

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Projet de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme
Master

Domaine : Sciences et Technologies Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Domaine : Sciences et Technologies Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique industriel

Thème

**Production et stockage d'hydrogène par
électrolyse de l'eau**

Présenter par :

- ❖ M. Sami FERSAOUI
- ❖ M. Oussama HAROUN

Encadré par :

M. N. MEBARKI

Soutenu le 18/06/2025 devant le jury composé de :

M. GHEDAMSI Kaci

Président

M. MEBARKI Nasser-eddine

Rapporteur

M. BABOURI Rabah

Examineur

Année universitaire 2024-2025

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



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 ()
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat*

Je soussigné,

Nom : FERSAOUI
Prénom : Sami
Matricule : 202033006356
Spécialité et/ou Option : Electromécanique
Département : Génie électrique
Faculté : Science et Technologie
Année universitaire : 2024/2025

et chargé de préparer un mémoire de (*Licence, Master, Autres à préciser*) : Master.

Intitulé : Production et stockage de l'hydrogène par électrolyse de l'eau.

Déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques,
méthodologiques,
et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique
requis dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
06/07/2025

FERSAOUI Sami
(*) Lu et approuvé

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



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 ()
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat*

Je soussigné,

Nom : HAROUN

Prénom : Oussama

Matricule : 202033007095

Spécialité et/ou Option : Electrotechnique, électrotechnique industriel

Département : Génie électrique

Faculté : Science et Technologie

Année universitaire : 2024/2025

et chargé de préparer un mémoire de (*Licence, Master, Autres à préciser*) : Master.

Intitulé : Production et stockage de l'hydrogène par électrolyse de l'eau.

Déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques,
méthodologiques,
et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique
requis dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
06/07/2025

HAROUN Oussama
(*) Lu et approuvé

Remerciements

Remerciement

Grace à dieu le tout puissant, qui m'a tracé la route et ma donnée le pouvoir et le courage de continuer jusqu'à la fin Avec un énorme plaisir et un cœur ouvert et une immense joie j'ai achevé la réalisation de ce modeste travail que je tien très chaleureusement à le dédier : Aux plus chers de mon cœur.

A ma chère mère et à mon cher père qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

A mes chères sœurs et frère qui ont toujours été là pour moi, avec leurs encouragements et leurs soutiens.

A mes amis et à toutes les personnes, qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Je remercie particulièrement mon encadreur, Mr MEBARKI, pour sa disponibilité, ses conseils précieux, sa rigueur scientifique et son accompagnement tout au long de ce travail. Son soutien a été d'une grande valeur.

Je tiens également à remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer mon travail.

Merci.

Oussama

Remerciement

*Avant tout, je rends grâce au **Bon Dieu** pour m'avoir donné la santé, la force, la patience et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma **profonde gratitude** à mes parents, ma chère sœur pour leur amour, leur soutien inconditionnel, leurs sacrifices et leurs prières, qui m'ont toujours porté et motivé dans les moments les plus difficiles.*

*Un grand merci également à **ma famille entière** et à **mes amis**, pour leur présence, leur encouragement et leur bienveillance tout au long de mon parcours.*

*Je remercie particulièrement **mon encadreur, Mr MEBARKI**, pour sa disponibilité, ses conseils précieux, sa rigueur scientifique et son accompagnement tout au long de ce travail. Son soutien a été d'une grande valeur.*

*Je tiens également à remercier **les membres du jury** pour avoir accepté d'évaluer mon travail.*

*À toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire, je dis un sincère **merci**.*

Merci à vous qui allez lire ce mémoire.

Sami FERSAOUI

Dédicace

*Je dédie ce travail à mes **chers parents**, qui représentent pour moi une source de tendresse et un exemple de dévouement, n'ayant jamais cessé de m'encourager et de prier pour moi.*

*Je le dédie également à **ma sœur**, à toute **ma famille**,
à mes **amis** et **collègues**,
à tous mes **enseignants** et **enseignantes** depuis le primaire,
ainsi qu'à toute âme modeste ayant soif de science et de savoir.*

Sami FERSAOUI

Dédicace

*Je dédie ce travail à mes **chers parents**, qui représentent pour moi une source de tendresse et un exemple de dévouement, n'ayant jamais cessé de m'encourager et de prier pour moi.*

*Je le dédie également **mes frères et mes sœurs**, à toute **ma famille**,
à mes **amis et collègues**,*

*à tous mes **enseignants et enseignantes** depuis le primaire,
ainsi qu'à toute âme modeste ayant soif de science et de savoir.*

Oussama HAROUN

Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

Introduction générale	1
I. Chapitre I :Généralités sur le stockage et la production d'hydrogène.	3
I.1 Introduction :	3
I.2 L'hydrogène :	3
I.3 Pour quoi l'hydrogène ?	3
I.4 Propriétés générales sur l'hydrogène :	4
I.5 Les avantages et défis liés à l'utilisation de l'hydrogène :	6
I.5.1 Avantage :	6
I.5.2 Défis :	6
I.6 Les applications industrielles et énergétiques de l'hydrogène :	7
I.7 Différentes méthodes de production d'hydrogène :	8
I.7.1 Vaporeformage du méthane (SMR - Steam Methane Reforming) :	8
I.7.2 Gazéification de la biomasse :	9
I.7.3 Oxydation partielle des hydrocarbures :	9
I.7.4 Décomposition thermique de l'eau (thermolyse) :	9
I.7.5 Production biologique (biohydrogène) :	10
I.7.6 Reformage à la vapeur de biométhane :	10
I.7.7 Électrolyse de l'eau :	10
I.8 Stockage de l'hydrogène :	11
I.8.1 Stockage par compression :	11
I.8.2 Stockage sous forme liquide :	12
I.8.3 Stockage sous forme solide :	13
I.9 Transport de l'hydrogène :	14
I.10 Conclusion :	15
II. Chapitre II :Modélisation du système de production d'hydrogène par électrolyse alimenté par énergies renouvelables	16
II.1 Introduction :	16
II.2 Présentation des sources d'énergies renouvelables :	16
II.2.1 Généralités sur les sources d'énergies renouvelables :	16
II.2.2 Les différents types des sources d'énergies renouvelables :	16
II.2.2.1 Energie solaire :	16
II.2.2.1.1 Energie solaire photovoltaïque :	17
II.2.2.1.1.1 Principe de fonctionnement :	17
II.2.2.1.1.2 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque :	17
II.2.2.1.1.3 Les types de Technologies Photovoltaïques :	18
II.2.2.1.1.4 Différents types de systèmes photovoltaïques :	19
II.2.2.1.1.5 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :	19
II.2.2.2 L'énergie éolienne :	20
II.2.2.2.1 Principe de fonctionnement de l'énergie éolienne :	20
II.2.2.2.2 Conversion de l'énergie éolienne en énergie mécanique puis électrique	21
II.2.2.2.3 Structure et composants principaux d'une éolienne :	22
II.2.2.2.4 Les différents types d'éoliennes :	22
II.2.2.2.4.1 Les éoliennes à axe horizontal :	22
II.2.2.2.4.2 Les éoliennes à axe vertical :	23

