$$V_{conc} = -B \cdot \ln \left(1 - \frac{J}{J_{max}} \right)$$

(II.43)

Avec :

J : La densité de courant (A/cm^2)

J_{max} : La densité de courant maximale (A/cm^2) :

B : Désigne la constante électrochimie (V) et donné par la relation suivante.[31]

$$B = \frac{RT}{nF} \quad (II.45)$$

Avec :

R : La constante universelle des gaz ($8.314J/K. mol$)

T : La température (K)

n : Nombre des cellules élémentaires de la pile

F : Le constant de Faraday ($96.487C/K.mol$)

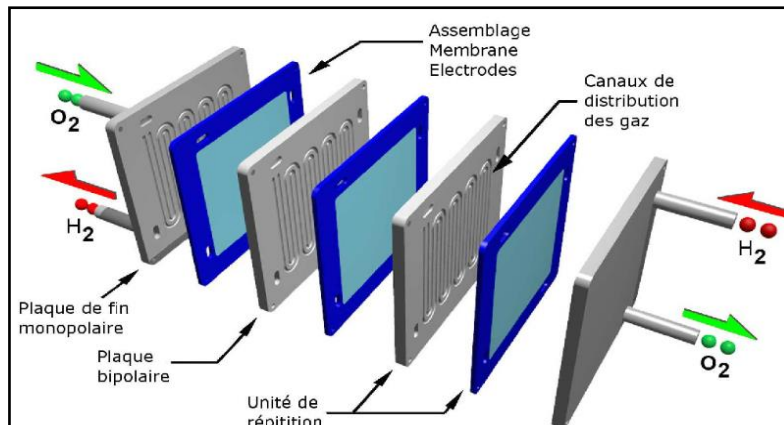


Figure II.22 : Modèle statique simplifié de la pile à combustible (PEMFC) [34]

III.7.2. Calcul des pressions partielles :

II.7.2.1. Les hypothèses du modèle de calcul des pressions partielles :

- Les réactions chimiques à l'intérieur de la pile à combustible sont idéales et se déroulent de manière efficace ;
- Les matériaux utilisés pour les électrodes et les membranes sont parfaitement compatibles et ne subissent pas de dégradation ;
- Les pertes de chaleur sont négligeables et n'affectent pas les performances du système ;
- Le fonctionnement de la pile à combustible est stable et ne nécessite pas de régulation constante. ;
- La température est stable tout le temps.

II.7.2.2. Calcul de la pression partielle d'hydrogène :

Pour calculer les pressions partielles, chaque gaz individuel a été considéré séparément et l'équation des gaz idéaux a été appliquée pour chacun. On donne ici l'exemple d'hydrogène [35].

$$P_{H_2} \cdot V_{an} = n_{H_2} \cdot RT \tag{II.46}$$

Avec :

V_{an} .est le volume de l'anode :

n_{H_2} .est le nombre d'atome d'hydrogène dans le canal de l'anode :

R : est la constante universelle des gaz [l.atm/Kmol.K].

T : est la température absolue (K).

En isolant la pression et en appliquant le dérivé à l'expression précédente on obtient :

$$\frac{d}{dt} P_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} q_{H_2} \tag{II.47}$$

Avec:

P_{H_2} .est la dérivé de n_{H_2} et représente le débit molaire de l'hydrogène [Kmol/s] :

Il y a trois contributions pertinentes au débit molaire de l'hydrogène :

-Le débit injecté à l'entrée de la pile $q_{H_2}^{in}$

-Le débit de combustible qui participe à la réaction chimique

-Le débit du combustible qui sort de la pile $q_{H_2}^{out}$

$$q_{H_2} = q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r \quad (II.48)$$

Ainsi :

$$\frac{d}{dt} P_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r) \quad (II.49)$$

Selon les relations de l'électrochimie, le débit de l'hydrogène qui participe à la réaction peut être calculé en fonction du courant traversant le 'stack: I_{stack} '

$$\frac{d}{dt} P_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r) \quad (II.50)$$

Avec :

Kr est une constante définie afin de simplifier le modèle [Kmol/s.A]

En revenant au calcul de la pression partielle d'hydrogène, il est possible d'écrire [36]

$$\frac{d}{dt} P_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - 2 K_r \cdot I_{stack}) \quad (II.51)$$

On doit exprimer le débit molaire d'hydrogène qui sort de l'anode out en fonction de sa pression à l'intérieur de l'électrode P_{H_2}

Pour cela, on prend le cas général d'un orifice, considéré étouffé, alimenté avec une mixture de gaz ayant la masse molaire moyenne M [Kg/Kmol].

Cet orifice (valve) présente la caractéristique suivante pour une certaine valeur de température.

Avec :

W : est le débit de masse [Kg/s].

K : la constante de la valve qui dépend principalement de la surface -d' orifice

La pression à l'intérieur du canal [atm]

M : La masse molaire moyenne [Kg/Kmol].

On peut donc, exprimer le débit molaire d'hydrogène qui sort de l'anod $q_{H_2}^{out}$ en fonction de la pression à l'intérieur d'électrode en fonction de la P_{H_2} Par la relation :

$$q_{H_2}^{out} = K_{H_2} \cdot P_{H_2} \quad (II.52)$$

La relation (II.) devient :

$$\frac{d}{dt}(P_{H_2}) = \frac{RT}{V_{an}} (q_{H_2}^{in} - K_{H_2} \cdot P_{H_2} - 2 K_r \cdot I_{stack}) \quad (II.53)$$

Ce qui donne :

$$\frac{d}{dt}(P_{H_2}) + \frac{RT \cdot K_{H_2}}{V_{an}} P_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} (q_{H_2}^{in} - 2 K_r \cdot I_{stack}) \quad (II.54)$$

En appliquant la transformée de la place à l'équation (II.) on obtient:

$$P_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{1 + (V_{an}/RT \cdot K_{H_2})s} P_{H_2} = (q_{H_2}^{in} - 2 K_r \cdot I_{stack}) \quad (II.55)$$

En posant :

$$\tau_{H_2} = \frac{V_{an}}{RT \cdot K_{H_2}} \quad (II.56)$$

$$\text{Il veint : } P_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{1 + \tau_{H_2} s} (q_{H_2}^{in} - 2 K_r \cdot I_{stack}) \quad (II.57)$$

Une opération similaire est faite pour l'oxygène, on a obtient :

$$\tau_{O_2} = \frac{V_{an}}{RT \cdot K_{O_2}} \quad (II.58)$$

$$P_{O_2} = \frac{1/K_{O_2}}{1 + \tau_{O_2} s} (q_{O_2}^{in} - 2 K_r \cdot I_{stack})$$

I.8 Résultats de la simulation du PEMFC

Les résultats de la simulation obtenue sont réalisés sous l'environnement du logiciel Matlab/Simulink avec les paramètres physiques donnés dans le Tableau II.3

Tableau II.3 : Paramètres du modèle [37], [38], [39]

Paramètres	Valeurs	Paramètres	Valeurs
F	9684600 C/Kmol	K_{H_2O}	$1/7.716 * 10^{-6} \text{C/Kmol}$
R	8314.47 J/Kmol.K	T	343

K_{H_2}	$4.22 * 10^{-5} \text{ kmol}/(\text{s.atm})$	$\xi 1$	0.948
τ_{H_2}	3.37 (s)	$\xi 2$	$0.00286 + 0.0002. \ln A$ $+ (4.3.105) \ln CH_2$
K_{O_2}	$2.11 * 10^{-5} \text{ kmol}/(\text{s.atm})$	$\xi 3$	$7.6 * 10^{-5}$
τ_{O_2}	6.74 (s)	$\xi 4$	$-1.93 * 10^{-4}$
τ_{H_2}	18.418 (s)	ψ	23
A	333 cm^2	U	448 V
P	4KW	I	8.92 A
	$1500 \text{ mA}/\text{cm}^2$	J	1.2 mA}/\text{cm}^2
N	582		

II.8.1. Caractéristique Tension/ Courant et Puissance :

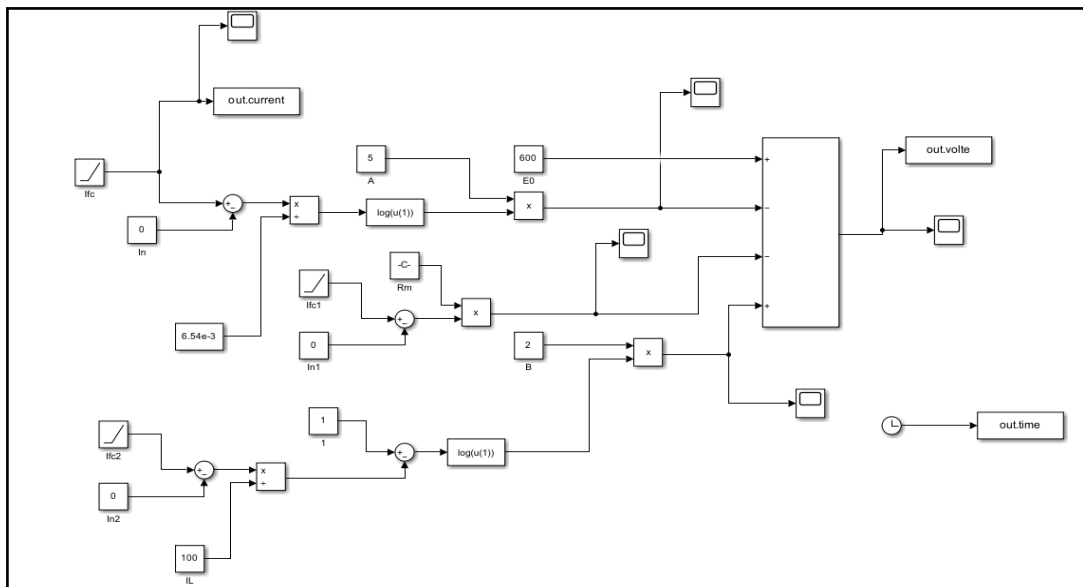


Figure.II.23: simulation d'une pile à combustible PEMFC

Cette simulation représenté BLOC SIMULATION DE pile à combustible PEMFC Les entree Istack et débit de hydrogène et oxygène et température et nombre de cellule et le sortie tension de pile , et Istack reliée entre la charge et le débit de deux par un retour discrète.

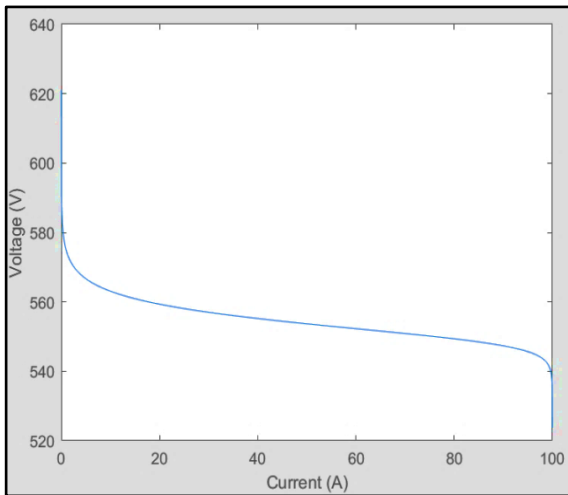


Figure.24 :la caractéristique V(I)

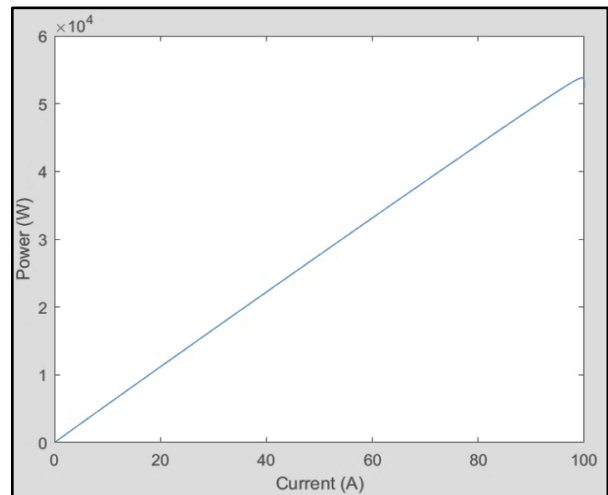


Figure.II.25 : la caractéristique P(I)

II.9 Conclusion :

Dans ce contexte, la modélisation mathématique permet de décrire de manière quantitative le comportement de chaque élément du système, ainsi que les interactions entre ces éléments. Par exemple, le modèle du panneau photovoltaïque peut prendre en compte des paramètres tels que l'irradiance solaire, la température, l'efficacité de conversion, etc. Le modèle de l'électrolyseur peut inclure des paramètres liés à la tension appliquée, la surface des électrodes, la concentration de l'électrolyte, etc. Le modèle du réservoir de stockage peut considérer des paramètres comme la pression, la capacité de stockage, les pertes thermiques, et Le modèle de la pile combustible (fuel cell) Peut considérer à produire de carburant Hydrogène nH₂ à une pression PH₂ En intégrant ces différents modèles mathématiques, il est possible d'évaluer les performances globales du système hybride, de prédire la production d'hydrogène en fonction des conditions environnementales et opérationnelles, d'optimiser la conception du système pour maximiser l'efficacité énergétique et la fiabilité, et de simuler différents scénarios pour prendre des décisions éclairées.

Chapitre III

Contrôleurs classiques Et intelligents

III.1 Introduction :

Les contrôleurs classiques et intelligents sont deux approches différentes pour la conception de systèmes de contrôle. Les contrôleurs classiques, également connus sous le nom de contrôleurs traditionnels, reposent sur des méthodes mathématiques et des modèles simplifiés pour concevoir des systèmes de contrôle. Ces méthodes incluent des techniques telles que le contrôle PID (proportionnel, intégral, dérivé) et d'autres méthodes de contrôle linéaire. D'autre part, les contrôleurs intelligents font référence à des systèmes de contrôle qui utilisent des techniques d'intelligence artificielle, en particulier les réseaux de neurones, les algorithmes génétiques, les systèmes flous, et d'autres méthodes d'apprentissage automatique pour concevoir des systèmes de contrôle adaptatifs et auto-apprenants.

III.2 Les contrôleurs classiques :

Dans l'étude des systèmes asservis, la fonction mathématique du régulateur est essentielle, car elle représente sa fonction de transfert. Un régulateur se compose d'un élément, le comparateur ou soustracteur, qui calcule la différence entre la mesure et la consigne, ainsi que d'un correcteur. Ce correcteur génère une valeur de sortie en fonction de l'écart observé par le comparateur afin de corriger l'évolution de la grandeur contrôlée dans le processus. La fonction de transfert du correcteur est notée $C(p)$ [40].

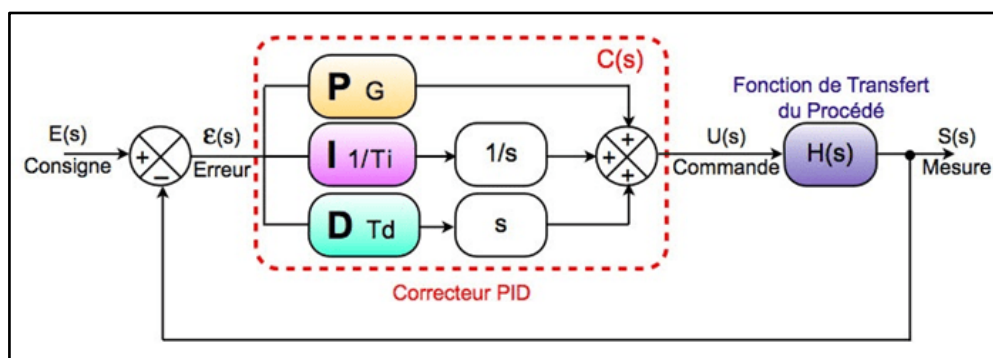


Figure.III.1 : Composition de la fonction du régulateur [40].

III.3 L'objectif global de la régulation :

L'objectif global de la régulation peut être résumé en trois mots clés : mesurer, comparer, corriger. Cependant, chaque processus a ses propres exigences et chaque appareil ses conditions spécifiques de fonctionnement. Il est donc essentiel que la régulation soit conçue pour répondre aux besoins particuliers liés à la sécurité, aux impératifs de production et aux équipements. La régulation consiste à ajuster automatiquement une variable de manière à ce qu'elle maintienne constamment sa valeur ou reste proche de la valeur souhaitée, malgré les perturbations qui peuvent survenir [41].

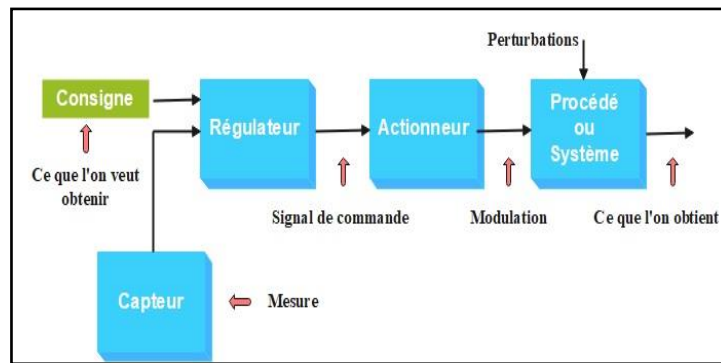


Figure.III.2 : Schéma de principe d'une boucle de régulation.

III.4 Éléments constitutifs d'une boucle de régulation :

III.4.1 Une boucle de régulation :

La régulation doit inclure au minimum les composants suivants :

- Un capteur de mesure;
- Un transmetteur, souvent intégré au capteur ;
- Un régulateur;
- Un actionneur.

Elle est souvent complétée par d'autres éléments tels qu'un enregistreur, des convertisseurs et des dispositifs de sécurité.