II.2.2.2.5	Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :	24
II.3	Modélisation du système étudié :	25
II.3.1	Présentation des composantes du système :	25
II.3.2	Architecture globale du système étudié :	25
II.3.2.1	Explication Détaillée du schéma :	26
II.3.2.1.1	Sources d'Énergie Renouvelable :	26
II.3.2.1.2	Conversion et Optimisation de l'Énergie :	26
II.3.2.1.3	Gestion de puissance :	26
II.3.2.1.4	Électrolyseur :	27
II.3.2.1.5	Stockage de l'Hydrogène (Réservoir) :	27
II.3.2.1.6	Charge :	27
II.3.3	Modèle d'une installation photovoltaïque avec une commande MPPT :	27
II.3.3.1	Modèle électrique du Module PV :	28
II.3.3.2	Calcul de la Puissance PV :	30
II.3.3.3	Algorithme MPPT – Perturb and Observe :	30
II.3.3.4	Contrôle par Régulateur PI :	32
II.3.3.5	Convertisseur Boost :	32
II.3.3.6	Filtrage LC :	32
II.3.4	Modélisation de la chaine de production éolienne :	33
II.3.4.1	Modélisation de la vitesse du vent :	34
II.3.4.2	Modélisation de la turbine :	34
II.3.4.3	Point de fonctionnement à puissance maximale :	36
II.3.4.4	Travail à réaliser :	37
II.3.4.5	Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents :	38
II.3.5	Modélisation d'un électrolyseur PEM :	41
II.3.6	Modélisation du réservoir d'hydrogène :	43
II.3.7	Les convertisseurs statiques :	43
II.3.7.1	Différents types de convertisseurs statiques :	44
II.3.7.1.1	Les convertisseurs statiques AC-DC (Les redresseurs) :	44
II.3.7.1.2	Les convertisseurs statiques DC-AC (Les onduleurs) :	45
II.3.7.1.3	Convertisseurs statiques DC-DC (Hacheurs) :	46
II.3.7.1.3.1	Convertisseur DC-DC Boost :	47
II.4	Conclusion :	49
III.	Chapitre III :Résultats de la simulation du système étudié	16
III.1	Introduction :	50
III.2	Simulation générale appliqué au système global de production et stockage d'hydrogène :	50
III.3	Description du modèle programme :	51
III.3.1	Sources de production d'énergie, photovoltaïque et éolienne :	51
III.3.2	Système de stockage et de conversion : électrolyseur, réservoir et pile à combustible :	53
III.3.3	Gestion des puissances :	54
III.4	Hypothèses de simulation :	56
III.4.1	Conditions environnementales :	56
III.4.1.1	Durée de la simulation :	56
III.4.1.2	Irradiation solaire :	57
III.4.1.3	Vitesse de vent :	57
III.4.1.4	Température ambiante et autres facteurs climatiques :	58
III.4.2	Hypothèses sur la charge :	58
III.4.3	Paramètres de simulation :	59

III.4.4	Hypothèses simplificatrices :	59
III.5	Résultats de simulation :	59
III.5.1	Puissance solaire générée :	59
III.5.2	Puissance éolienne générée :	61
III.5.3	Résultats de l'électrolyseur :	62
III.5.4	Comportement du réservoir d'hydrogène :	63
III.5.5	Résultats de la pile à combustible (PAC) :	64
III.5.6	Résultats de la gestion de puissance :	65
III.6	Conclusion :	66
IV.	Conclusion Générale	67

Liste des figures

Liste des figures du chapitre I

Figure I.1 : Production d' H_2 à partir de vaporeformage.....	8
Figure I.2 : production d' H_2 par gazéification de bois	9
Figure I.3 : production de biohydrogène par des procédés biotechnologiques.....	10
Figure I.4 : types d'électrolyse.....	11
Figure I.5 : stockage d'hydrogène cryo-comprimé.....	12
Figure I.6 : Schéma de structure d'un réservoir d'hydrogène liquide.....	13
Figure I.7 : Galette de stockage d'hydrogène solide.....	13
Figure I.8 : systèmes de stockage et déstockage intégrés dans un conteneur.....	14
Figure I.9 : Un réservoir adapté au transport d'hydrogène liquide.....	14

Liste des figures du chapitre II

Figure II.1 : Principe de la conversion photovoltaïque.....	18
Figure II.2 : fonctionnement d'une éolienne.....	21
Figure II.3 : éolienne à axe horizontal.....	23
Figure II.4 : éolienne à axe vertical.....	23
Figure II.5 : Bloc fonctionnelle global.....	25
Figure II.6 : générateur photovoltaïque proposé.....	28
Figure II.7 : schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	28
Figure II.8 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	29
Figure II.9 : Organigramme de l'algorithme de P&O.....	31
Figure II.10 : Programme utilisée.....	31
Figure II.11: schéma bloc de la commande MPPT.....	32
Figure II.12 : Schéma bloc d'une installation photovoltaïque avec une commande MPPT...	33
Figure II.13 : Schéma global de l'installation éolienne.....	34
Figure II.14 : Système de la turbine à modéliser.....	34
Figure II.15: Courbe $CP(\lambda)$	37
Figure II.16: Schéma bloc d'une turbine éolienne sans tenir compte de l'algorithme MPPT.....	37
Figure II.17: Schéma bloc d'une turbine éolienne en tenant compte de l'algorithme MPPT.....	37
Figure II.18: Structure de la génératrice synchrone.....	38

Liste des figures

Figure II.19: Développement des enroulements de la génératrice synchrone suivant le système d'axe (dq).....	39
Figure II.20 : Circuit équivalent pour un électrolyseur PEM unique.....	41
Figure II.21 : Redresseurs triphasés. (a) P3. (b) PD3.....	44
Figure II.22 : Formes d'ondes des différentes grandeurs d'un redresseur P3 toutes diodes.....	45
Figure II.23 : Schéma de principe de la conversion continu– alternative (DC/AC).....	45
Figure II.24 : Circuit de puissance d'un onduleur triphasé.....	46
Figure II.25 : Schéma de base d'un convertisseur boost.....	47
Figure II.26 : Schéma équivalent du Boost avec K fermé.....	47
Figure II.27 : Schéma équivalent du Boost avec K ouverte.....	48

Liste des figures du chapitre III

Figure III.1 : Schéma globale de simulation.....	51
Figure III.2 : Schéma bloc de système photovoltaïque avec MPPT.....	52
Figure III.3 : Schéma bloc de système éolienne.....	52
Figure III.4 : Schéma bloc d'un électrolyseur.....	53
Figure III.5 : Schéma bloc d'un réservoir d'hydrogène.....	53
Figure III.6 : Schéma bloc d'une pile à combustible.....	54
Figure III.7 : organigramme de la gestion des puissances.....	54
Figure III.8 : schéma bloc de la gestion de puissance.....	56
Figure III.9 : Nombre de radiations (W/m^2).....	57
Figure III.10: vitesse de ven.....	58
Figure III.11 : Puissance demander.....	58
Figure III.12 : Tension générée par le système photovoltaïque.....	60
Figure III.13 : Puissance instantanée délivrée par le système photovoltaïque.....	60
Figure III.14 : Tension générée par le système éolienne.....	61
Figure III.15 : puissance générée par le système éolienne.....	61
Figure III.16 : la puissance fournie à l'électrolyseur.....	62
Figure III.17 : quantité d' H_2 produite par l'électrolyseur.....	62
Figure III.18 : quantité d' H_2 dans le réservoir.....	63
Figure III.19 : quantité d' H_2 fournit à la pile	64
Figure III.20 : Puissance générée par la pile.....	64

Figure III.21 : les puissances de système simulée.....	65
--	----

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Principales caractéristiques chimiques et physiques de l'hydrogène.....	5
Tableau II.1 : composantes du système.....	25

Liste des symboles

Nomenclature

- DC – DC** : Conversion continue / continue
- DC – AC** : Conversion continue / alternatif
- MLI** : Signal à modulation de largeur d'impulsion
- PV** : Photovoltaïque
- MPPT** : Maximum power point tracking
- PI** : Proportional et integral
- CC** : Courant continu
- CA** : Courant alternatif
- P_{ch}** : La puissance demandée par la charge [W]
- P_{PV}** : La puissance produite par le photovoltaïque [W]
- P_{eol}** : La puissance produite par l'éolienne [W]
- H_2** : La quantité d'hydrogène disponible dans le réservoir [L]
- L** : Inductance [H]
- I_{pv}** : Courant fourni par le générateur photovoltaïque [A]
- I_{eol}** : Courant fourni par le système éolien [A]
- I** : Courant délivré par la cellule solaire
- I_{ph}** : Le photo-courant
- E_{ref}** : Ensoleillement dans les conditions standard
- E_s** : Ensoleillement instantané mesuré pendant la journée [w/m²]
- T_{jref}** : Température dans la condition standard
- T_j** : Température instantanée pendant la journée (K)
- P_1, P_2, P_3** : Paramètres constantes
- I_d** : Le courant de polarisation d'une diode
- I_0** : Courant de saturation de la diode [A].
- V_{PV}** : Tension aux bornes de la diode [V].
- R_s** : La résistance série[Ω].
- q** : Charge d'électron [C]
- D** : Diode
- A** : Facteur d'idéalité de la diode
- K** : Constante de Boltzmann (1.38×10^{-3} j/K)
- n_s** : Nombre de cellule en série dans un module

Nomenclature

- I_0 : Le courant de saturation il est fortement dépendant de la température
- E_g : Energie de gap pour le silicium cristalline 1.12 ev
- I_{Rsh} : Le courant parcourue la résistance Rsh
- R_{sh} : Résistance shunt[Ω]
- Ω_t : Vitesse de la turbine éolienne [m/s]
- R_t : Rayon de la turbine éolienne
- P_t Puissance de la turbine éolienne, elle est donnée par la relation suivante $P_t = T_t \Omega_t$
- S_t : Surface balayée par la turbine éolienne
- ρ : Masse volumique de l'air
- T_t : Couple de la turbine éolienne
- G : Le gain du multiplicateur
- T_{em} : Le couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone
- Ω : La vitesse mécanique de la génératrice
- Ω_t : La vitesse de la turbine [rad/s]
- T_t : Le couple développé par la turbine sous l'action du vent [N.m]
- J : Inertie totale de l'arbre de transmission [kg.m²]
- F : Coefficient de frottement dynamique
- $V_{sa, sb, sc}$: Les tensions des phases statoriques
- $I_{sa, sb, sc}$: Les courants statoriques
- R_s : La résistance des phases statoriques
- $\Phi_{sa, sb, sc}$: Les flux totaux à travers les bobines statoriques
- $P(\theta)$: Matrice de Park
- $I_{sd, sq}$: Courants statoriques dans le repère de Park [A]
- $V_{sd, sq}$: Tensions statoriques dans le repère de Park [V]
- L_s : Inductance cyclique statorique [H]
- R_s : Résistance statorique [ohms]
- Φ_f : Flux inducteur crée par les aimants permanents
- P_b : est la pression du réservoir mesurée en pascals (Pa)
- P_{bi} : La pression initiale du réservoir de stockage (Pa)
- R : La constante universelle des gaz parfait (J/kmol · K)
- T_b : La température de fonctionnement (K)
- V_b : Le volume du réservoir (m³)
- T : La température

Nomenclature

Z : Est le facteur de compressibilité en fonction de la pression

I_{\min} : représente la valeur minimale du courant dans l'inductance

I_{\max} : Courant maximale dans l'inductance

Introduction Générale

Introduction générale :

Dans un contexte mondial marqué par la transition énergétique et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre, l'hydrogène apparaît comme un vecteur énergétique prometteur. Grâce à ses propriétés énergétiques remarquables et à son potentiel en tant que solution propre et durable, il constitue une alternative crédible aux combustibles fossiles dans divers secteurs industriels et de transport. Cependant, son déploiement à grande échelle reste conditionné par des défis majeurs liés à sa production et à son stockage, notamment en termes de rendement énergétique, de sécurité et de faisabilité économique. [01]

Parmi les différentes méthodes de production, l'électrolyse de l'eau s'impose comme l'une des solutions les plus attractives pour obtenir un hydrogène propre, à condition d'être alimentée par des sources d'énergie renouvelable. Ce procédé repose sur la décomposition de l'eau en hydrogène et oxygène sous l'effet d'un courant électrique, permettant ainsi d'éviter les émissions de CO₂ associées aux méthodes conventionnelles. Cependant, son efficacité dépend de plusieurs facteurs, notamment la nature des électrolytes, la conception des électrodes et les conditions opératoires. [02]

Le stockage de l'hydrogène constitue également un enjeu majeur pour son intégration dans les systèmes énergétiques. Différentes stratégies existent, telles que le stockage sous forme gazeuse à haute pression, sous forme liquide à très basse température ou encore via des matériaux solides capables d'absorber et de relâcher l'hydrogène de manière contrôlée. Chaque méthode présente des avantages et des limites en termes de densité énergétique, de coût et de sécurité, nécessitant des études approfondies pour identifier les solutions les plus optimales en fonction des applications visées.

Ce travail de recherche s'inscrit dans cette problématique en proposant une étude approfondie sur la production et le stockage de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Il se structure en trois parties principales : la première partie présente les généralités sur le stockage de l'hydrogène, en mettant en évidence les technologies existantes et leurs performances. La deuxième partie est consacrée à la modélisation du système étudié, permettant d'analyser les paramètres influençant la production et le stockage de l'hydrogène. Enfin, la dernière partie expose les résultats obtenus et leur interprétation, dans le but d'optimiser les performances du système étudié et d'identifier des perspectives d'amélioration.

À travers cette étude, nous cherchons à contribuer au développement de solutions innovantes et durables pour la production et le stockage de l'hydrogène, en vue de favoriser son intégration dans les systèmes énergétiques futurs.

***Chapitre I :Généralités sur le stockage et la
production d'hydrogène.***

I.1 Introduction :

L'hydrogène, souvent qualifié de "vecteur énergétique du futur", occupe une place centrale dans les discussions sur la transition énergétique. Sa capacité à stocker et à transporter de l'énergie, sans émettre de gaz à effet de serre lors de son utilisation, en fait un atout majeur pour décarboner des secteurs comme l'industrie, les transports et le chauffage. Cependant, pour exploiter pleinement son potentiel, deux aspects fondamentaux doivent être maîtrisés : sa production et son stockage.