III.4.2 Le régulateur reçoit deux informations :

La régulation implique généralement les éléments suivants :

1. Le signal de mesure provenant du capteur.
2. La consigne, qui peut être générée localement ou provenir d'une source externe.

En fonction de l'écart entre ces deux valeurs et de l'algorithme de calcul pour lequel il a été configuré, le régulateur délivre un signal de sortie dirigé vers l'actionneur afin d'annuler cet écart et de ramener la mesure vers la valeur de consigne [42].

III.5 Les types de boucles :

- **Boucle ouverte :**

La figure (III.3) présente une boucle ouverte. La grandeur de la correction est indépendante de la grandeur de la mesure. Le régulateur est en mode manuel consiste à laisser à l'utilisateur le choix de la valeur du signal de commande appliquée à l'actionneur.

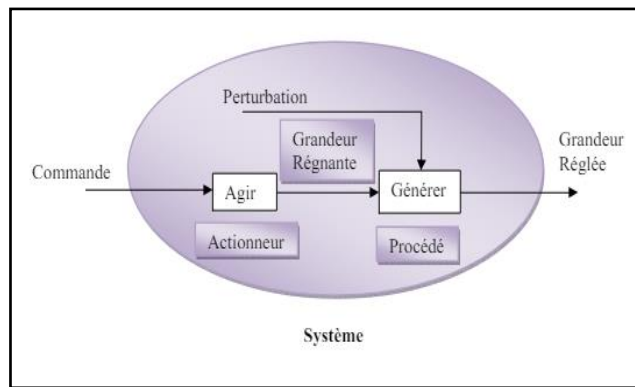


Figure.III.3 : Boucle ouverte

• **Boucle fermée :**

Une boucle est considérée comme fermée (voir Figure III.4) lorsque la grandeur mesurée influence la correction apportée (la grandeur manipulée).

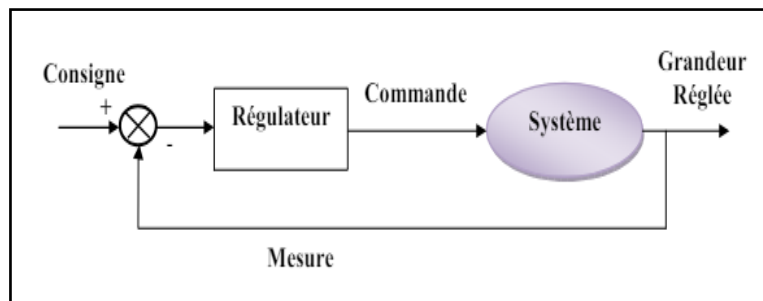


Figure III.4 : Boucle fermé

III.6 Régulateur PI :

Régulateur PID (Proportionnel, Intégral) C'est un système d'auto régulation (boucle fermée), qui cherche à réduire l'erreur entre la consigne et la mesure [42].

$$e = \text{consigne} - \text{mesure} \quad (III.1)$$

Le but de la régulation est de maintenir une grandeur physique (la GRANDEUR REGLEE), telle que la température, l'humidité relative ou la pression, à une valeur désirée (la GRANDEUR DE REFERENCE), malgré les perturbations, en mesurant sa valeur. Après comparaison entre la grandeur réglée et la grandeur de référence, un écart de réglage se produit. En fonction de cet écart, le régulateur génère un signal de commande qui ajuste la puissance de réglage via un actionneur (l'ORGANE DE REGLAGE).

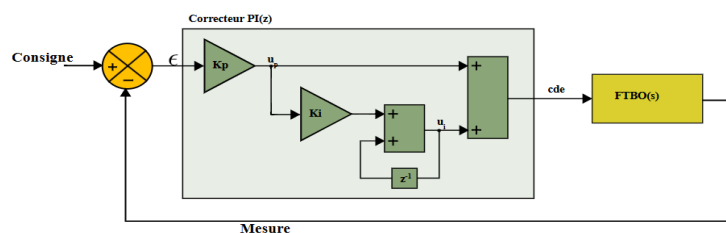


Figure III.5 : Régulateur PI

Le rôle du régulateur en matière d'assurance de biens (PI) est de superviser l'industrie de l'assurance pour garantir que les compagnies d'assurance respectent les lois, les réglementations et les normes en vigueur. Le régulateur veille à ce que les compagnies d'assurance offrent des produits et des services conformes aux exigences, protégeant ainsi les intérêts des assurés. Le régulateur peut mettre en place des mesures de surveillance, d'inspection et de contrôle pour assurer la transparence, la solvabilité et l'intégrité du marché de l'assurance de biens.

III.6.1 Correcteur à Action Proportionnelle (P) :

- **Principe** : Le correcteur à action proportionnelle, est le correcteur le plus simple, puisque défini par un simple gain K étude et Modélisation d'un Système Hybride Photovoltaïque Pile à combustible pour une fonction de Cogénération Energie Électrique-hydrogène

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 :

$$u(t) = k_p \cdot \varepsilon(t) \quad (III.2)$$

La fonction de transfert est :

$$C(p) = \frac{u(p)}{\varepsilon(p)} = k_p \quad (III.3)$$

Où k_p gain proportionnel

- ♣ Il possède un seul paramètre de régulation K
- ♣ Augment K engendre une constante de temps plus petite ce qu'implique que le system devient rapide mais augmente de manier excessive peut provoquer l'instabilité de système
- ♣ 'écart entre l'antre (consigne) et la sorte est diminué ce qui augmente la précession de système [42].

III.6.2 Correcteur à Action Intégrale (I) :

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

$$\frac{du(t)}{dt} = k_i \cdot \varepsilon(t) \quad (III.4)$$

$$u(t) = k_i \int_0^T \varepsilon(t) dt \quad (III.5)$$

La fonction de transfert est :

$$C(p) = \frac{u(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{k_i}{p} = \frac{1}{t_{ip}} \quad (III.6)$$

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

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.

III.7 Correcteur proportionnel intégral PI :

- En hautes fréquence il se comporte comme régulateur proportionnel
- Son rôle est assimilé à un filtre passe bas
- Amélioration de la précision statique contrairement la précision dynamique
- La réponse peut devenir plus rapide augmentant le gain mais risque d'être oscillatoire [42].

III.8 Les Avantages et Inconvénients [44] :

- **Avantage :**
 - Cette méthode est facile à mettre en œuvre sur le plan physique et en termes de calcul.
 - Elle peut être appliquée à un système déjà en production et permet une adaptation automatique du régulateur pour s'ajuster aux changements des paramètres internes (usure) et externes (environnement) du système.
- **Inconvénient :**
 - Le système peut devenir instable ou passer à des états dangereux, notamment dans le cas des systèmes chimiques.
 - Cette méthode peut nécessiter beaucoup de temps si le système réagit très lentement, par exemple, des jours ou des semaines dans le cas de certaines réactions chimiques. Heureusement, de nombreux systèmes ont des temps de réponse courts, tels que les systèmes électroniques ou mécaniques.

III.9 L'intelligence artificielle :

Est une branche de l'informatique qui vise à créer des systèmes capables d'imiter les fonctions cognitives humaines. Les chercheurs ont d'abord tenté de concevoir des machines

intelligentes avant de se tourner vers de nouvelles techniques informatiques. L'IA consiste à étudier les techniques permettant de résoudre des problèmes complexes en exploitant la connaissance du domaine concerné. Elle vise à créer des machines qui semblent agir de manière autonome ou en collaboration avec les humains. Les différentes définitions de l'IA s'accordent sur le fait qu'elle implique l'automatisation d'activités associées à la pensée humaine, telles que la prise de décision, la résolution de problèmes et l'apprentissage.

III.10 Les techniques de l'AI :

L'intelligence artificielle suscite un débat scientifique et philosophique sur la capacité des machines à imiter l'intelligence humaine. Les questions portent sur le fonctionnement du cerveau humain, la possibilité d'extraire l'intelligence humaine vers des machines et la véritable nature de l'intelligence des machines. Les techniques de l'IA visent à élargir le champ d'action des machines en leur permettant de voir, d'entendre, de raisonner, de parler et d'agir, afin de reproduire des caractéristiques associées à l'intelligence humaine. Ces techniques comprennent les systèmes experts, la logique floue, les algorithmes génétiques, les réseaux de neurones, entre autres. En général, l'IA vise à étudier les processus de la pensée humaine et à les représenter par le biais de machines telles que les ordinateurs et les robots. Ces différentes techniques visent à imiter le raisonnement humain et ont en commun la capacité d'aider à la prise de décision [63].

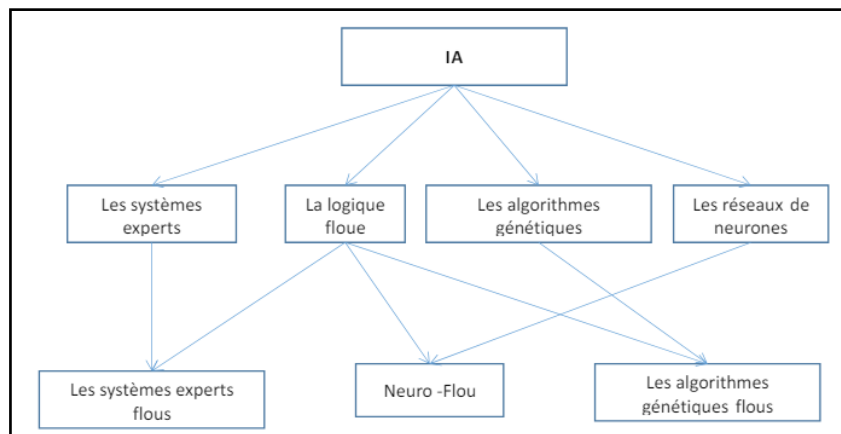


Figure III.6 : Les différentes techniques de l'IA

III.10.1 Réseaux neurone :

Le cerveau humain est considéré comme le siège de l'intelligence, de la créativité, de l'émotivité, de la conscience et de la mémoire. Très tôt l'homme s'est intéressé à cet objet complexe. Depuis, de nombreux chercheurs ont essayé de percer le secret de son mode de fonctionnement. Le connexionnisme est la version technologique de cette recherche. Cette première partie présente un rapide aperçu de ces techniques connexionnistes. Le cerveau humain possède deux hémisphères latérales reliées par le corps calleux et d'autres ponts axonaux, il pèse

moins de deux kilogrammes et contient mille milliards de cellules, dont 100 milliards sont des neurones constitués en réseaux.

Les neurones sont des cellules nerveuses décomposables en 4 parties principales

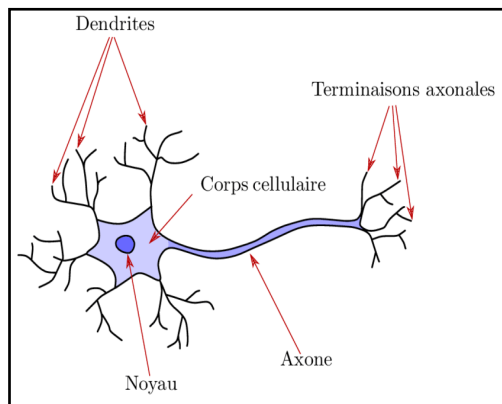


Figure III.7 : Schéma d'un neurone biologique

On peut le décomposer en trois régions principales :

- **Le corps cellulaire :** Contient le noyau du neurone et effectue les transformations biochimiques nécessaires à la synthèse des enzymes vitales. De forme sphérique ou pyramidale, il abrite également d'autres molécules essentielles à la survie cellulaire, avec une taille de quelques microns de diamètre.
- **Les dendrites :** Sont des extensions tubulaires fines qui se ramifient autour du neurone, formant une structure arborescente. Elles captent les signaux entrants vers le neurone et mesurent quelques dizaines de microns de longueur.
- **L'axone :** Quant à l'axone, c'est par celui-ci que les signaux quittent le neurone. Contrairement aux dendrites qui s'étendent autour du corps cellulaire, l'axone est plus long et se ramifie à son extrémité où il se connecte aux dendrites d'autres neurones. Sa taille peut varier de quelques millimètres à plusieurs mètres. L'axone est une fibre nerveuse chargée de transmettre les signaux sortants du neurone.
- **Synapse :** Une synapse est la jonction entre deux neurones, souvent entre l'axone d'un neurone et une dendrite d'un autre (mais il existe également des synapses axo-axonales, par exemple). Les synapses jouent un rôle crucial dans la communication entre les cellules nerveuses, étant séparées par un espace nommé fente synaptique.

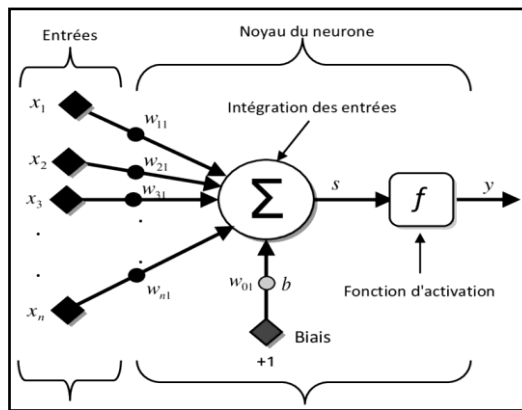


Figure III.8 : Structure d'un neurone artificiel

III.10.2 Neurone formel :

Un neurone est une fonction algébrique non linéaire et bornée, dont la valeur dépend de paramètres appelés les poids et des biais. Les variables de cette fonction sont Habituellement appelées "entrées" du neurone, et la valeur de la fonction est appelée "sortie". Un neurone est donc, un opérateur mathématique, dont on peut calculer la valeur numérique par quelques lignes de programme informatique.

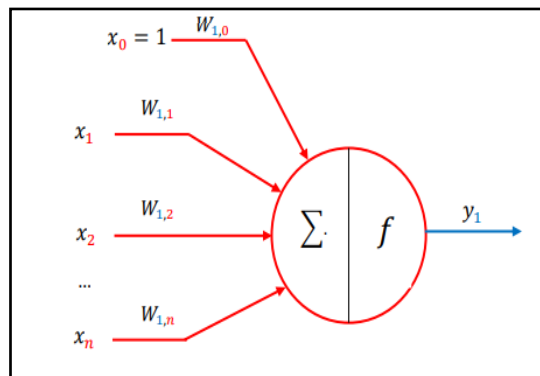


Figure III.9 : Structure d'un neurone formel

$$y_1 = f(x_1 W_{1,1} + x_2 W_{1,2} + \dots + x_n W_{1,n}) = f\left(\sum_{i=1}^n w_i, x_i\right)$$

$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$: Vecteur d'entrée

$W_{1,1}, W_{1,2}, \dots, W_{1,n}$: Poids.

f : la fonction d'activation.

y_1 : la sortie de neurone.

Les entrées du neurone avec les leurs poids correspondants modélisent les connexions neuronales synaptiques dans les réseaux biologiques et agissent de manière à augmenter ou diminuer les signaux d'entrées au neurone. Toutes les entrées sont multipliées par leurs poids correspondants et additionnées pour former l'entrée nette du neurone.

III.11 Fonctionnement d'un réseau de neurones artificiel :

Un réseau neuronal est constitué d'un grand nombre d'unités artificielles, allant de quelques dizaines à plusieurs millions, organisées en couches interconnectées. Les unités d'entrée reçoivent diverses informations externes que le réseau tente de traiter ou de reconnaître. Les unités de sortie indiquent la réaction du réseau aux informations apprises. Entre les unités d'entrée et de sortie se trouvent une ou plusieurs couches d'unités cachées, formant la majeure partie du réseau. La plupart des réseaux neuronaux sont entièrement connectés, ce qui signifie que chaque unité cachée et de sortie est relié à toutes les unités des couches adjacentes. Les connexions entre les unités sont représentées par des poids, positifs ou négatifs, où un poids plus élevé signifie une influence plus forte entre les unités [45].

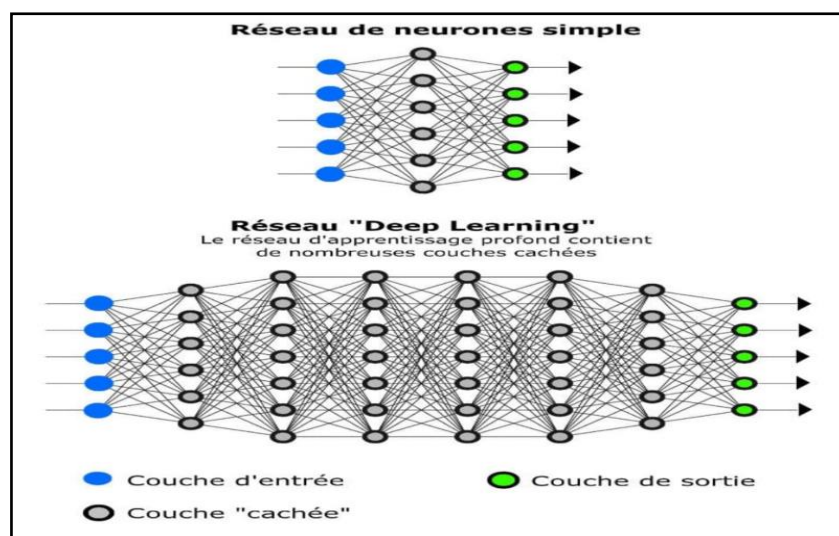


Figure III.10 : Architecture d'un réseau profond à plusieurs couches [45].