La production d'hydrogène, en particulier par l'électrolyse de l'eau utilisant des sources d'énergie renouvelables, constitue une solution prometteuse pour favoriser une économie à faible empreinte carbone. Parallèlement, le stockage de l'hydrogène, qu'il soit sous forme gazeuse, liquide ou solide, pose des défis techniques en raison de ses propriétés uniques, comme sa faible densité énergétique et sa volatilité [02]. Ces enjeux sont au cœur des recherches actuelles et conditionnent l'intégration de l'hydrogène dans nos systèmes énergétiques.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les généralités sur le stockage et la production d'hydrogène. Nous aborderons les principales méthodes de production, les technologies de stockage disponibles, ainsi que les défis et perspectives associés. Ce chapitre servira de base pour comprendre le rôle de l'hydrogène dans la transition énergétique et les avancées nécessaires pour en faire une solution viable à grande échelle.

I.2 L'hydrogène :

L'hydrogène est un vecteur énergétique propre et polyvalent, considéré comme une alternative prometteuse aux combustibles fossiles en raison de son potentiel à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Il peut être produit à partir de diverses sources, y compris les énergies renouvelables via l'électrolyse de l'eau, et son stockage représente un défi technologique majeur pour son intégration efficace dans les systèmes énergétiques. [03]

I.3 Pourquoi l'hydrogène ?

L'hydrogène est considéré comme l'une des solutions les plus appropriées de notre époque, notamment aux défis de la rareté de l'énergie et de la réduction de la pollution.

L'hydrogène est un vecteur d'énergie (comme l'électricité) et non une source d'énergie essentielle. L'utilisation d'un vecteur énergétique propre tel que l'hydrogène (s'il est produit à partir de sources non fossiles) offre de nombreux avantages à plusieurs niveaux. L'hydrogène a le potentiel de remplacer les combustibles fossiles dans différentes utilisations (mobiles,

fixes ou portables, et il a prouvé son importance dans la production d'énergie en tant que combustible renouvelable. [01]

I.4 Propriétés générales sur l'hydrogène :

L'hydrogène, symbolisé par « H », est le premier élément du tableau périodique. Identifié au XVIII^e siècle par le chimiste anglais Henry Cavendish, il a été nommé « hydrogène » en 1783 par Antoine Lavoisier pour remplacer l'ancienne dénomination « air inflammable ». Ce terme, d'origine grecque (*hydro* = eau, *gène* = générateur), signifie « générateur d'eau », en référence à la découverte de Cavendish : la combinaison de l'hydrogène et de l'oxygène produit de l'eau, une réaction clé en chimie.

L'hydrogène est le principal constituant du Soleil et est présent en abondance dans les étoiles et les planètes gazeuses. Sur Terre, la source la plus courante d'hydrogène est l'eau, dont la molécule (H₂O) est composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène. Bien qu'il soit situé dans la colonne des métaux alcalins du tableau périodique, l'hydrogène, étant gazeux à l'état naturel, n'est pas considéré comme un métal en chimie. [04]

Parmi les atouts qui positionnent l'hydrogène comme un vecteur énergétique d'avenir, on peut citer :

- Un métal (i.e. cristallise et forme des liaisons métalliques) solide à basse température (< 14K) [05].
- Le plus petit est le plus abondant de l'univers, (la 9^{ème} place sur la Terre et le 2^{ème} dans les océans) [06].
- Élément chimique simple, léger (plus que l'air), stable, peu réactif à température ambiante.
- Facile à transporter, il représente une faible densité écologique.
- Peut être produit en quantités presque illimitées. L'hydrogène est un gaz très volatil, incolore, inodore, insipide et non-polluant. Du fait de sa légèreté et sa diffusivité élevée, il présentera moins de risques d'accumulation qu'un gaz « lourd » comme le gaz naturel (rappelons que la limite d'inflammabilité est de 4% en volume dans l'air). [7,8]

Chapitre I : Généralités sur le stockage et la production d'hydrogène.

Propriété	Valeur numérique
Masse atomique	1,0079 g/mol
Température de solidification	14 K
Température d'ébullition	20,3 K
Température critique	33,3 K
Densité gazeuse à 20,3K	1,34 kg/Nm ³
Densité gazeuse à 273K	0,08988 kg/Nm ³
Densité liquide à 20,3K	70,79 kg/m ³
Pouvoir calorifique inférieur (PCI)	120 MJ/kg
Pouvoir calorifique supérieur (PCS)	142 MJ/kg
Energie d'évaporation	445 kJ/kg
Energie théorique de liquéfaction	14112 kJ/kg
Chaleur spécifique Cp	14,3 kJ/kg K
Chaleur spécifique Cv	10,3 kJ/kg K
Température d'auto inflammation dans l'air	858 K
Température de flamme dans l'air à 300K	2318 K
Limites d'inflammabilité dans l'air	4 – 75 (% vol)
Limites de détonation dans l'air	13 – 65 (% vol)
Energie d'inflammation	0,020 mJ
Electronégativité (Pauling)	2,1
Coefficient de diffusion dans l'air	0,61 cm/s
Vitesse de flamme dans l'air	260 cm/s
Vitesse de détonation dans l'air	2,0 km/s

Tableau I.1 : Principales caractéristiques chimiques et physiques de l'hydrogène [04]

I.5 Les avantages et défis liés à l'utilisation de l'hydrogène :

I.5.1 Avantage :

- 1. Stockage d'énergie à haute densité :** L'hydrogène possède une densité énergétique massique élevée (environ 120 MJ/kg), ce qui en fait un vecteur énergétique efficace pour le stockage et le transport d'énergie. [02]
- 2. Polyvalence d'utilisation :** L'hydrogène peut être utilisé dans divers secteurs, notamment les transports (véhicules à pile à combustible), l'industrie (production d'ammoniac, raffinage) et le stockage d'énergie renouvelable. [05]
- 3. Énergie propre :** Lorsqu'il est produit par électrolyse de l'eau utilisant de l'électricité renouvelable (hydrogène vert), son utilisation ne génère que de l'eau, sans émissions de CO₂. [07]
- 4. Stockage à long terme :** L'hydrogène permet de stocker de grandes quantités d'énergie sur de longues périodes, ce qui est crucial pour pallier l'intermittence des énergies renouvelables. [08]
- 5. Amélioration des matériaux de stockage :** Des recherches récentes montrent que l'ajout de nano composites (comme FeB/CNTs) ou de métaux de transition (comme le titane ou le nickel) améliore les propriétés de stockage d'hydrogène dans des matériaux comme le MgH₂, augmentant ainsi leur efficacité. [4, 6]

I.5.2 Défis :

- 1. Production coûteuse et énergivore :** La production d'hydrogène vert par électrolyse reste coûteuse et nécessite des quantités importantes d'énergie renouvelable. La majorité de l'hydrogène produit aujourd'hui provient encore de sources fossiles (hydrogène gris), ce qui limite ses avantages environnementaux. [05]
- 2. Stockage et transport difficiles :** L'hydrogène a une faible densité énergétique volumique, ce qui rend son stockage et son transport complexes. Il nécessite des conditions spécifiques, comme une compression à haute pression (700 bar), une liquéfaction à très basse température (-253 °C), ou l'utilisation de matériaux absorbants. [2, 7]

3. **Infrastructures limitées :** Le déploiement de l'hydrogène à grande échelle nécessite des infrastructures dédiées (stations de recharge, pipelines, etc.), qui sont encore peu développées et coûteuses à mettre en place. [05]
4. **Sécurité et risques :** L'hydrogène est hautement inflammable et nécessite des précautions strictes pour son stockage et son utilisation, ce qui peut limiter son adoption dans certaines applications. [07]
5. **Efficacité des matériaux de stockage :** Bien que des progrès aient été réalisés avec des matériaux comme le MgH_2 et les nano composites, les technologies de stockage solide de l'hydrogène doivent encore être optimisées pour atteindre des performances suffisantes en termes de capacité, de cinétique et de cyclabilité. [4, 6, 8]

I.6 Les applications industrielles et énergétiques de l'hydrogène :

L'hydrogène est une ressource énergétique et industrielle polyvalente qui joue un rôle clé dans la transition énergétique mondiale. Son utilisation couvre plusieurs domaines, notamment :

- **Industrie chimique :** L'hydrogène est un réactif essentiel dans la production d'ammoniac pour les engrais, via le procédé Haber-Bosch, et dans le raffinage du pétrole pour la désulfuration des hydrocarbures.
- **Production d'électricité et stockage d'énergie :** L'hydrogène peut être utilisé dans les piles à combustible pour produire de l'électricité avec une efficacité élevée et sans émissions de CO_2 . Il permet également le stockage de l'énergie intermittente produite par les sources renouvelables.
- **Mobilité et transport :** L'hydrogène alimente des véhicules équipés de piles à combustible, offrant une alternative aux carburants fossiles pour les transports terrestres, maritimes et aériens.
- **Industrie sidérurgique et métallurgique :** Il est utilisé pour la réduction directe du minerai de fer, remplaçant le charbon dans les hauts-fourneaux et réduisant ainsi les émissions de CO_2 .
- **Secteur spatial et aéronautique :** L'hydrogène liquide est utilisé comme carburant dans les lanceurs spatiaux en raison de son rapport énergétique très élevé.

I.7 Différentes méthodes de production d'hydrogène :

Aujourd'hui, la demande en hydrogène est en pleine croissance pour répondre aux nouveaux besoins énergétiques. Il peut être produit de différentes manières, mais la majorité de l'hydrogène disponible provient encore du reformage des hydrocarbures.

Le choix de la méthode de production dépend de plusieurs facteurs, comme la disponibilité des ressources énergétiques, le niveau de pureté recherché, ou encore les contraintes environnementales. Les principales méthodes de production sont les suivantes :

I.7.1 Vaporeformage du méthane (SMR - Steam Methane Reforming) :

Le vaporeformage du méthane est la méthode la plus courante pour produire de l'hydrogène à partir du gaz naturel. Ce procédé repose sur la réaction du méthane avec la vapeur d'eau à haute température (700-1000 °C) en présence d'un catalyseur de nickel, produisant de l'hydrogène et du monoxyde de carbone. Une oxydation ultérieure du monoxyde de carbone avec de la vapeur d'eau permet de maximiser la production d'hydrogène. Bien que ce procédé soit efficace, il génère du CO₂, nécessitant des solutions de captage et stockage du carbone pour réduire son impact environnemental.

Production d'H₂ à partir de vaporeformage

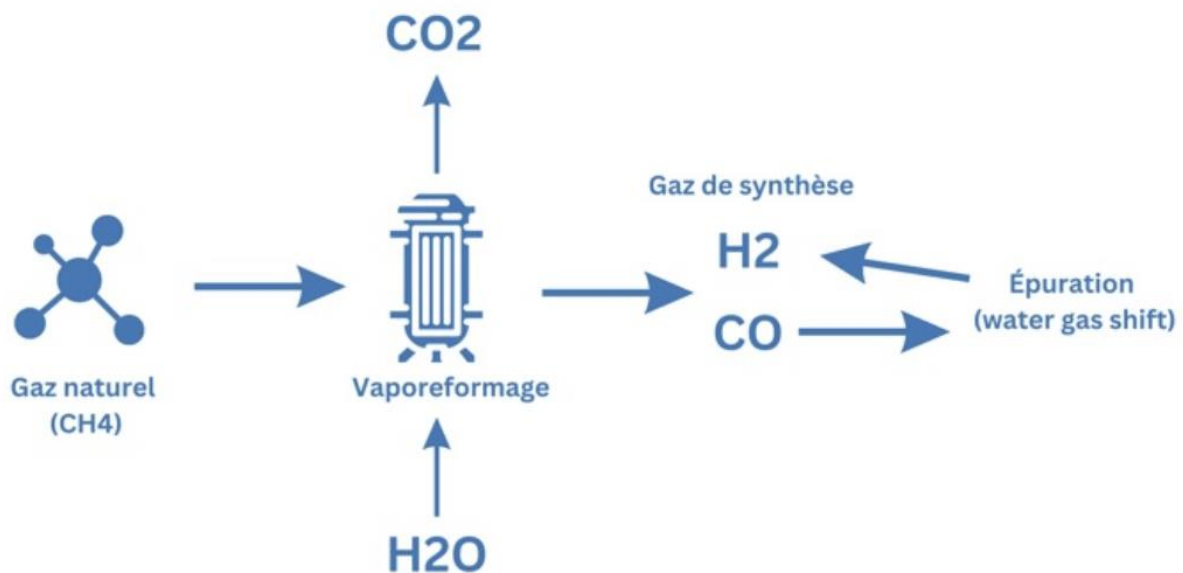


Figure I.1 : Production d'H₂ à partir de vaporeformage [02]

I.7.2 Gazéification de la biomasse :

Ce procédé permet de produire de l'hydrogène à partir de matières organiques renouvelables telles que le bois, les déchets agricoles et les résidus forestiers. La biomasse est chauffée à haute température (700-1000 °C) en présence d'un agent oxydant (air, oxygène ou vapeur d'eau), formant un gaz de synthèse riche en hydrogène, monoxyde de carbone et dioxyde de carbone. Ce gaz peut ensuite être purifié pour extraire l'hydrogène.

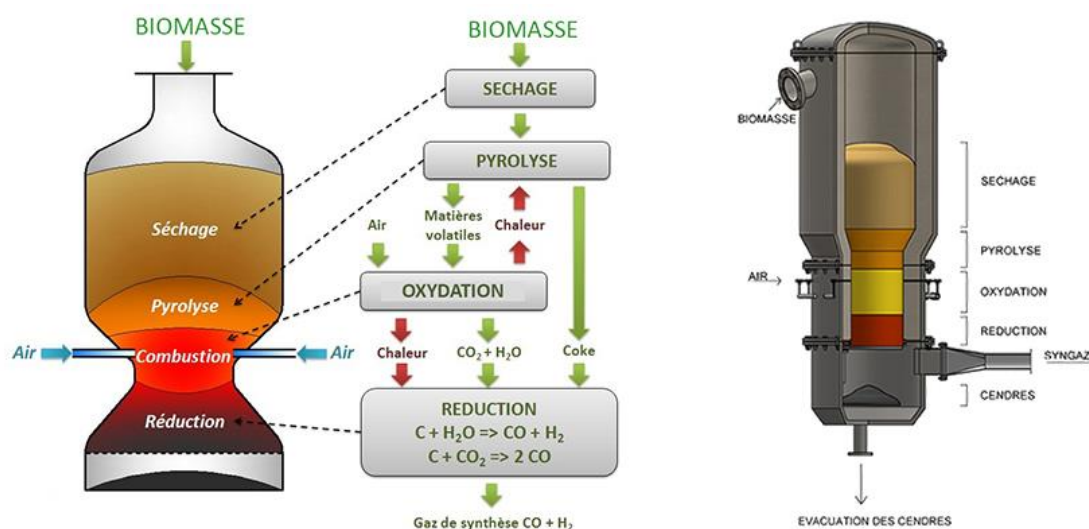


Figure I.2 : production d'H₂ par gazéification de bois [02]

I.7.3 Oxydation partielle des hydrocarbures :

Cette méthode implique la combustion partielle d'hydrocarbures lourds (charbon, pétrole, gaz naturel) en présence d'une quantité limitée d'oxygène. La réaction produit un mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène. L'hydrogène est ensuite extrait par conversion du CO avec de la vapeur d'eau. Cette technique est utilisée dans l'industrie pétrochimique mais reste plus coûteuse et polluante que le vaporeformage.