III.12 Les différents types de réseaux de neurones artificiels :

Les réseaux de neurones sont classés en différentes catégories en fonction du nombre de couches qui séparent l'entrée des données de la sortie des résultats, du nombre de nœuds cachés dans le modèle, ou du nombre d'entrées et de sorties de chaque nœud. Selon le type de réseau, la propagation des données entre les différentes couches de neurones peut varier. IL existe plusieurs types de réseaux de neurones. [46] :

- **Les réseaux de neurones non bouclés :**

Dans ce type de réseaux, les informations passent directement de l'entrée aux nœuds de traitement puis aux sorties.

- **Les réseaux de neurones bouclés :**

Sont des réseaux de neurones dans lesquels l'information peut se transmettre dans les deux sens, ils incluent des couches profondes aux premières couches. Ils sont plus

proches du mécanisme réel de fonctionnement du système nerveux, qui n'est pas à sens unique [46].

- **Les réseaux de neurones convolutifs (CNN ou ConvNet) :**

Est un algorithme d'apprentissage profond qui peut prendre une image d'entrée, attribuer de l'importance (poids et biais appris) à divers aspects/objets de l'image et être capable de les différencier les uns des autres. Le prétraitement requis dans un ConvNet est beaucoup moins important que pour les autres algorithmes de classification. Lorsque dans les méthodes primitives, les filtres sont conçus à la main, avec une formation suffisante, les ConvNets ont la capacité d'apprendre ces filtres/caractéristiques [47]

III.13 Apprentissage des réseaux de neurones :

Il existe quatre types d'apprentissages principaux :

III.13.1 Apprentissage supervisé (back-propagation) :

Dans le cadre de l'apprentissage supervisé avec la technique de back-propagation, l'algorithme est alimenté avec un ensemble conséquent de données d'entrée et de sortie. Ces données sont généralement préparées en collaboration avec un expert du domaine concerné. L'objectif ultime de cet algorithme est de tirer des enseignements des modèles présents dans ces données, afin de créer un ensemble de règles générales permettant d'associer efficacement les données d'entrée avec leurs classes ou événements correspondants. [45]

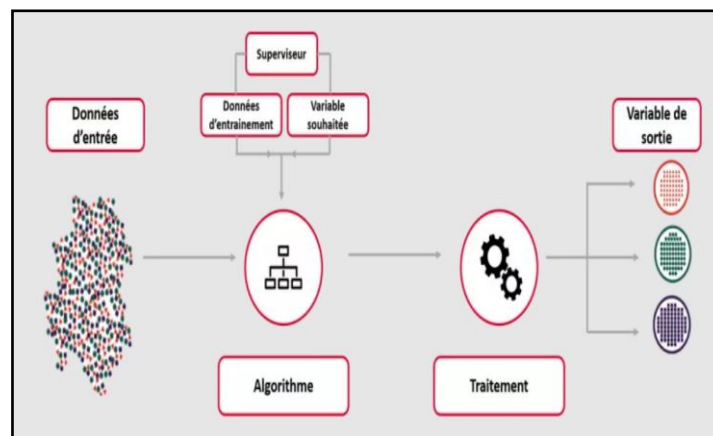


Figure III.11 : Apprentissage supervisé.

III.13.2 Apprentissage non-supervisé :

Dans certaines circonstances, les résultats désirés ne sont pas préalablement connus à partir des données historiques. Dans de telles situations, l'objectif consiste à examiner attentivement les modèles présents dans l'ensemble des données d'entrée afin de les comprendre plus en profondeur. Cela permet d'identifier des similitudes entre les modèles, pouvant être regroupés en

classes ou événements spécifiques. Ces algorithmes sont conçus pour opérer de manière autonome, sans nécessiter d'intervention préalable de la part d'experts. [45]

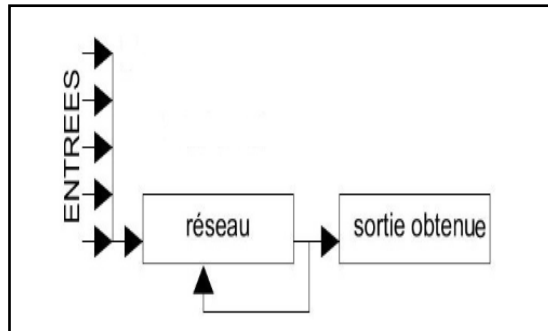


Figure III.12 : Apprentissage non-supervisé [45].

III.13.3 Apprentissage semi-supervisé :

L'apprentissage semi-supervisé représente un type de technique d'apprentissage automatique qui se positionne entre l'apprentissage supervisé et non supervisé. Dans ce contexte, l'ensemble de données est partiellement annoté, ce qui signifie qu'une partie des données est étiquetée et une autre partie ne l'est pas.

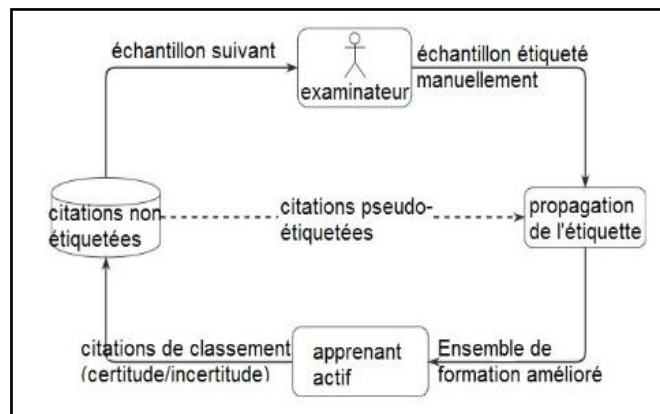


Figure.III.13 : Architecture de l'approche d'apprentissage actif semi-supervisé [63].

III.13.4 Apprentissage par renforcement :

Le réseau de neurones est ajusté de manière à renforcer ses poids pour les résultats positifs et à les diminuer pour les résultats négatifs. Cette méthode lui permet d'apprendre progressivement au fil du temps, suivant un processus similaire à celui par lequel les humains apprennent de leurs erreurs. [5]

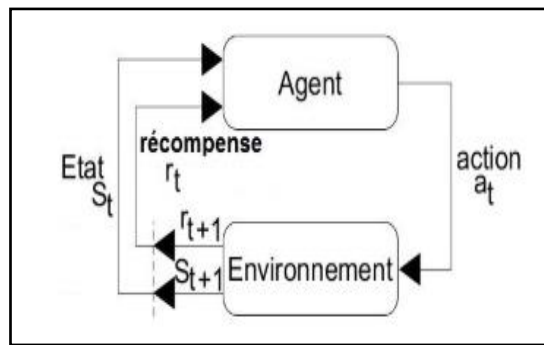


Figure III.14 : Apprentissage par renforcement [63].

III.14 Les avantages et les inconvénients des réseaux de neurone :

- **Les avantages de réseaux de neurones :**

- **Flexibilité :** Les réseaux de neurones artificiels ont la possibilité de généraliser et d'apprendre. Ils acquièrent des connaissances de leur environnement en s'adaptant aux paramètres internes et externes, ils apprennent à partir d'exemples et s'adapte aux situations en fonction de ses conclusions et Il généralise les connaissances pour produire des réponses adéquates à des situations inconnues.

- **Bonne résolution :** Les réseaux de neurones donnent de bons résultats même dans des domaines très complexes ils sont plus performants que les statistiques ou les arbres de décisions.

- **Pertinence des données analysées :** Les réseaux de neurones peuvent travailler sur des données incomplètes ou bruitées. Cette imperfection des données peut être comblée par l'ajout de neurones supplémentaires à la Couche cachée [48].

- **Apprentissage organique :** Les réseaux de neurones peuvent apprendre organiquement. Ils ne sont pas limités uniquement par ce qui a été donné à eux dans un système expert. Les réseaux de neurones peuvent généraliser à partir de leurs entrées, ce qui les rend précieux pour la robotique et les systèmes de reconnaissance de formes et pour l'analyse de données à grande échelle.

- **La tolérance en pannes :** Les réseaux artificiels ont un potentiel élevé de tolérance aux pannes. Le réseau est capable de régénérer un défaut dans l'un de ses composants sans la perte des données stockées, Il utilise des instances et des exemples du passé pour remonter le fonctionnement d'un nœud endommagé ou les autres composants du réseau [49] Les points faibles de réseaux de neurones :

- **Non optimalité de l'architecture :** Il n'existe pas encore de moyens permettant de définir l'architecture optimale du réseau de neurones. Parce que pour définir l'architecture du réseau de neurones, il faut déterminer tout le nombre de couches cachées du réseau et le nombre de neurones pour chacune des couches et tout cela relève de l'intuition de l'opérationnel [49].

L'intervention humaine : Comme c'est le cas du choix de la structure optimale du réseau de neurones, ce système fait souvent appel à l'intuition de l'utilisateur. L'apprentissage est guidé par des paramètres Définis manuellement par l'opérateur. Celui-ci devra par exemple définir à quel moment devra s'arrêter l'apprentissage pour que le réseau conserve ses capacités à généraliser.

- **Codage des entrées :** Toutes les entrées doivent être définies dans un intervalle entre 0 et 1 ce qui engendre des traitements supplémentaires et risque de fausser les résultats.

- **Boîte noire :** Les réseaux de neurones peuvent être assimilés à une boîte noire qui donne une réponse quand on lui fournit des données mais qui ne délivre pas toujours de justification simple à analyser. C'est très difficile d'analyser et comprendre le fonctionnement en face d'un problème donné, et de choisir la structure (type, nombre de nœuds, organisation, co-

▪ **Domaines application:**

Aujourd'hui, les réseaux de neurones ont de nombreuses applications dans des domaines très variés [50] :

- Traitement d'image : compression d'images, reconnaissance de caractères et de signatures, reconnaissance de formes et de motifs, chiffrement, classification, ...
- Traitement du signal : traitement de la parole, identification de sources, filtrage, classification, ...
- Traitement automatique des langues : segmentation en mots, représentation sémantique des mots (plongements lexicaux), étiquetage morpho-syntaxique, traduction automatique, ...
- contrôle : diagnostic de pannes, commande de processus, contrôle qualité, robotique, ...
- Optimisation : allocation de ressources, planification, régulation de trafic, gestion, finance, ...
- Simulation : simulation boîte noire, prévisions météorologiques
- classification d'espèces animales étant donnée une analyse ADN
- Modélisation de l'apprentissage et perfectionnement des méthodes de l'enseignement
- Approximation d'une fonction inconnue ou modélisation d'une fonction connue

Mais complexe à calculer avec précision [50] annexions, etc.) La mieux adaptée au problème.

III.15 Méthodologie pour l'utilisation des réseaux de neurones :

Elle se compose en deux étapes :

1. La première consiste en l'étude du problème que l'on veut résoudre pour valider son adaptabilité à une résolution par les réseaux de neurones et définir les objectifs à atteindre pour pouvoir contrôler la qualité de la solution retenue.

Pour valider l'adaptabilité du problème à une solution par les réseaux de neurones, il faut :

- Que le problème soit identifié et caractérisé, pouvoir disposer d'un nombre important de
 - Données pour assurer à la fois l'apprentissage du réseau et la vérification de ses performances,
 - Étudier la nature des données et évaluer la taille du problème. Les objectifs à définir sont les performances attendues en apprentissage et en utilisation.
2. La seconde est axée sur la technique des réseaux de neurones. Elle englobe le choix du type de réseau et celui de son implantation en fonction des caractéristiques du problème étudié et des objectifs fixés, en se basant sur la nature de l'application, la nature des données et les considérations sur les performances.

III.16 Topologie de réseaux de neurones :

La topologie des réseaux neuronaux désigne la manière dont les neurones sont connectés à travers les différentes couches. En général, on distingue deux grandes catégories de réseaux neuronaux artificiels en fonction de leur topologie : les réseaux à couches, où l'information se propage couche par couche sans retour en arrière possible, et les réseaux récurrents, qui comportent des connexions en boucle permettant un retour en arrière. Ainsi, la fonction d'activation peut circuler le long de ces boucles, influençant le réseau pendant une période indéterminée. C'est pourquoi les comportements des réseaux récurrents peuvent être potentiellement plus complexes que ceux des réseaux à couches [51].

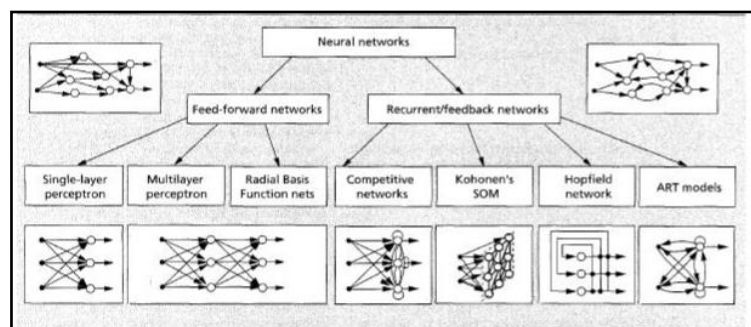


Figure III.15 : Topologies des Réseaux de Neurones Artificiels

Réseau multicouche :

Les neurones sont organisés en couches. Chaque neurone dans une couche est connecté à tous les neurones de la couche suivante, et ces connexions se font uniquement avec les neurones

des couches inférieures (voir figure III.16). Il n'y a pas de connexion entre les neurones au sein d'une même couche. Cette organisation permet d'introduire le concept de flux d'information (ou d'activation) au sein d'un réseau, et donc de définir les neurones d'entrée et de sortie. Par extension, la couche contenant les neurones d'entrée est appelée couche d'entrée, tandis que celle contenant les neurones de sortie est appelée couche de sortie. Les couches intermédiaires, qui n'ont aucun lien direct avec l'entrée ou la sortie, sont appelées couches cachées.

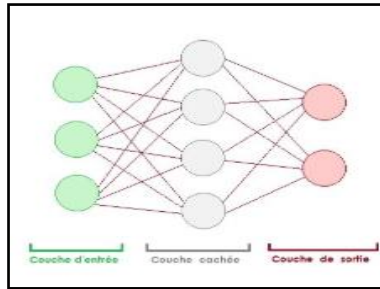


Figure III.16 : Réseau multicouche.

Réseau à connexions locales :

Il s'agit d'une structure multicouche, mais elle conserve une topologie semblable à celle de la rétine, où chaque neurone est connecté à un nombre restreint et localisé de neurones dans la couche inférieure (voir figure III.17). Par conséquent, le nombre de connexions est moins élevé que dans le cas d'un réseau multicouche classique.

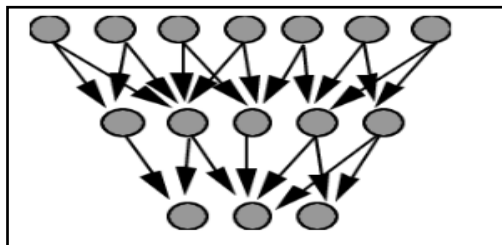


Figure III.17 : Réseau à connexion locales

Réseau à connexions récurrentes :

Les connexions récurrentes ramènent l'information en arrière par rapport au sens de propagation défini dans un réseau multicouche [52]. Ces connexions sont le plus souvent locales

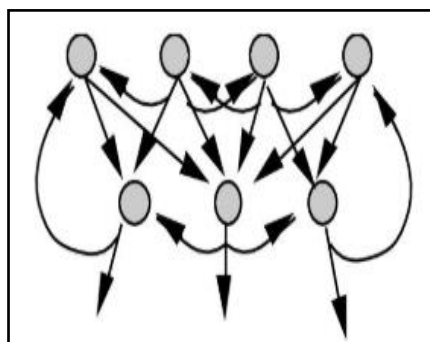


Figure III.18 : Réseau à connexion récurrentes

Réseau à connexion complète :

C'est la structure d'interconnexion la plus générale Chaque neurone est connecté à tous les neurones du réseau (et à lui-même) [52].

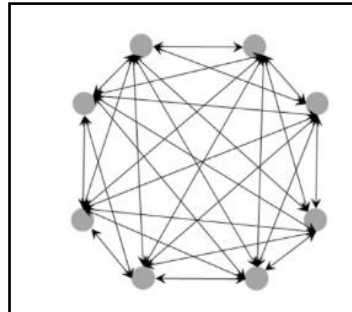


Figure III.19 : Réseau à connexion complète

Il existe de nombreuses autres topologies possibles, mais elles n'ont pas eu à ce jour la notoriété des quelques-unes que nous avons décrite ici.

III.17 Conclusion :

Ce chapitre dédié à la théorie des techniques d'intelligence artificielle (IA) en général, et aux réseaux de neurones en particulier, met en lumière les fondements et les avancées dans ce domaine en pleine expansion. L'IA, avec ses diverses branches telles que l'apprentissage automatique, l'apprentissage profond et les réseaux de neurones artificiels, a transformé de nombreux secteurs grâce à ses capacités de traitement et d'analyse des données à grande échelle.

Les réseaux de neurones, inspirés par le fonctionnement du cerveau humain, sont au cœur de cette révolution. Ils permettent de modéliser des relations complexes dans les données, de reconnaître des motifs et de faire des prédictions avec une précision remarquable. Les architectures variées, comme les réseaux de neurones convolutifs (CNN) pour la vision par ordinateur et les réseaux de neurones récurrents (RNN) pour le traitement du langage naturel, démontrent la polyvalence et l'efficacité de ces systèmes.