I.7.4 Décomposition thermique de l'eau (thermolyse) :

La thermolyse de l'eau consiste à décomposer directement l'eau en hydrogène et oxygène par une chaleur extrême supérieure à 2000 °C. Ce procédé est très gourmand en énergie et requiert des matériaux résistants aux hautes températures, ce qui limite son application industrielle actuelle. Toutefois, couplé à des sources d'énergie renouvelables comme l'énergie solaire concentrée, il pourrait devenir une solution décarbonée viable.

I.7.5 Production biologique (biohydrogène) :

Certaines bactéries et microalgues sont capables de produire de l'hydrogène par fermentation ou photosynthèse. Dans la fermentation sombre, des microorganismes dégradent des matières organiques en conditions anaérobies pour produire de l'hydrogène et des sous-produits comme l'acide acétique. La photosynthèse microbienne, quant à elle, repose sur des cyanobactéries et des microalgues capables de générer de l'hydrogène sous l'effet de la lumière. Cette technologie est encore en phase de recherche et développement.

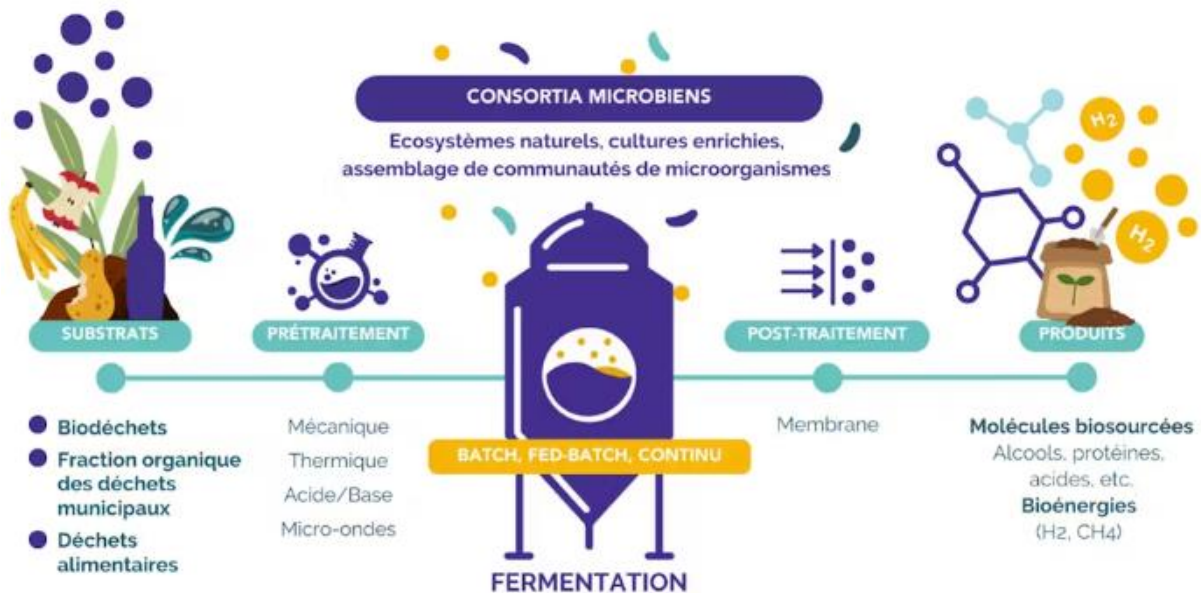


Figure I.3 : production de biohydrogène par des procédés biotechnologiques [02]

I.7.6 Reformage à la vapeur de biométhane :

Cette méthode est similaire au vaporeformage du méthane mais utilise du biométhane issu de la fermentation anaérobie des déchets organiques. Le procédé permet une production d'hydrogène plus durable car il valorise des ressources renouvelables tout en réduisant les émissions nettes de CO_2 .

I.7.7 Électrolyse de l'eau :

L'électrolyse consiste à décomposer l'eau en hydrogène et oxygène à l'aide d'un courant électrique. Ce procédé, lorsqu'il est alimenté par des énergies renouvelables, permet une production d'hydrogène totalement décarbonée. Il existe plusieurs types d'électrolyseurs (alcalin, PEM, SOEC) offrant différents rendements et applications industrielles. L'électrolyse est considérée comme une solution prometteuse pour la production massive d'hydrogène vert.

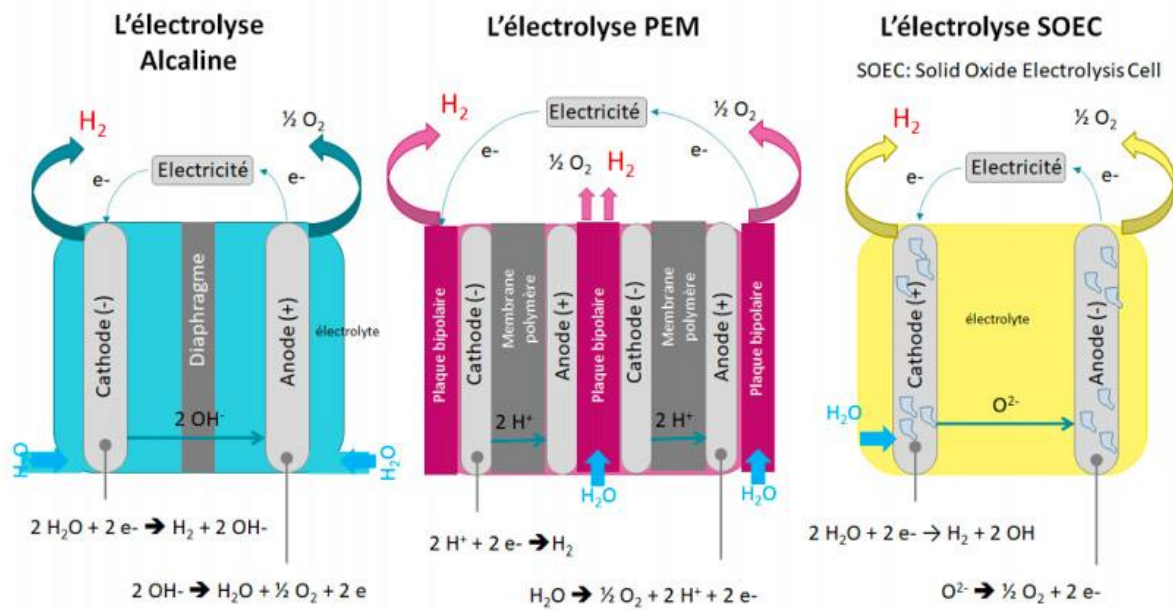


Figure I.4 : types d'électrolyse [02]

I.8 Stockage de l'hydrogène :

Les techniques de stockage utilisées dans le cas des gaz naturels et industriels, peuvent être envisagées pour celui de l'hydrogène. Ces techniques consistent d'une part, en la liquéfaction de l'hydrogène en vue d'un stockage dans des réservoirs cryogéniques et, d'autre part en la compression de l'hydrogène en vue d'un stockage à haute pression. Une autre solution consiste à utiliser le phénomène d'adsorption de matériaux poreux carbonés ou d'hydrures métalliques pour contenir l'hydrogène [09].

I.8.1 Stockage par compression :

Le stockage par compression est le procédé par lequel le gaz est conservé, pressurisé dans des réservoirs plus ou moins robustes. Ce procédé est plus aisé à mettre en œuvre que le stockage par liquéfaction, toutefois la densité de l'hydrogène obtenue reste très inférieure de celle de l'hydrogène liquide.

Pour optimiser la quantité d'énergie stockée par unité de volume, il est essentiel d'augmenter la pression de stockage de l'hydrogène. Toutefois, une pression plus élevée entraîne une contrainte mécanique plus importante sur le réservoir, nécessitant une structure plus robuste et donc plus lourde. Cela limite la quantité supplémentaire d'hydrogène pouvant être stockée, posant un défi en matière d'efficacité et de conception des réservoirs.

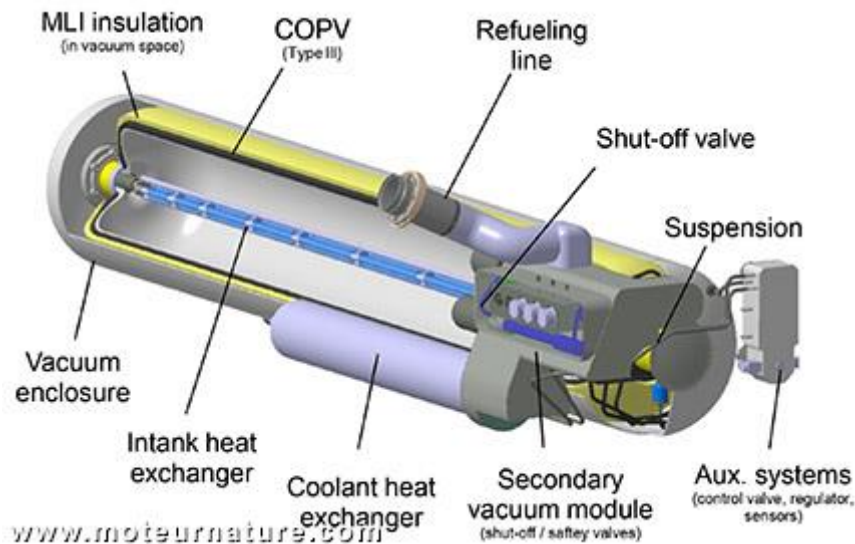


Figure I.5 : stockage d'hydrogène cryo-comprimé [04]

I.8.2 Stockage sous forme liquide :

Le stockage de l'hydrogène sous forme liquide repose sur sa liquéfaction, qui exploite la grande différence de densité entre les états gazeux et liquide à très basse température. À une pression proche de l'atmosphérique, l'hydrogène est refroidi jusqu'à 20 K (-253 °C), une technologie bien maîtrisée, notamment pour les applications spatiales et le stockage stationnaire [10].

Ce mode de stockage offre une capacité volumique élevée et nécessite moins d'espace qu'un réservoir sous pression, avec un remplissage facilité grâce à des infrastructures adaptées. Cependant, la très basse température constitue un défi majeur, nécessitant une isolation thermique performante, ce qui le rend plus adapté aux installations fixes qu'aux applications mobiles. En effet, dans un véhicule, les contraintes d'isolation entraînent une évaporation progressive de l'hydrogène, obligeant à libérer du gaz pour éviter une montée excessive de pression. Une solution envisagée consiste à l'intégrer dans des systèmes hybrides combinant hydrogène et carburants classiques pour optimiser son utilisation lors des longs trajets [11].

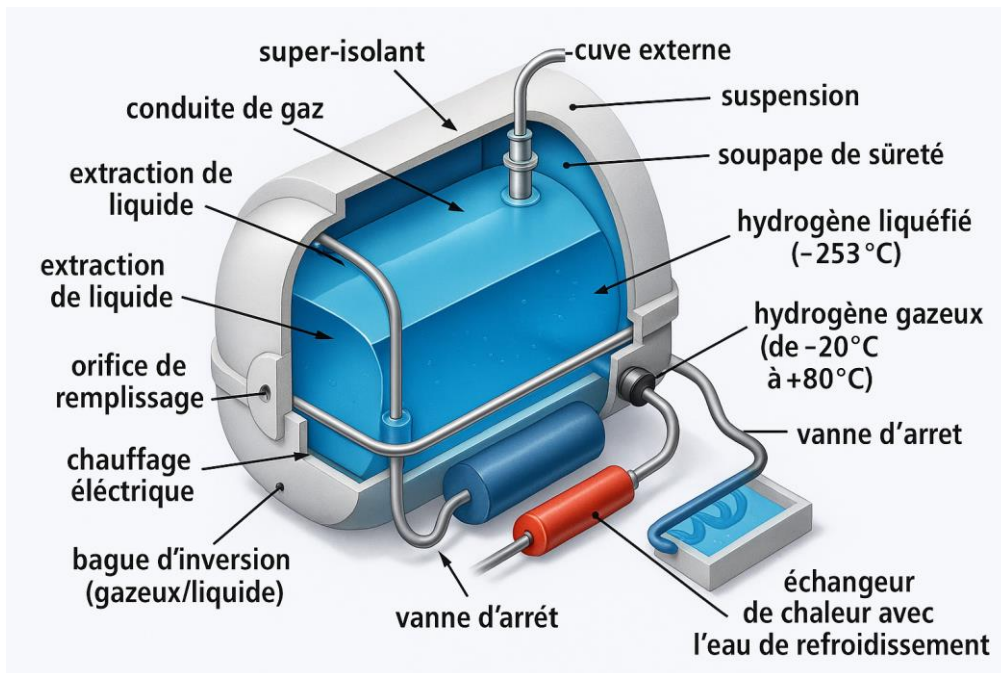


Figure I.6 : Schéma de structure d'un réservoir d'hydrogène liquide [04]

I.8.3 Stockage sous forme solide :

Le stockage de l'hydrogène sous forme solide est une alternative plus sécurisée que la compression ou la liquéfaction.

Il s'effectue à des pressions modérées d'environ 5 bars et à température ambiante, tout en atteignant des densités comparables à l'hydrogène liquide. Ce stockage repose sur deux mécanismes : l'adsorption physique et l'absorption chimique. L'adsorption physique, ou physisorption, utilise les forces de Van der Waals pour fixer l'hydrogène à la surface d'un matériau solide, un phénomène favorisé par une pression élevée et une température basse.

Cette technique est particulièrement efficace avec des matériaux nanostructures comme les nanotubes ou nanofibres de carbone.



Figure I.7 : Galette de stockage d'hydrogène solide [04]

I.9 Transport de l'hydrogène :

Une fois généré, l'hydrogène nécessite d'être acheminé et distribué vers les sites où il sera utilisé. Les méthodes de transport dépendent de son état, qu'il soit sous forme gazeuse ou liquide. Lorsqu'il est liquéfié, il peut être transporté par voie routière. De nombreuses recherches indiquent que le transport de l'hydrogène ne présente pas plus de difficultés que celui du gaz naturel.