Chapitre IV

Contrôle optimal du système à hydrogène vert

IV.1 Introduction :

Dans le système étudié (Figure.IV.1), le champ photovoltaïque (PV) alimente directement l'électrolyseur où l'excédent solaire est stocké sous forme électrochimique dans Batterie, électrolyseur (EL) lié dissocie l'eau en hydrogène et oxygène. Le gaz H₂ est stocké dans un réservoir sous haute pression et sans perte. La pile à combustible connectée est alimentée alors par le réservoir d'hydrogène pour générer de l'électricité d'une puissance plus importante après avoir recombiner l'hydrogène et l'oxygène et dégageant de l'eau pure et chaude qui est stockée et recycler comme énergie de cogénération

IV.2 Simulation du système PV-H₂-PEMFC

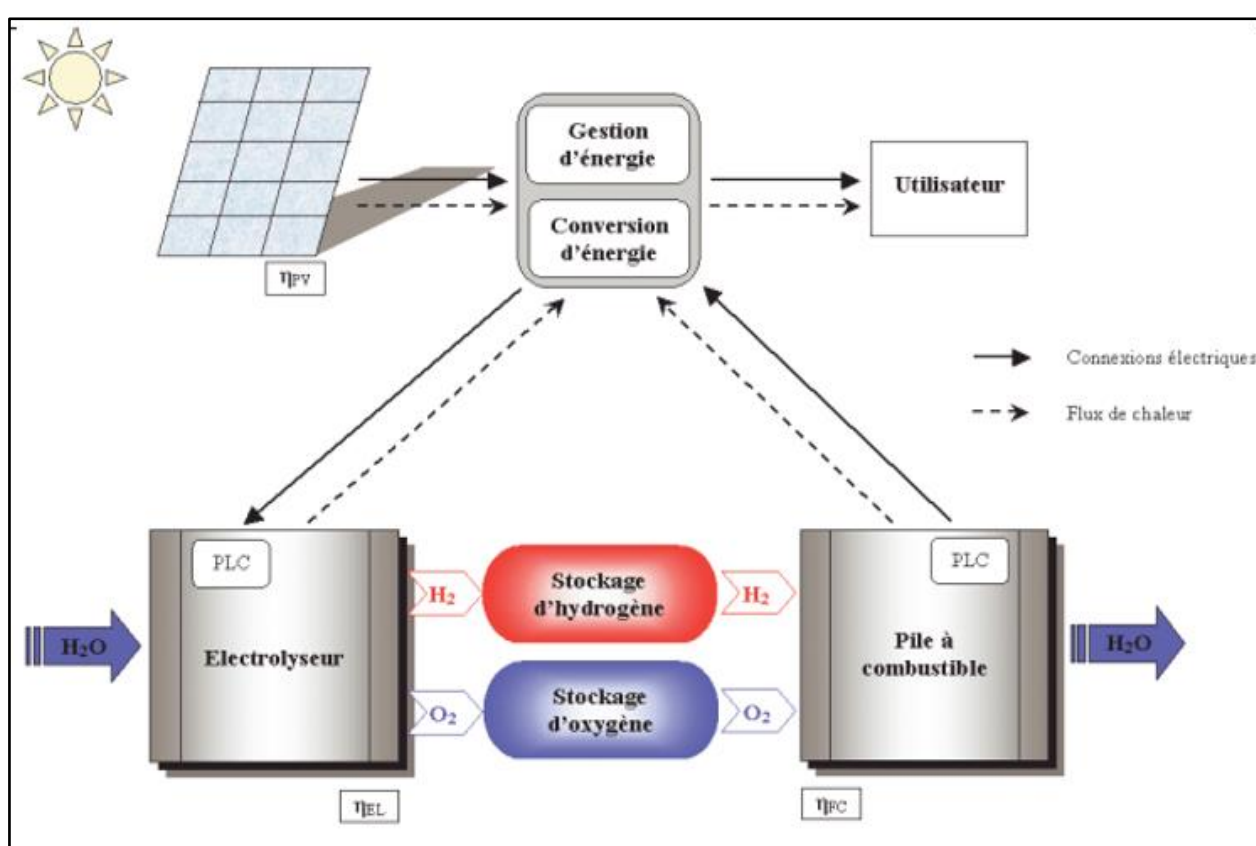


Figure IV.1 : Système hybride PV-H₂-PAC

IV.3. Partie PV

Dans cette partie, le contrôle par MPPT est réalisé par une technique classique et efficace dite perturbe and observe PO après avoir générer de l'électricité sans contrôleur.

Influence de la température et l'éclairement :

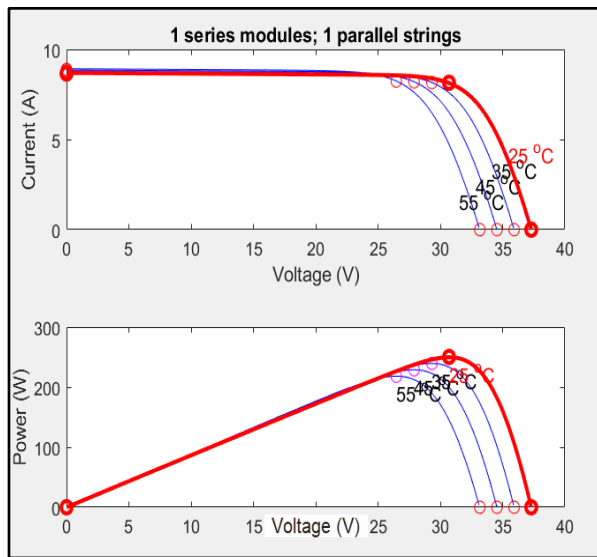


Figure.IV.2 : Influence de la température Sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$, $I_{pv} = f(V_{pv})$

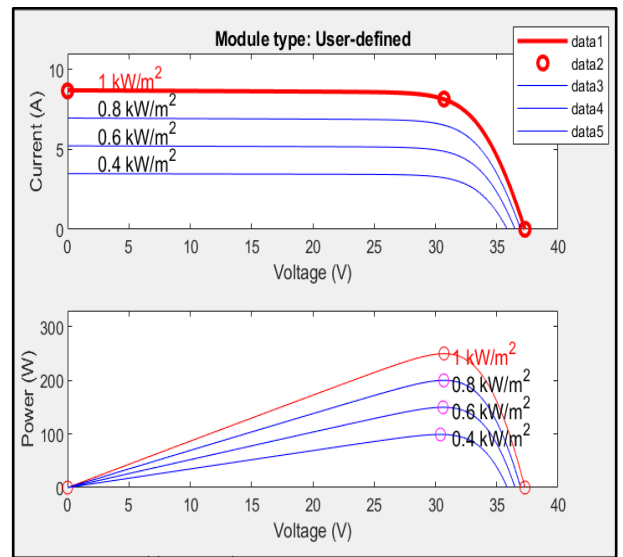


Figure.IV.3 : Influence de l'irradiation solaire sur les caractéristiques $P_{pv}=f(V_{pv})$, $I_{pv} = f(V_{pv})$

Caractéristique électrique du module photovoltaïque avec l'algorithme MPPT :

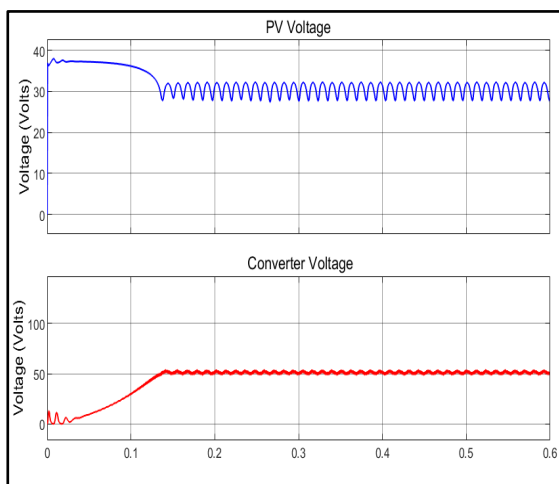


Figure.IV.4 : Effet de la commande MPPT Sur la tension du panneau PV

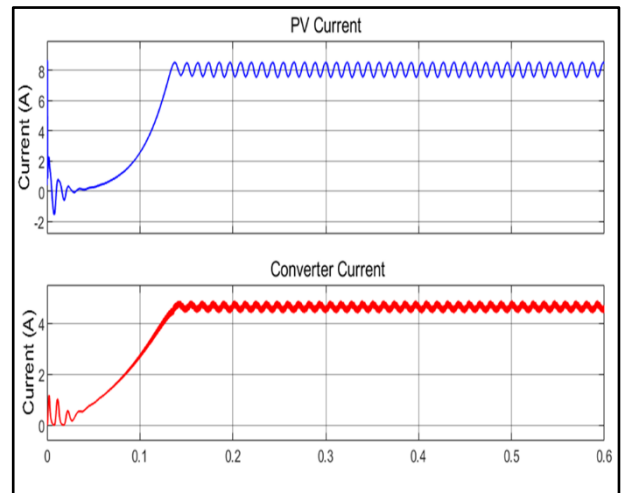


Figure.IV.5 : Effet de la commande MPPT sur le courant du panneau PV

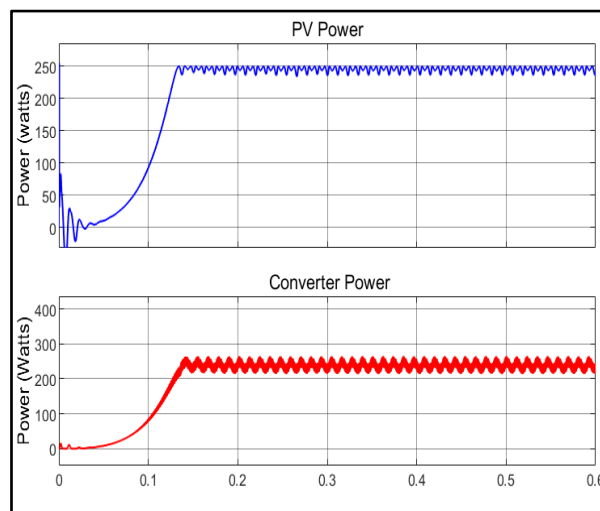


Figure. IV.6 : Effet de la commande MPPT sur la puissance du panneau PV

La simulation du PV avec MPPT /PO impliquée a donné des résultats typiques de la puissance maximale signalée par le constructeur dans les conditions standards : $W=250$ W avec un point de fonctionnement tension -courant très signifiante (30V, 8,30A), ce qui implique l'efficacité de l'application de cet algorithme

IV.4. Partie Electrolyseur avec contrôleur PI :

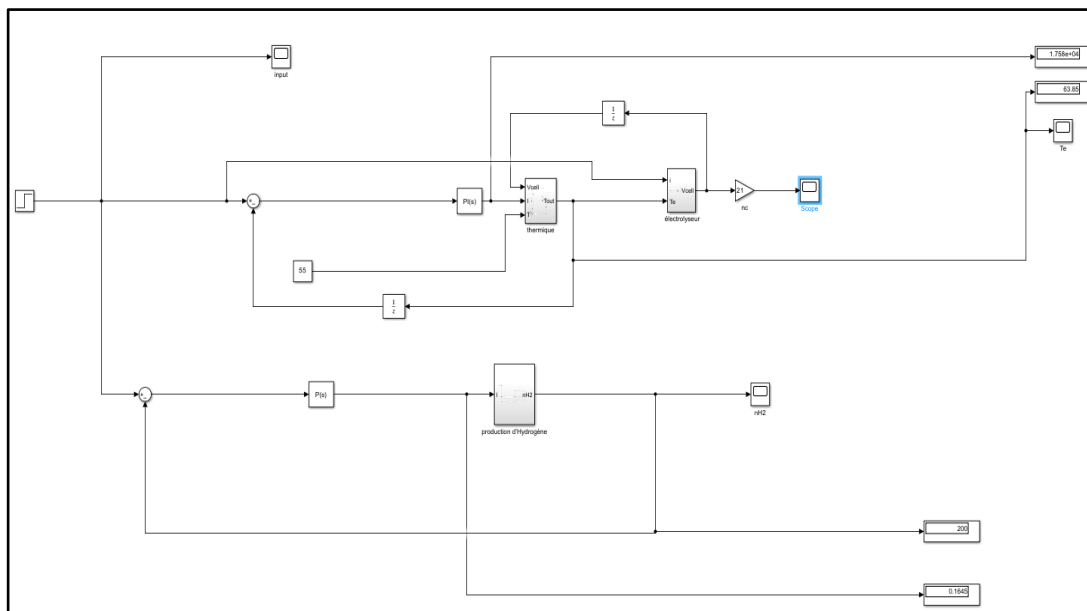


Figure.IV.7. Simulation d'électrolyseur avec commande PI

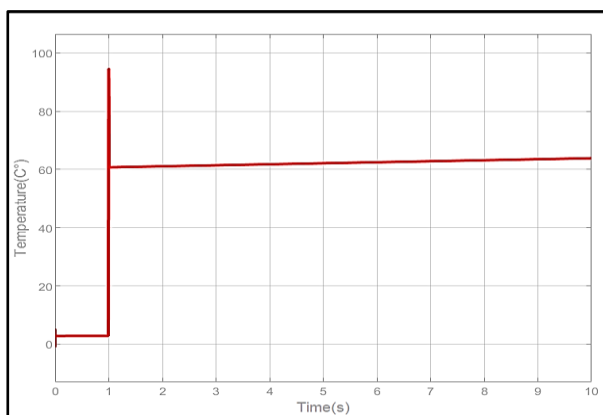


Figure. IV.8: la Température de l'électrolyseur

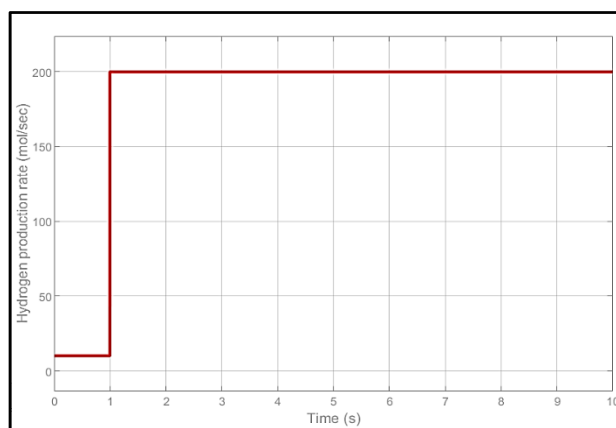


Figure. IV.9: Caractéristique variation du débit du H2 produit par l'électrolyseur avec le courant entrant nH2(I)

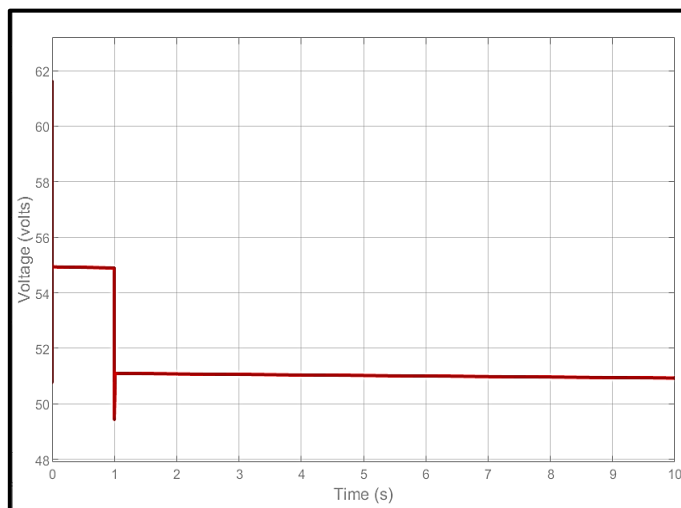


Figure. IV.10: Tension de l'électrolyser

IV.5. Partie PEMFC Avec la commande PI :

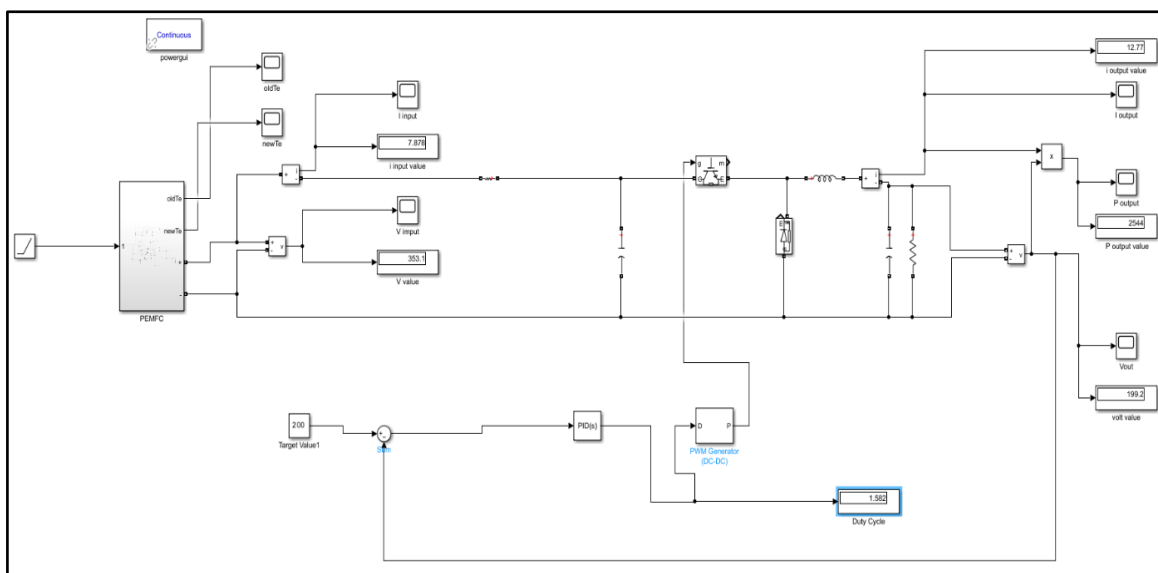


Figure. IV.11: Simulation de la pile PEMFC avec le PI.

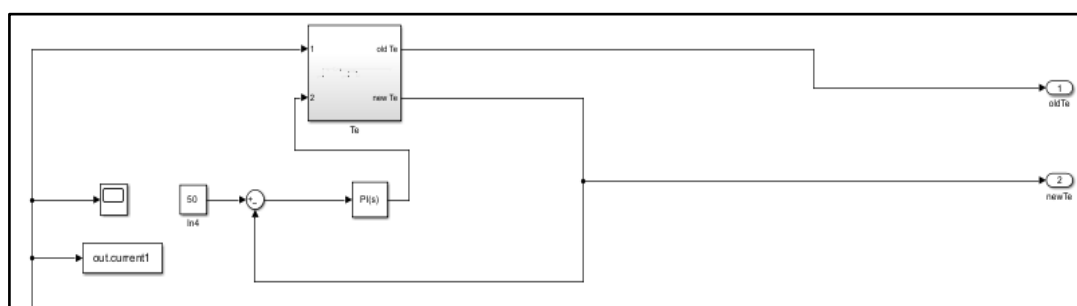


Figure. IV.12: contrôle de la Température dans la PEMFC avec PI.

IV.5.1. Partie PEMFC Avec la commande PI

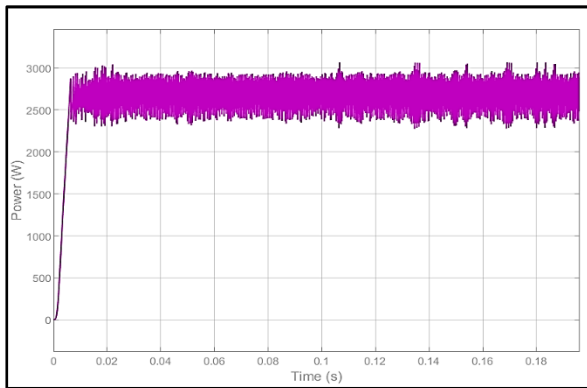


Figure.IV.13 : Caractéristique de la puissance

produite $P(t)$ par la PEMFC.

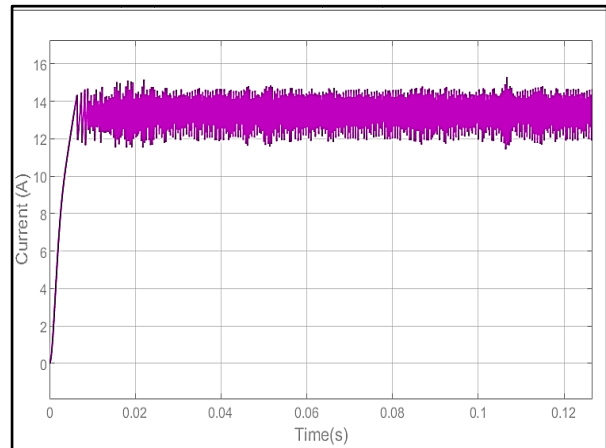


Figure.IV.14 : les caractéristiques de $I(t)$

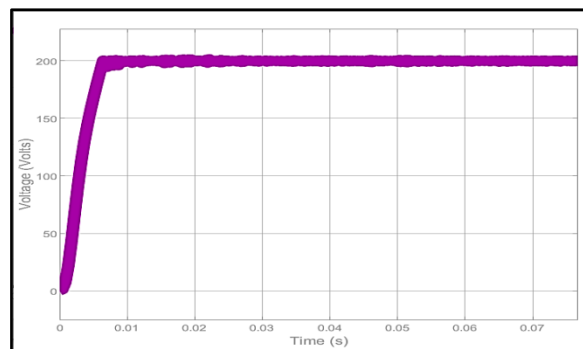


Figure.IV.15 : Caractéristique de $V(t)$.

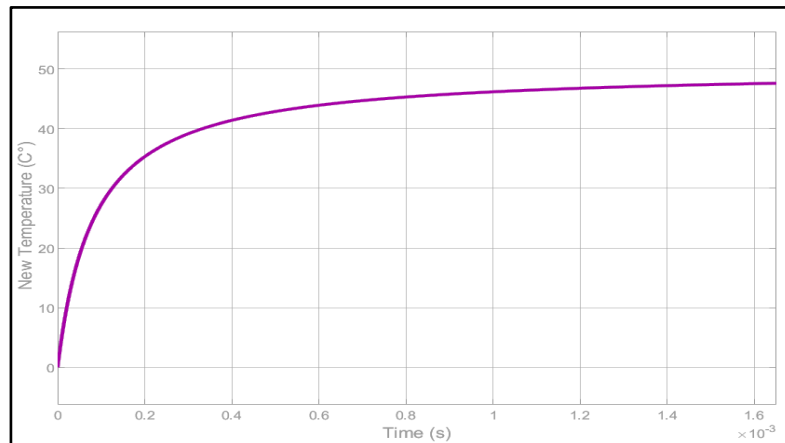


Figure.IV.16 : caractéristique de la température.

IV.7. Contrôle de l'électrolyseur par l'ANN :

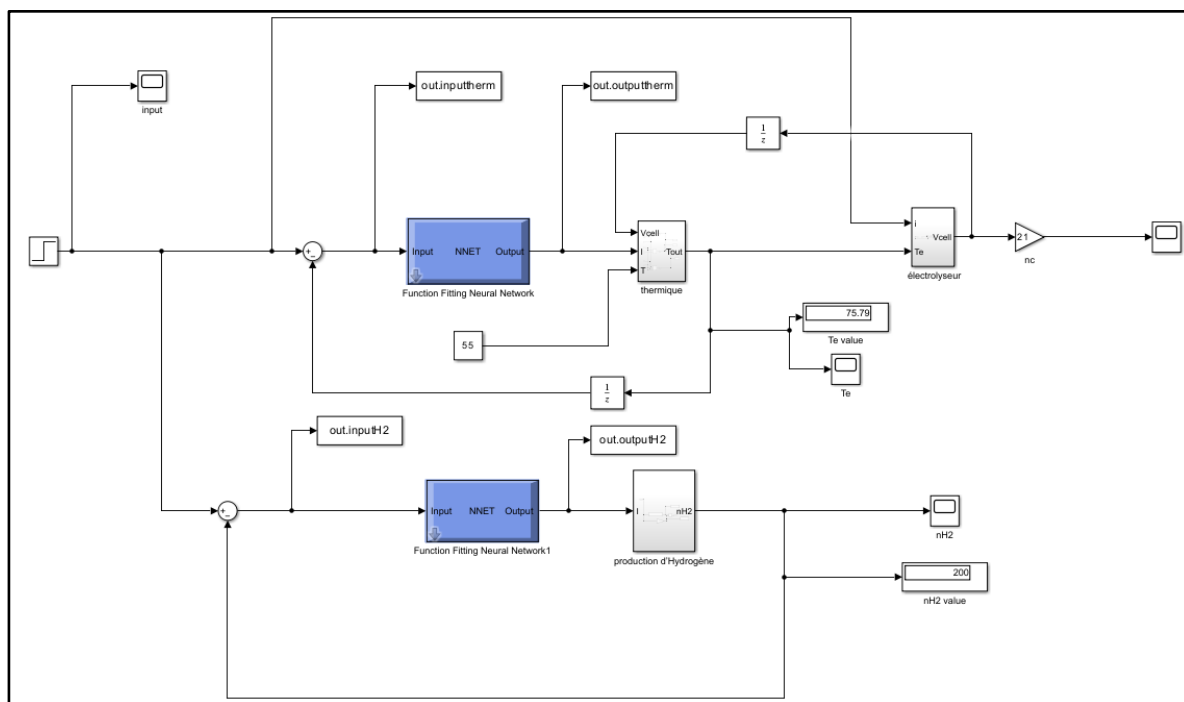


Figure.IV.17 : Bloc de simulation de l'électrolyseur avec contrôleur ANN

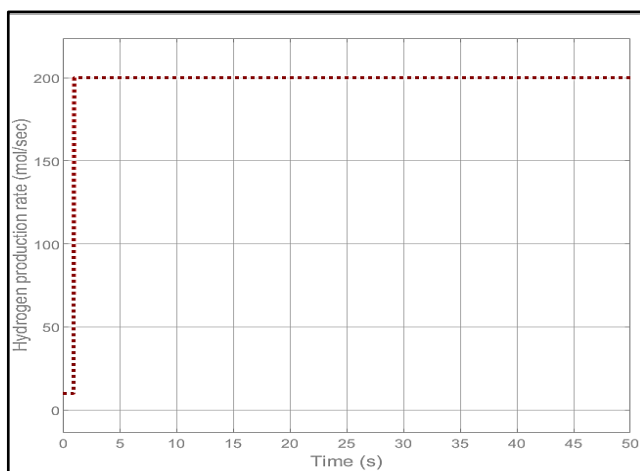


Figure. IV.18: Contrôle du débit du H2 produit par l'électrolyseur avec le courant entrant nH2(I) par ANN

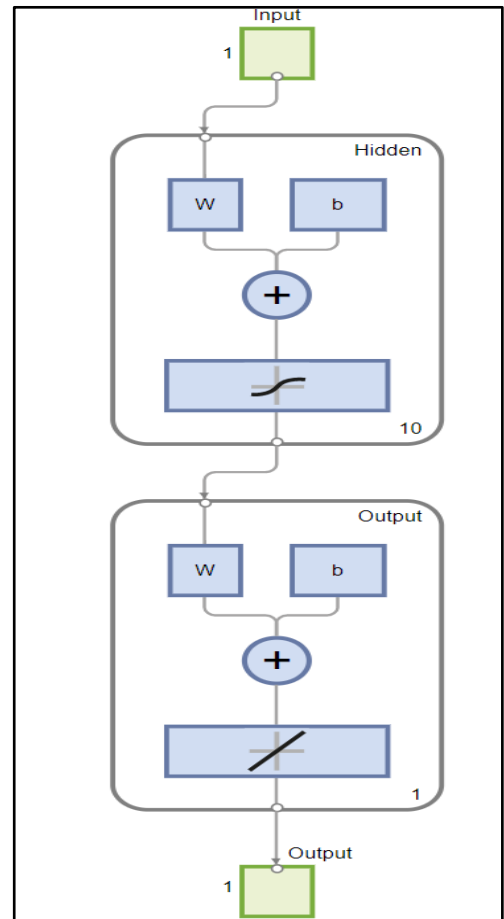
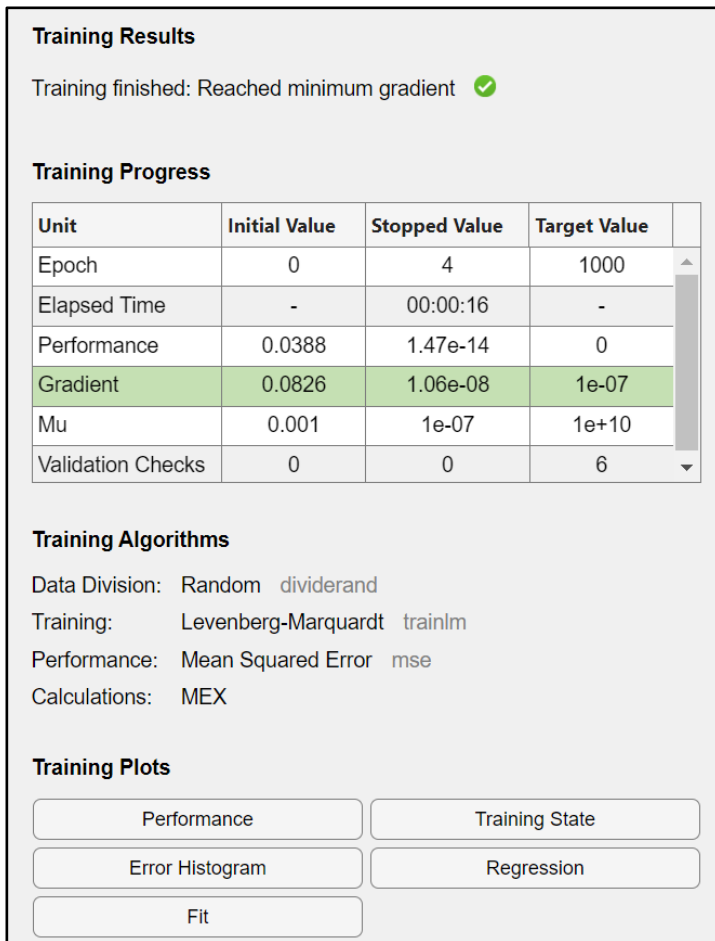


Figure. IV.19: Algorithme d'apprentissage de débit d'hydrogène produit.

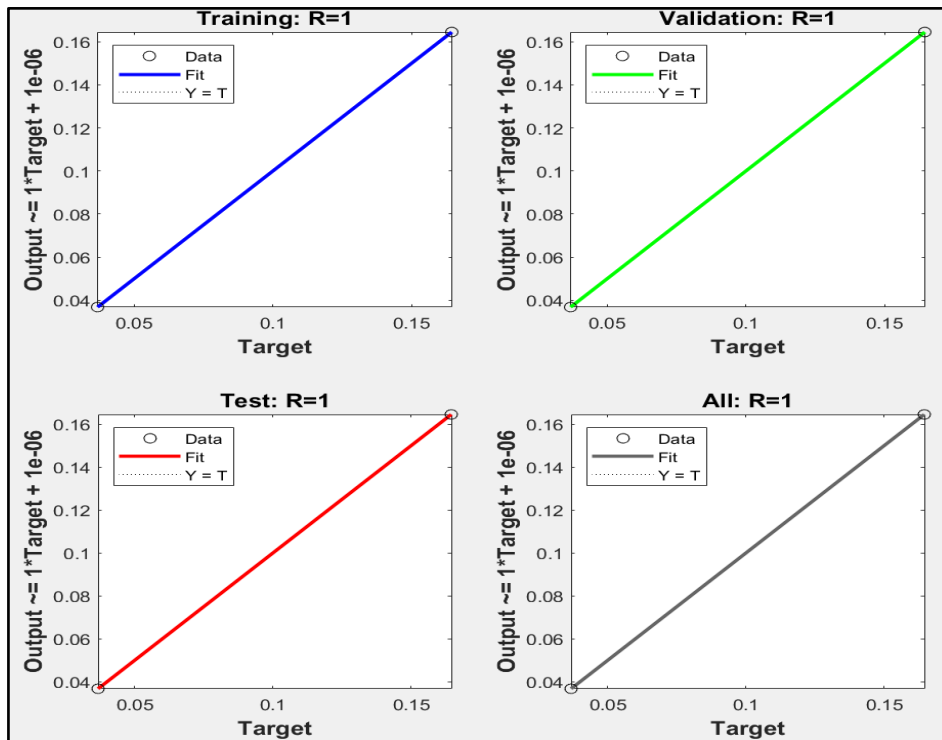


Figure. IV.20: Performance des ANN, Entraînement, Test et Validation

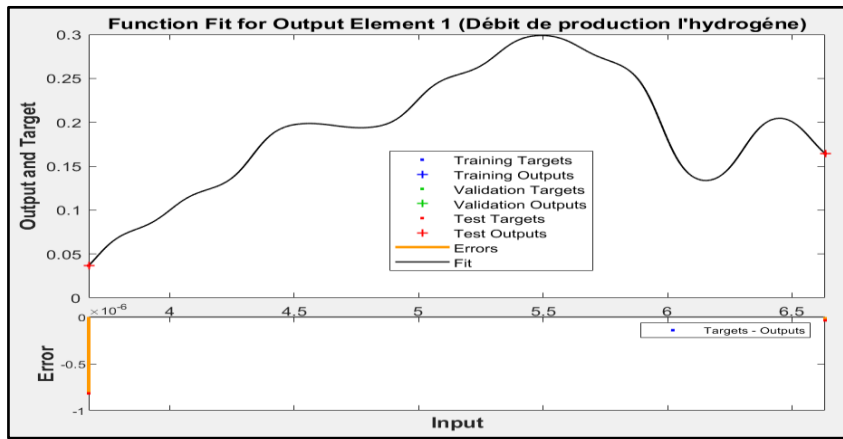


Figure. IV.21: Résultats de la fonction Fit for Output

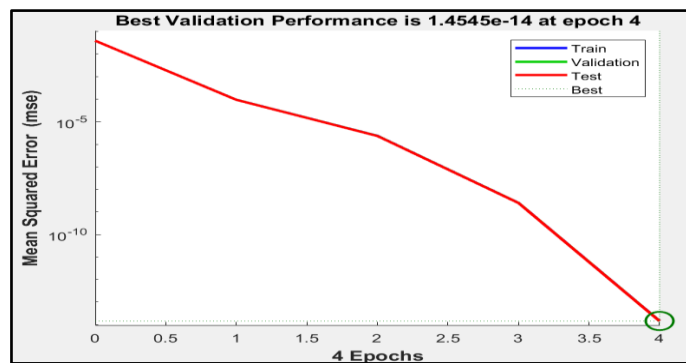


Figure. IV.22: Courbe de Performance de validation $n(h_2)$

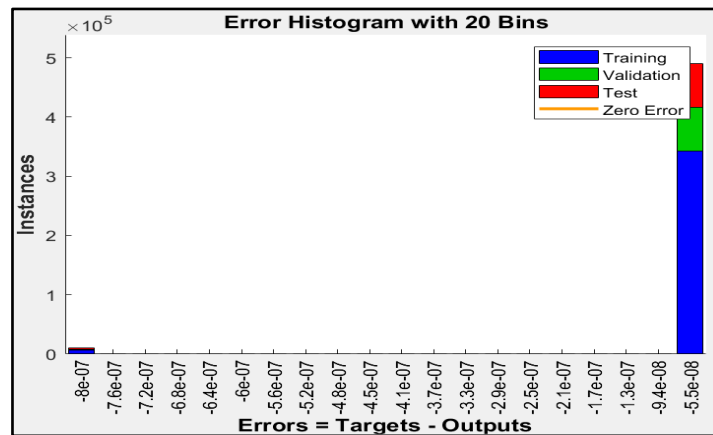


Figure. IV.23: Error histogram de H2

IV.7.1.2. La propriété D'aprantissage de la technique de réseaux de neurones :

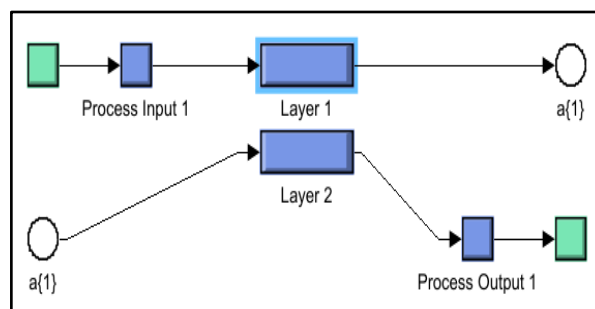


Figure. IV.24: Architecture de réseaux de neurone (couche d'entrée et cachée et sortie)

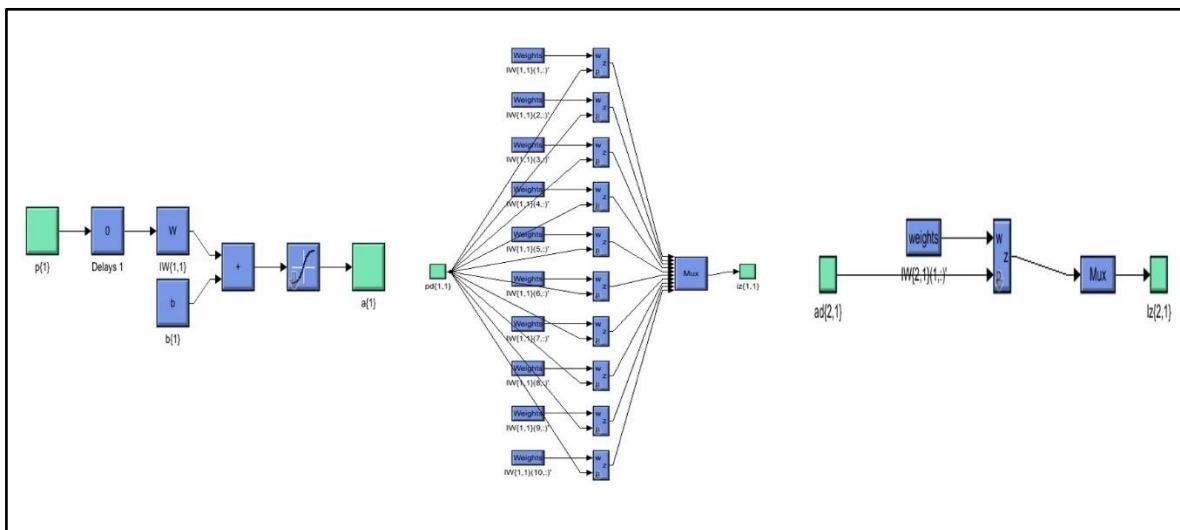


Figure. IV.25: Les fonctions d'activation pour chaque couche cachée (poids et biais).

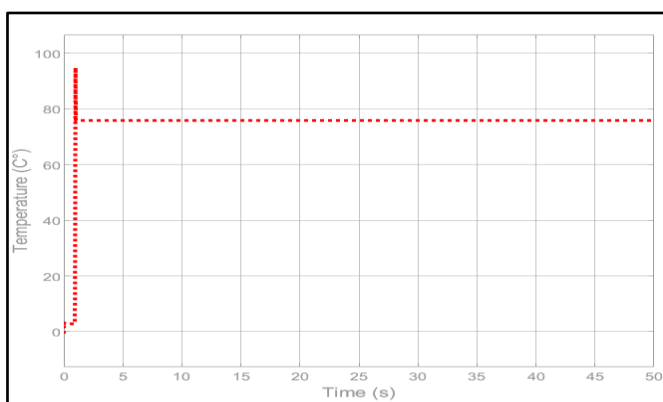


Figure. IV.26: Contrôle de la tension de l'électrolyseur

IV.7.1.3. Résultats du contrôleur ANN de la Température :

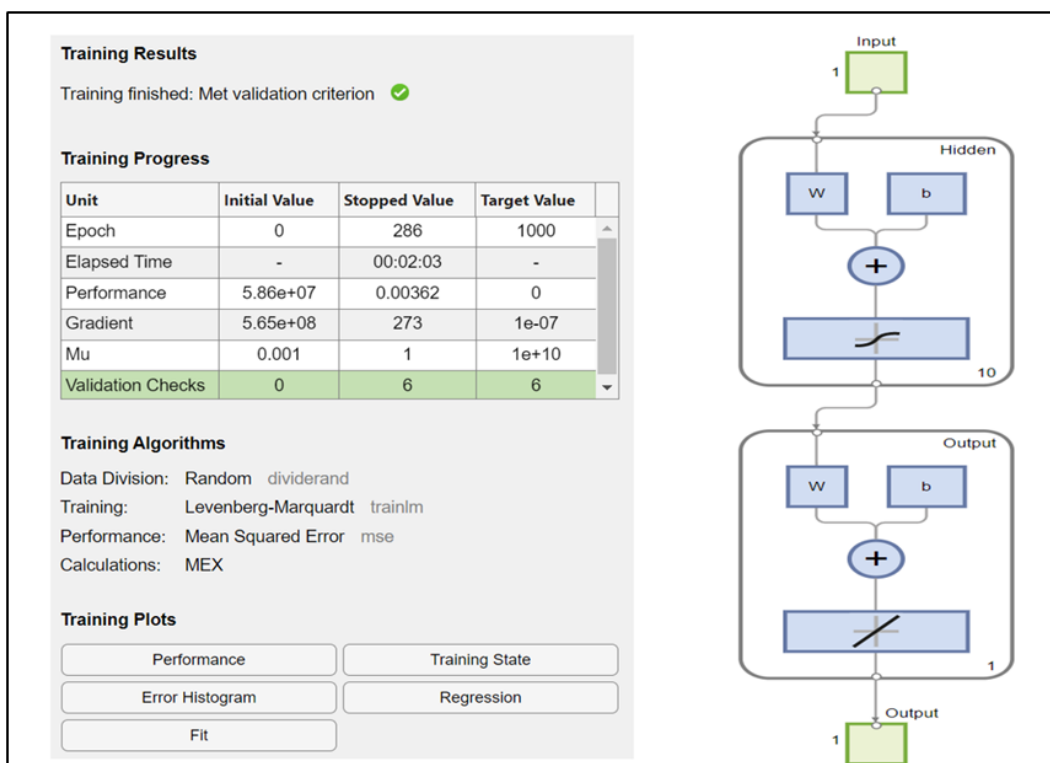


Figure. IV.27: Algorithme tramage de la Température.

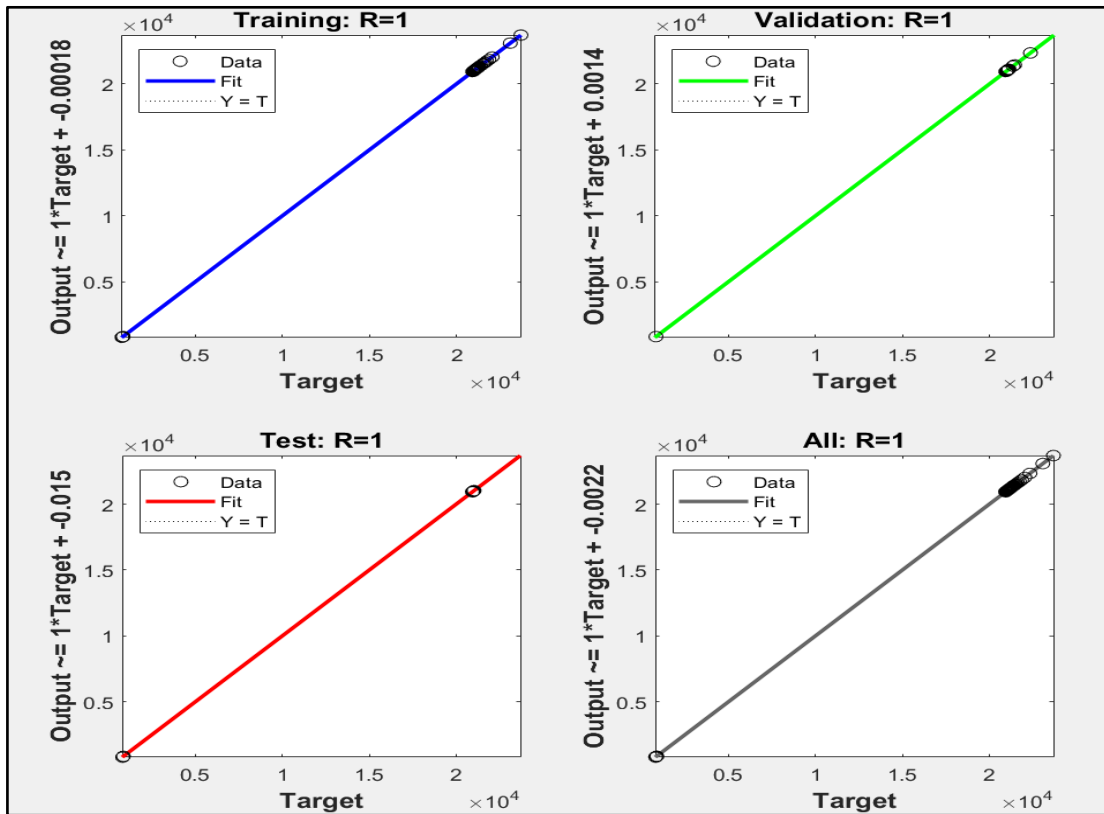


Figure. IV.28: Performance des ANN, Entraînement, Test et Validation

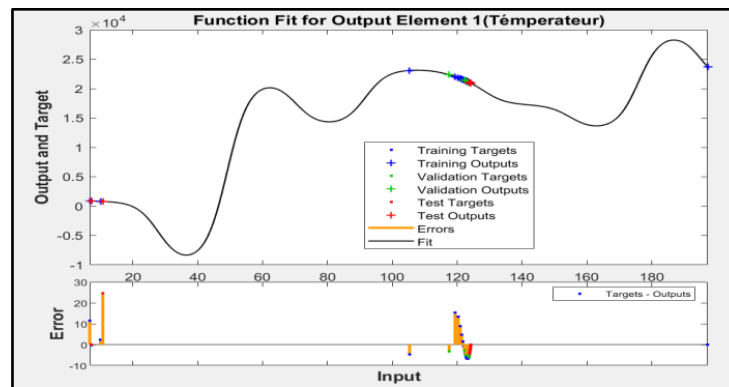


Figure. IV.28: Fonction de sortie de la Température.

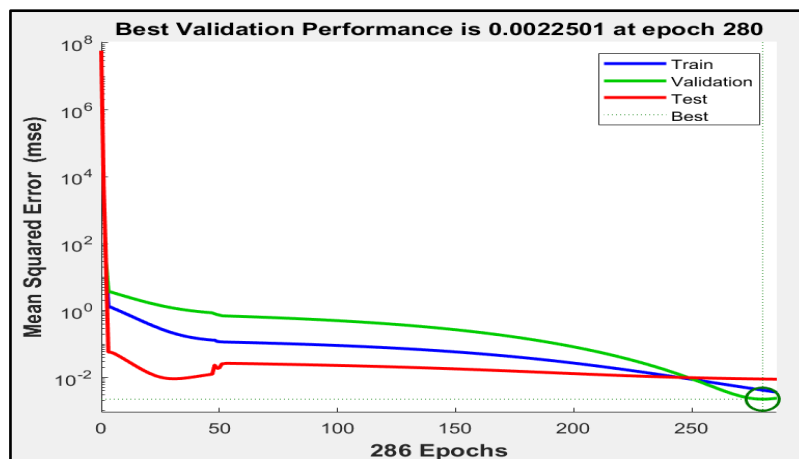


Figure. IV.29: Courbe de Performance de validation $n(h_2)$

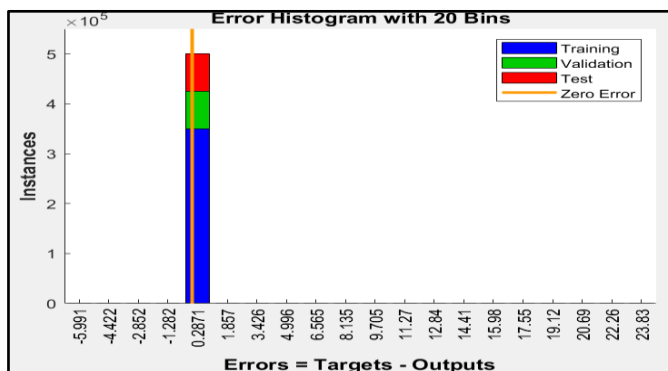


Figure. IV.30: Erreur histogramme de Température.

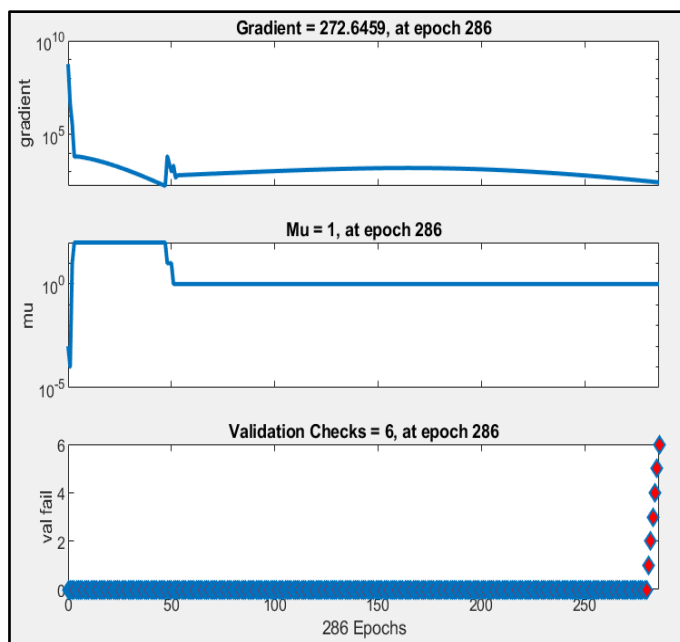


Figure. IV.31:

IV.7.1.4. La propriété D'aprentissage de la technique de réseaux de neurones :

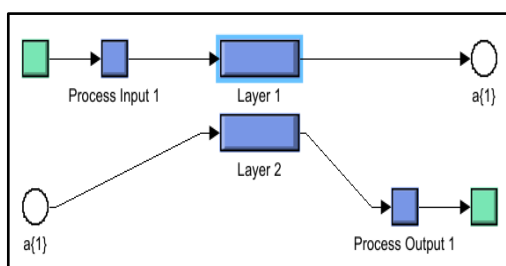


Figure. IV.32: Architecture de réseaux de neurone (couche d'entrée et cachée et sortie)

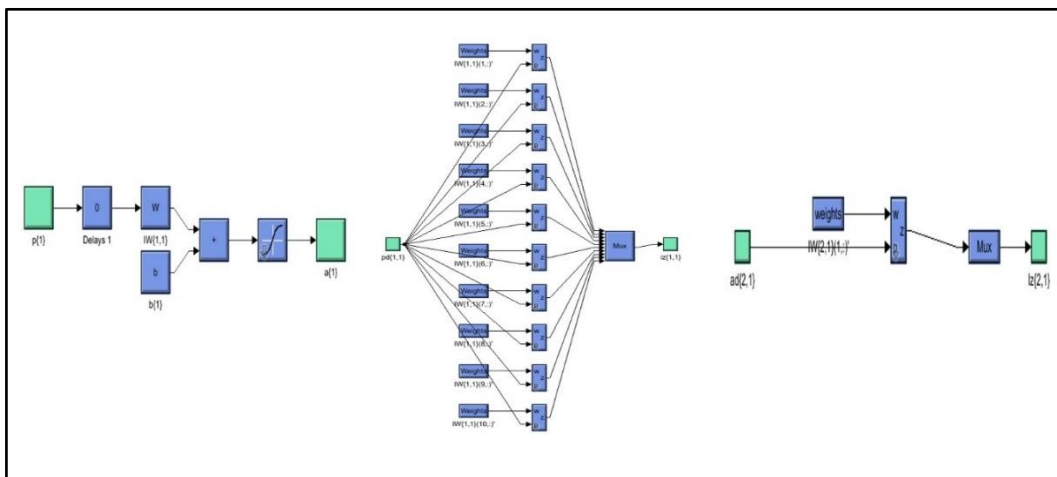


Figure. IV. 33 : Les fonction d'activation pour chaque couche cachée (poids et biais).

IV.8. contrôle de la PEMFC par l' ANN

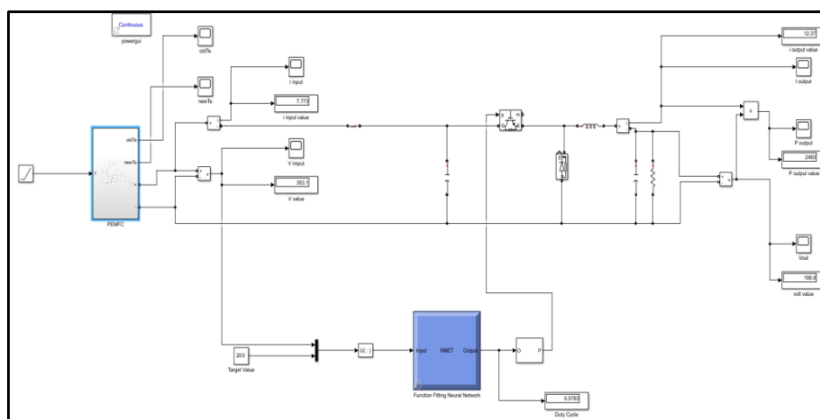


Figure. IV.34 : Simulation de la pile PEMFC avec le ANN.

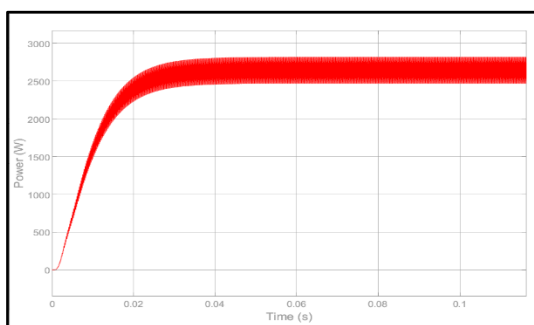


Figure.IV.35 : les caractéristiques de P(t) par contrôle des réseaux de neurone.

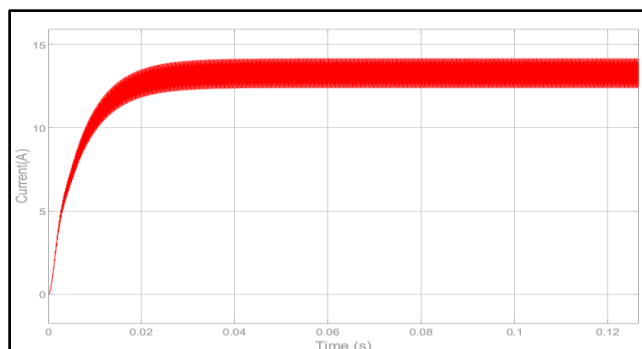


Figure.IV.36 : les caractéristiques de I(t) par contrôle des réseaux de neurone.

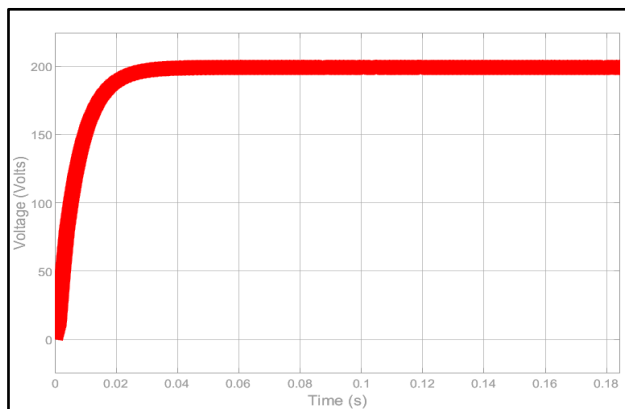


Figure.IV.37 : les caractéristiques de V (t) par contrôle des réseaux de neurone.

IV.8.1.1. Résultats de puissance de la pile :

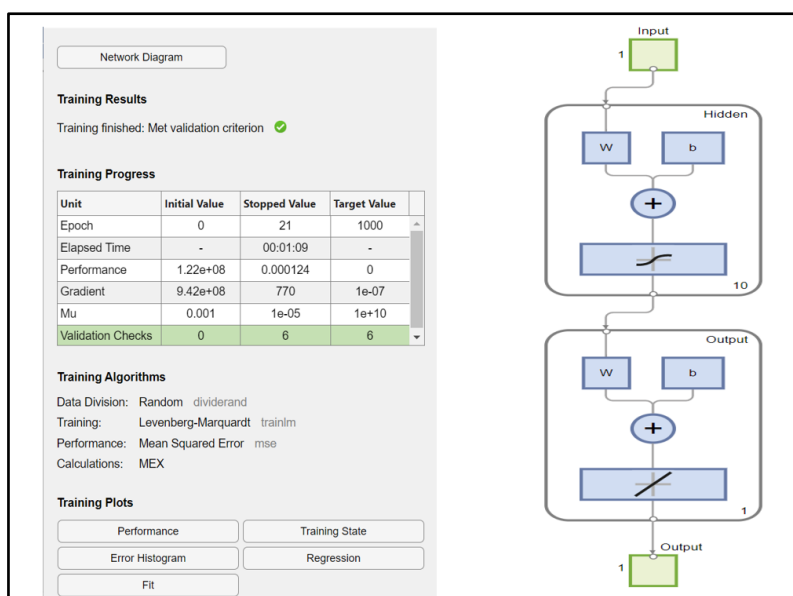


Figure. IV.38: Algorithme entrainement de la Puissance.

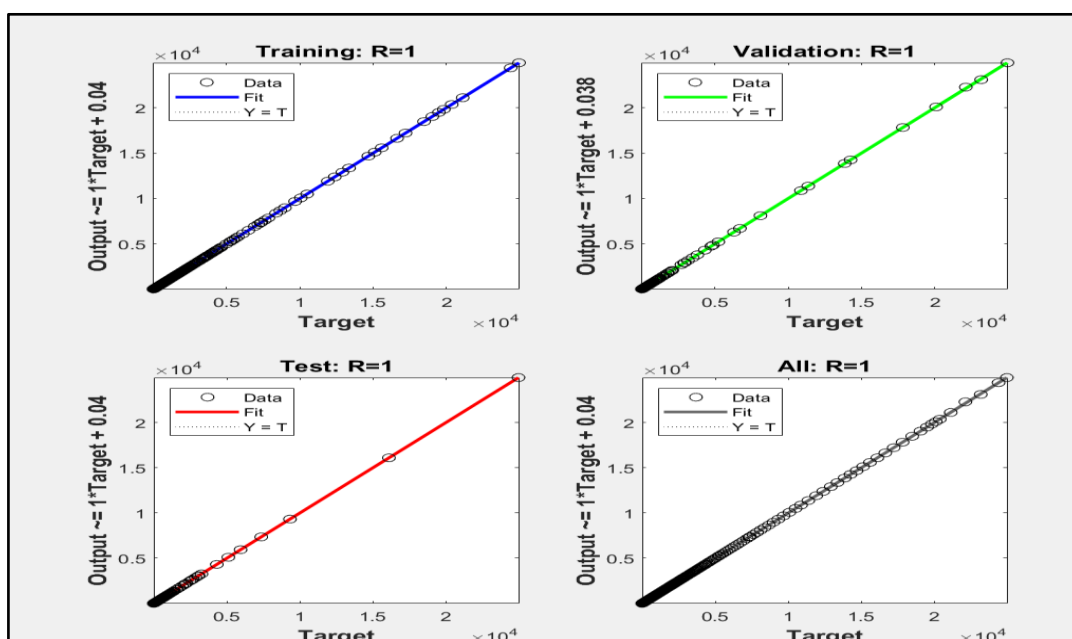


Figure. IV.39 : Performance des ANN, Entraînement, Test et Validation

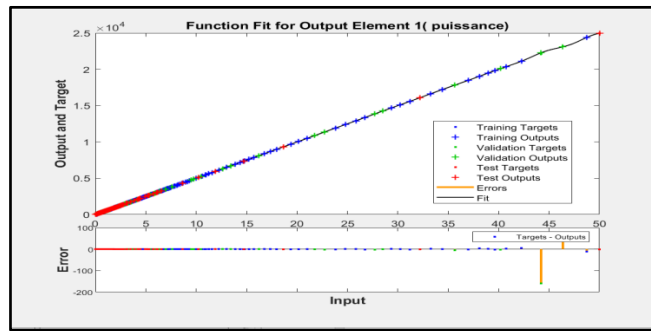


Figure. IV.41: Algorithme entrainement de débuts de production d'hydrogène

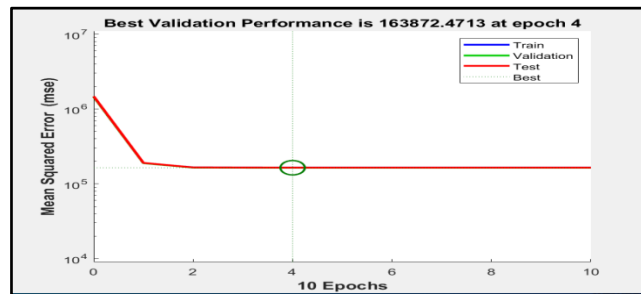


Figure. IV.42: Courbe de Performance de validation de P(t).

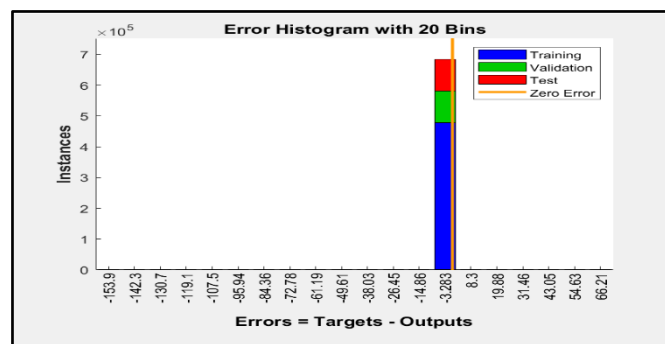


Figure. IV.43: Erreur histogramme de Puissance.

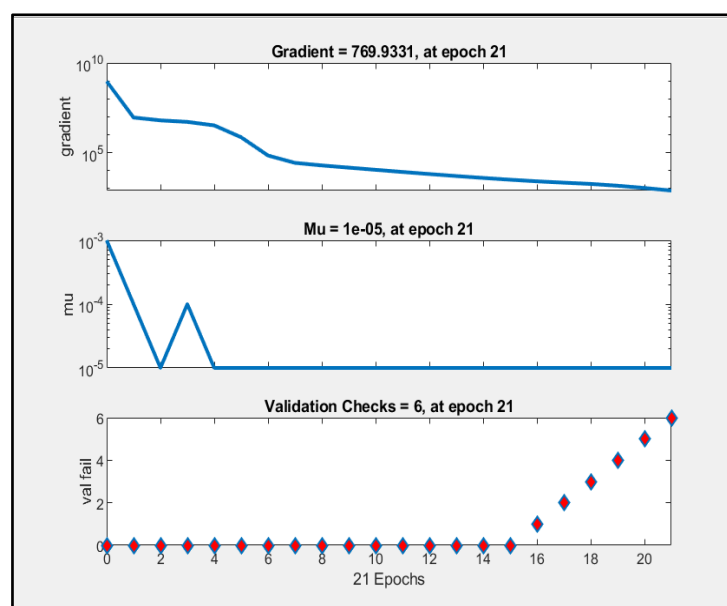


Figure. IV.44 :

IV.8.1.2. Propriété d'aprentissage de IANN:

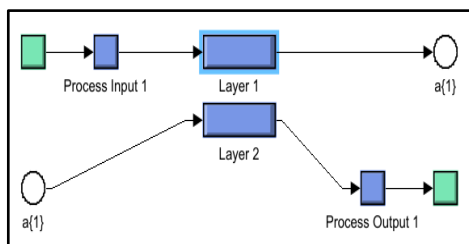


Figure. IV.45 : Architecture de réseaux de neurone (couche d'entrée et cachée et sortie)

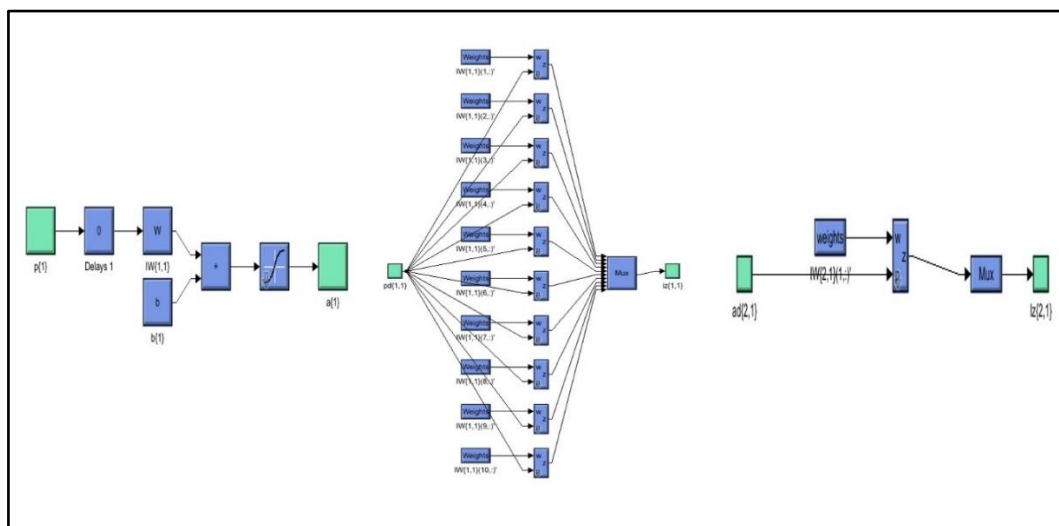


Figure. IV.46 : Les fonctions d'activation pour chaque couche cachée (poids et biais)

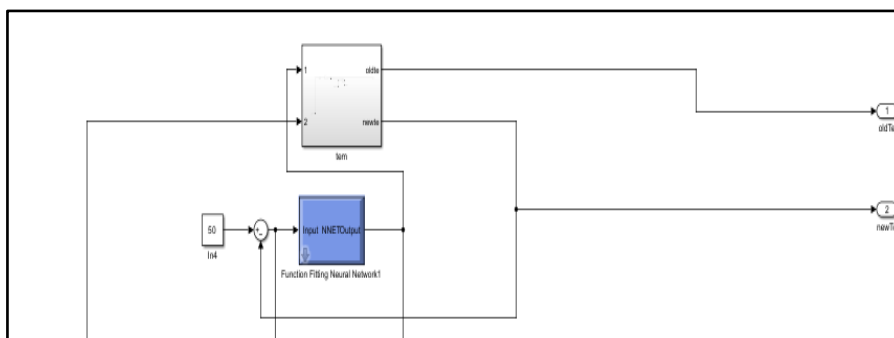


Figure.IV.47 : Block de thermique dans la pile contrôlée par ANN.

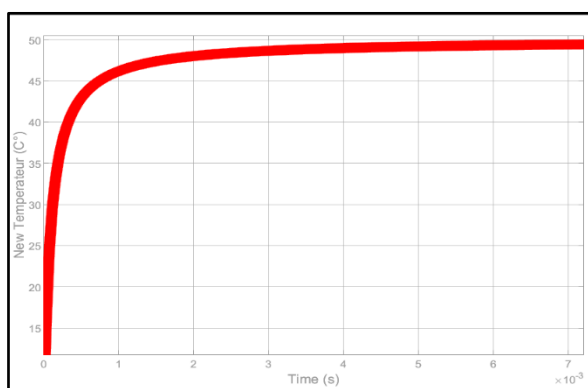


Figure.IV.48 : La température dans la pile contrôlée par ANN.

IV.8.1.3. Résultats de la Température :

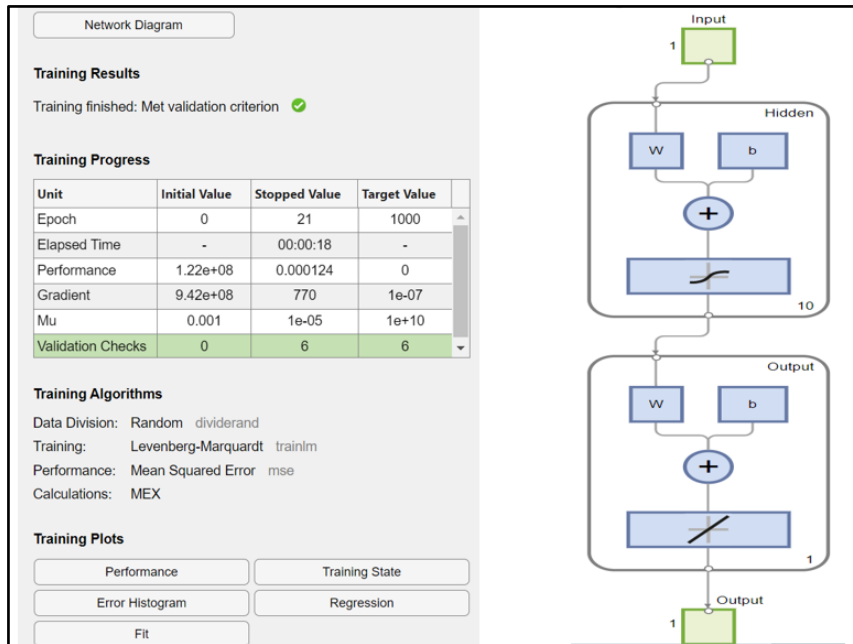


Figure. IV.49 : Algorithme trainage de la Puissance.

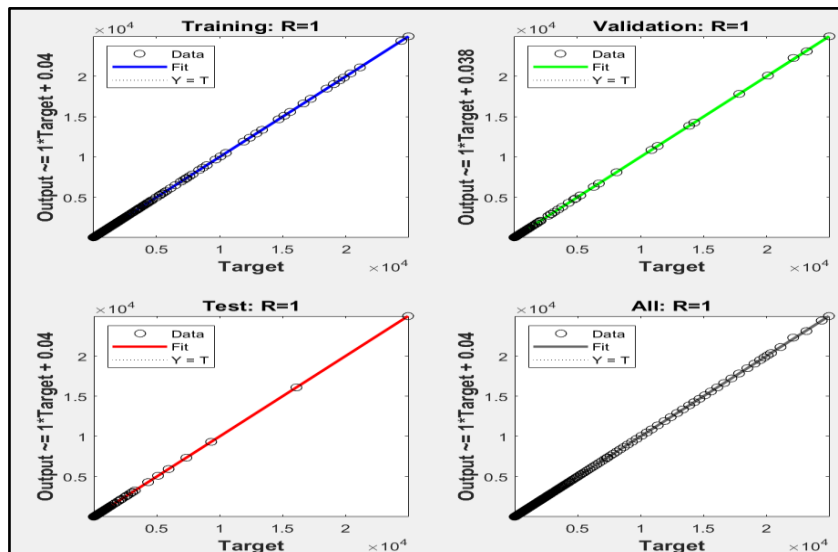


Figure. IV.50 : Performance des ANN, Entraînement, Test et Validation

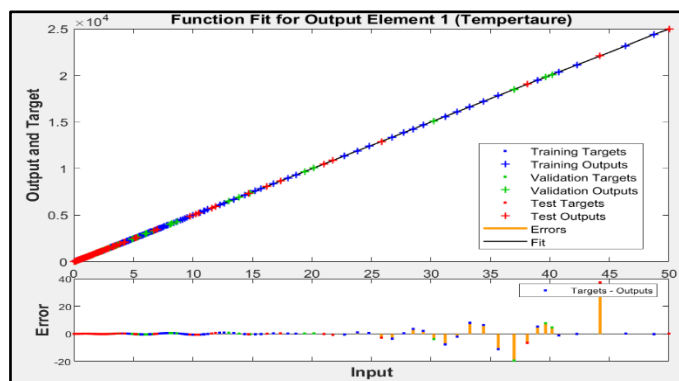


Figure. IV.51 : Algorithme trainage de Température.

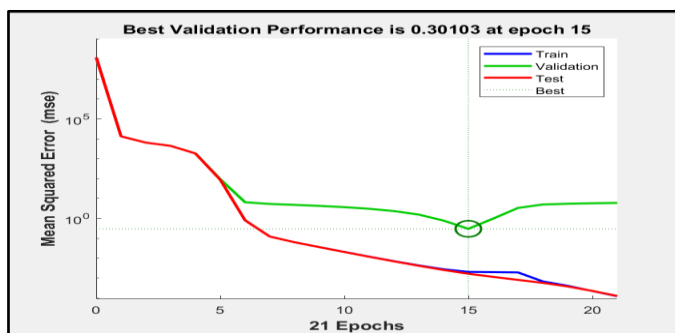


Figure. IV.52: Courbe de Performance de validation de P(t).

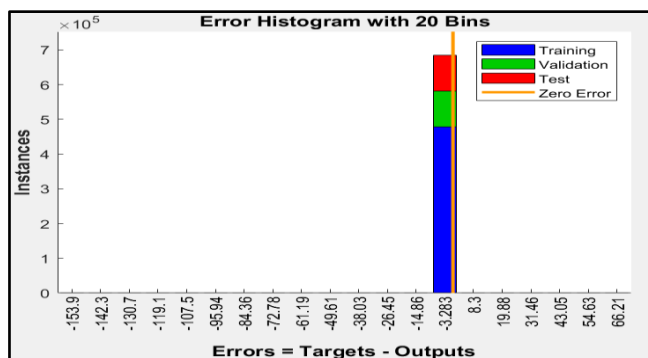


Figure. IV.53: Erreur histogramme de Température. Dans la pile PEMFC

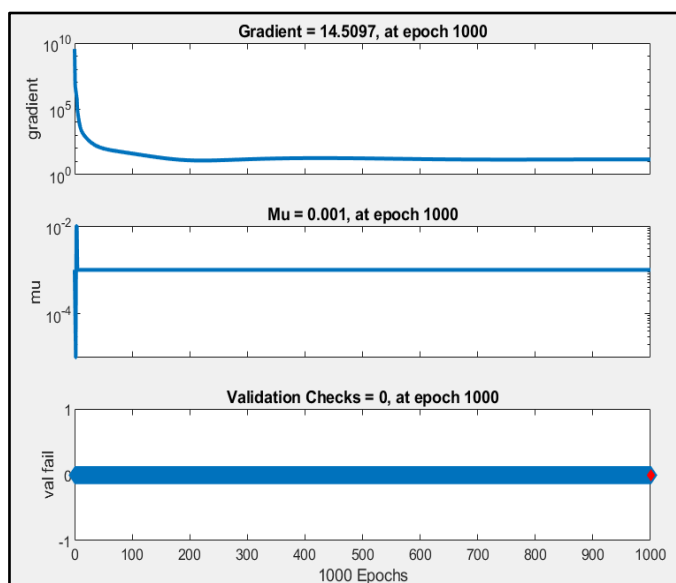


Figure. IV.54 :

IV.9. Analyse comparative des Résultats entre le contrôleur PID et l'ANN :

Pour analyser les résultats obtenus suite à l'application de deux types de contrôleurs, le contrôleur classique PI et le contrôleur intelligent ANN, sur les grandeurs d'un système à hydrogène vert, nous devons comparer plusieurs paramètres clés du système. Ces paramètres incluent le débit d'hydrogène produit par l'électrolyseur et injecté dans la PEMFC, la température au sein de l'électrolyseur et la PEMFC, et la puissance produite par la pile PEMFC.

L'application du contrôleur intelligent ANN montre des avantages significatifs par rapport au contrôleur classique PI sur plusieurs aspects du système à hydrogène :

1. Adaptabilité : Le ANN s'adapte plus rapidement et efficacement aux variations des conditions de fonctionnement, améliorant ainsi la performance globale du système.
2. Précision : Une meilleure précision dans le suivi des paramètres critiques (débit d'hydrogène, température, puissance) réduit les oscillations et améliore la stabilité.
3. Efficacité énergétique : Le ANN optimise en temps réel, ce qui conduit à une meilleure efficacité énergétique et à une production de puissance plus stable.
4. Temps de réponse : Le temps de réponse plus rapide du ANN permet de mieux gérer les perturbations et les variations rapides des conditions de fonctionnement.

Ces avantages montrent que le contrôleur ANN est plus efficace et performant que le contrôleur PI pour la gestion des systèmes à hydrogène, contribuant à une meilleure stabilité, une optimisation énergétique accrue, et une performance globale améliorée du système.

En outre des contrôleurs des grandeurs majeures introduits dans le système, notre chaîne d'hydrogène vert approuve une rentabilité flagrante dont les chiffres de puissance s'impliquent fortement en démarrant par une puissance électrique de 250 W de source photovoltaïque alimentant l'électrolyseur en aboutissant à une autre de 2,5 kW produit par la pile à Combustible PEMFC.

Conclusion générale

Conclusion générale et perspectives :

Ce travail de fin d'études, réalisé dans le cadre de l'obtention du diplôme de master en Électrotechnique industrielle, a porté sur l'étude de la faisabilité et l'optimisation d'un système à hydrogène vert basé sur une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) alimentée par de l'hydrogène vert produit par un électrolyseur, lui-même alimenté par un panneau photovoltaïque.

L'objectif principal était de démontrer l'efficacité du système comme nouveau vecteur dans le domaine des énergies renouvelables et de l'utilisation de contrôleurs classiques et intelligents pour optimiser les performances du système, en se concentrant sur trois aspects critiques : le débit d'hydrogène produit et injecté dans la PEMFC, la température au sein de la PEMFC, et la puissance produite par cette dernière. Deux types de contrôleurs ont été comparés : le contrôleur classique PI et le contrôleur intelligent ANN (Artificial Neural Network).

Contributions et Résultats

1. *Modélisation et Simulation* : Après avoir présenté un état de l'art sur les différents organes acteurs dans le système à étudier, nous avons modélisé le système complet comprenant le panneau photovoltaïque, l'électrolyseur, et la pile à combustible. Des simulations sous Matlab ont été effectuées pour comprendre le comportement du système sous différents régimes de fonctionnement.

2. Application des Contrôleurs

- Contrôleur PI : La régulation classique PI a montré des performances satisfaisantes mais limitées par des réponses plus lentes et des oscillations en présence de perturbations rapides. Des ajustements manuels étaient nécessaires pour maintenir des performances optimales.

- Contrôleur ANN : Le contrôleur intelligent ANN a démontré une meilleure adaptabilité et une optimisation en temps réel, conduisant à une régulation plus précise du débit d'hydrogène, de la température et de la puissance produite. Les simulations ont révélé une efficacité énergétique accrue et une stabilité améliorée du système.

3. *Optimisation de la PEMFC* : Grâce à l'utilisation de contrôleurs ANN, nous avons observé une réduction significative des oscillations thermiques et une amélioration de la stabilité de la température, conduisant à une performance optimisée de la PEMFC. De plus, la puissance produite était plus constante et mieux régulée tout en arrivant à l'objectif souhaité de 2500 W à la sortie du système où l'entrée n'était que de 250 W, ce qui a permis d'augmenter l'efficacité globale du système.

Perspectives et Recommandations

Les résultats de cette étude ouvrent la voie à plusieurs perspectives intéressantes pour les recherches futures :

- Amélioration des Algorithmes ANN : L'optimisation continue des algorithmes de contrôle intelligent pour une meilleure performance et une réduction des coûts de calcul.

- Intégration avec d'autres Sources d'Énergie Renouvelable : Étudier la combinaison avec d'autres sources d'énergie renouvelable pour augmenter la résilience et la durabilité du système.

- Développement de Systèmes de Gestion de l'Énergie : Élaborer des systèmes de gestion de l'énergie intégrés utilisant des contrôleurs intelligents pour une efficacité énergétique accrue à grande échelle.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

- [01] Zerguine B. “ MODELISATION D’UN SYSTEME DE PRODUCTION ELECTRIQUE PAR LA CELLULE PHOTOVOLTAIQUE ”, Mémoire de Mastère Université BADJI MOKHTAR Annaba, 2010.
- [02] WWW.hopenergie.com.
- [03] Alayat M., Boucetta I. “ Maximisation de la production d’un système Photovoltaïque à base de MPPT soumis à des éclairagements différents ”, Mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba, Juin 2017.
- [04] Soltane B., “ Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables ”, Thèse de Doctorat, Université deConstantine, 2010.
- [05] FPGA en utilisant la carte ML605 ”, Université Mohamed Boudiaf M’sila, 2018.
- [06] MADANI Maroua, “ Implémentation d’un algorithme MPPT. [06]
- [04] Soltane B., “ Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables ”, Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2010.
- [08] “ biomasse”, http://www.voltalia.com/fr/biomasse/presentation_88.html
- [09] Bernard Multon, Hamid Ben Ahmed. Le stockage stationnaire d’énergie électrique : pourquoi et comment ? La Revue 3E.I, 2007, pp.6-16. Hal-0067613
- [10] Kh. Bouziane, « étude d'une installation photovoltaïque production d’hydrogène par Électrolyse de l’eau » Thèse de magister, Université Kasdi Merbah Ouargla, mai 2011.
- [11] C. W. Forsberg, « Future hydrogen markets for large-scale hydrogen production systems », International Journal of Hydrogen Energy, vol. 32, n 4, p. 431-439 mars 2007.
- [12] M. A K. Lodhi, « Helio-hydro and helio-thermal production of hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy, vol. 29, no11, p. 1099-1113, sept 2004.
- [13] R.Boudries, R.dizène, A. Khellaf and M. Belhamel, «HYDROGEN AS AN ENERGY. GARRIER », Editor: Aiden M.Harris, © 2010 Nova Science Publishers, Inc.
- [14] <http://www.futura-sciences.com/>. Consulté le 17/05/2023.
- [15] HAMICHI, Anissa. Potentiel de production d'hydrogène à partir de l'énergie éolienne En Algérie : Approche basée sur le SIG. Diss. 2019.
- [16] Cours disponible sur : www.ulb.ac.be/inforosciences/files/piles.pdf
- [17] Cours disponible sur : <https://tpepilecombustible.wordpress.com>
- [18] H. Oman, « Fuel cells for personal electricity ». Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, vol. 15, n° 9, September 2000, pp.43-45.
- [19] T. Alleau Mémento de l’hydrogène : La pile PEMFC AFH2 - FICHE 5.2.2 – 2003. 19]
- [20] S. AIT MAHREZ, B. ADJEROUD « Gestion optimale d’énergie d’un système PV/PAC avec stockage d’hydrogène ». Mémoire de master. Université Saâd Dahleb, Blida,2020.
- [21] H. Essakhi, « modélisation et simulation d'un module photovoltaïque », LASIME, ESTA Université Ibn Zohr, BP 33 (2019).
- [22] S. BENMAIL « Contribution à La Modélisation Et à l’Optimisation Des Systèmes Photovoltaïque ». Mémoire de magister Université de A. MIRA-BEJAIA, 2012.
- [23] Y. Belkhier, M. Ait « Modélisation et simulation d’un système photovoltaïque ». Mémoire de master. Université Abderrahmane Mira de Bejaia,2021.
- [24] Ulleberg, Øystein. "Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach." International journal of hydrogen energy 28.1 (2003): 21-33.

- [25] A. Khalilnejad. «A hybrid wind-PV system performance investigation for the purpose of maximum hydrogen production and storage using advanced alkaline electrolyzer»Energy Conversion and Management,Vol 80, April 2014, Pages 398-406
- [26] A. Khalilnejad, A. Sundararajan, A.I. Sarwat. « Performance Evaluation of Optimal PhotovoltaicElectrolyzer System with the Purpose of Maximum Hydrogen Storage ». 2016-ESC-007
- [27] A. Khalilnejad, A. Sundararajan, A.I. Sarwat. « Performance Evaluation of Optimal PhotovoltaicElectrolyzer System with the Purpose of Maximum Hydrogen Storage ». 2016-E
- [28] Djoudi H, Badji A, Benyahia N, Zaouia M, Denoun H, Benamrouche N. « Modeling and Power Management Control of the Photovoltaic and Fuel Cell/Electrolyzer System for Stand-Alone Applications ». IEEE. 2015.
- [29] M FRADJ K MECHERI K « Etude et gestion d'un système hybride ». Mémoire de master. Université de kasdi merbah ouargla,2019.
- [30] H. Ismail « Etude et gestion d'un système d'énergie hybride ». Mémoire de Magister, Université de BEJAIA, 15/12/2015
- [31] Bühler H., Réglage par logique floue, Presse Polytechnique et Universitaires Romandes, Lausanne 1994
- [32] J. C. Amphlett et al., Dynamic behavior of a PEM fuel cell stack for stationary applications, Int. J. Hydrogen Energy, vol. 26, pp. 625–629, 2001.
- [33] K.Chandler et B. L. Eudy, Thunder Power Bus Evaluation at Sun Line Transit Agency, prepared for the DOE, Contract No. DOE/GO-102003-1786, November 2003, Available: <http://www.eere.energy.gov>
- [34] Khaled Mammar, Abdelkader Chaker: Fuzzy Logic Control of Fuel Cell System for Residential Power Generation. Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, Vol. 60, 328–334, No.6, 2009
- [35] M. Norgaard, O. Ravn, N. Poulsen et L. Hansen, Neural Networks for Modelling and Control of Dynamic Systems, Springer, London, 1st edition,2003.
- [36] M.Y. El-Sharkh, A. Rahman, M. S. Alam, P. C. Byrne, A. A. Sakla, et T. Thomas, «A dynamic model for a stand-alone PEM fuel cell power plant for residential applications, Journal of Power Sources, vol. 138, n° 1-2, novembre 2004, pp.199-204
- [37] J. C. Amphlett et al., Dynamic behavior of a PEM fuel cell stack for stationary applications, Int. J. Hydrogen Energy, vol. 26, pp. 625–629, 2001.
- [38] J. M. Corrêa, F.A. Farret, L.N. Canha et M. Godoy Simões, An electrochemical based fuel cell model suitable for electrical engineering automation approach, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 51, n° 5, octobre 2004, pp. 1103
- [39] Amel Lachichi Thèse : Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant - Application aux convertisseurs pour pile à combustible ». UNIVERSITE DE FRANCHECOMTE. 2005
- [40] R. Farkh, «COMMANDE PID DES SYSTEMES A RETARD »i. these,2011.
- [41] J. Silva, « PID controllers for Time-Delay Systems», Springer, 2005
- [42] C. Barrios, S. Niculescu, C. Morarescu, and K.Gu, «On the Fragility of PI Controllers for Time-Delay SISO Systems», 16th Mediterranean Conference on Control and Automation, pp.529- 534, 2008.
- [43] 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.
- [44] <https://instrumentationtools.com/pid-controllers>
- [45] <http://engineerexperiences.com/advantages-and-disadvantages.htm>
- [46] Chapitre _1_Introduction à l'Intelligence Artificielle GI 2020 M. Benbrahim
- [47] wikiversity, Les inconvénients des réseaux de neurone

[48] : wikiversity, domaine d'application ;

https://fr.wikiversity.org/wiki/R%C3%A9seaux_de_neurones/Points_faibles_et_limites

https://fr.wikiversity.org/wiki/R%C3%A9seaux_de_neurones/Applications_des_r%C3%A9seaux_de_neurones

[49] wikiversity, avantages des réseaux de neurone ;

[https://fr.wikiversity.org/wiki/R%C3%A9seaux_de_neurones/Avantages_et_possibilit%C3%](https://fr.wikiversity.org/wiki/R%C3%A9seaux_de_neurones/Avantages_et_possibilit%C3%A9s)

[50] livre de: Nicholas Locascio et Nikhil Buduma , Fundamentals of Deep Learning: Designing Next-Generation Machine Intelligence Algorithms; <https://books.google.dz>

[51] Claude Touzet LES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS INTRODUCTION AU CONNEXIONNISME

[52] http://www.touzet.org/Claude/Web-Fac-Claude/Les_reseaux_de_neurones_artificiels.pdf