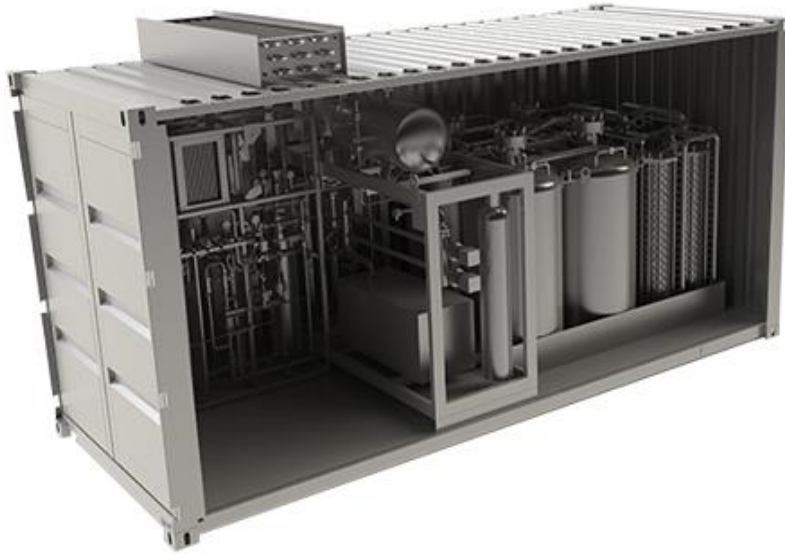


Figure I.8 : systèmes de stockage et déstockage intégrés dans un conteneur [04]



Figure I.9 : Un réservoir adapté au transport d'hydrogène liquide [04]

I.10 Conclusion :

En conclusion, ce chapitre a permis de dresser un panorama des principes fondamentaux liés à la production et au stockage de l'hydrogène. Nous avons abordé les différentes méthodes de production, qu'elles soient conventionnelles ou émergentes, mettant en lumière leur importance dans la transition énergétique. De même, les solutions de stockage, qu'elles soient sous forme gazeuse, liquide ou via des matériaux solides, ont été explorées, soulignant leur rôle crucial pour assurer une gestion efficace et sécurisée de l'hydrogène. Ces éléments posent les fondements nécessaires pour appréhender les défis et les opportunités associés à l'hydrogène, ouvrant la voie à des applications innovantes dans des domaines variés tels que l'industrie, les transports et la production d'énergie propre.

***Chapitre II :Modélisation du système de
production d'hydrogène par électrolyse
alimenté par énergies renouvelables***

II.1 Introduction :

L'hydrogène vert, produit par électrolyse de l'eau alimentée par des énergies renouvelables, constitue une solution clé pour la transition énergétique grâce à son bilan carbone neutre, contrairement aux méthodes conventionnelles comme le vaporeformage du gaz naturel. Ce chapitre étudie la modélisation d'un système hybride combinant les énergies solaire et éolienne, dont la complémentarité permet d'optimiser la production d'électricité tant sur le plan technique qu'économique. Après avoir présenté les caractéristiques de ces sources renouvelables et les différentes architectures des systèmes hybrides, nous nous concentrons sur la modélisation de l'électrolyseur et l'optimisation du couplage énergétique. L'objectif est d'établir un cadre théorique maximisant l'efficacité tout en minimisant les coûts, grâce à des outils de simulation avancés et des critères de performance rigoureux.

II.2 Présentation des sources d'énergies renouvelables :

II.2.1 Généralités sur les sources d'énergies renouvelables :

Les énergies renouvelables constituent des sources d'énergie propres, durables et inépuisables, offrant une alternative essentielle aux énergies fossiles. Issues de ressources naturelles comme le soleil, le vent et l'eau, elles génèrent significativement moins d'émissions de CO₂ et présentent un impact environnemental moindre. Leur adoption croissante à l'échelle mondiale témoigne d'une transition énergétique désormais bien engagée.

II.2.2 Les différents types des sources d'énergies renouvelables :

II.2.2.1 Energie solaire :

Le rayonnement solaire constitue une ressource énergétique inépuisable, avec un potentiel estimé à environ 8 400 fois la consommation énergétique mondiale annuelle (IEA, 2021). Cette énergie se répartit sur l'ensemble du spectre électromagnétique (ultraviolet à infrarouge) avec une intensité moyenne de 1 kW/m² (kilowatt-crête par mètre carré) au niveau de la surface terrestre. Selon la même étude, les zones désertiques reçoivent effectivement en six heures un apport énergétique supérieur aux besoins annuels de l'humanité [12]

L'énergie solaire est générée par la conversion du rayonnement solaire, exploitable selon deux principaux procédés : les panneaux photovoltaïques transforment directement la lumière en électricité grâce à l'effet photoélectrique, tandis que les capteurs thermiques utilisent l'énergie calorifique du soleil pour chauffer des fluides, principalement à destination des systèmes d'eau chaude sanitaire

- ✓ L'énergie solaire thermique
- ✓ L'énergie solaire photovoltaïque

✓ L'énergie solaire passive

II.2.2.1.1 Energie solaire photovoltaïque :

II.2.2.1.1.1 Principe de fonctionnement :

L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement la lumière du soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque dans des matériaux semi-conducteurs comme le silicium. Lorsque les photons solaires frappent la cellule PV, ils libèrent des électrons dans le matériau. La jonction PN (composée d'une couche dopée négativement et d'une couche dopée positivement) sépare ensuite ces charges électriques, créant un champ électrique qui génère un courant continu est ainsi directement utilisable. Ce processus, qui ne nécessite aucune pièce mobile, permet aux systèmes photovoltaïques modernes d'atteindre des rendements de 15% à 22% selon l'AIE (2021), avec des applications allant des petits dispositifs domestiques aux grandes centrales solaires. [12]

- Dans un isolant électrique : Les électrons restent fermement liés aux atomes et ne peuvent pas circuler, bloquant ainsi tout courant électrique.
- Dans un conducteur électrique (un fil de cuivre par exemple) : Les électrons se déplacent librement, permettant un passage aisé du courant électrique.
- Dans un semi-conducteur (cas des cellules photovoltaïques) : les électrons nécessitent un apport d'énergie pour se libérer
 - Les photons lumineux fournissant l'énergie nécessaire
 - Cette énergie libère les électrons de leurs atomes
 - Résultat : apparition d'un courant électrique sous exposition lumineuse

Ce phénomène fondamental, appelé effet photovoltaïque, constitue la base physique de la conversion lumière-électricité dans les panneaux solaires.

II.2.2.1.1.2 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque convertit directement la lumière en électricité grâce à une jonction entre deux zones dopées différemment (type n, riche en électrons, et type p, riche en "trous"). À leur contact, un champ électrique interne se forme. Sous l'effet de la lumière, les photons excitent les électrons, créant des paires électron-trou. Le champ électrique sépare ces charges, envoyant les électrons vers la zone n et les trous vers la zone p. En reliant des contacts métalliques aux deux zones, une tension apparaît, générant un courant électrique dans un circuit. Ce principe, optimisé dans les cellules modernes, permet la production d'électricité solaire, avec un rendement dépendant de l'intensité lumineuse et des propriétés du semi-conducteur

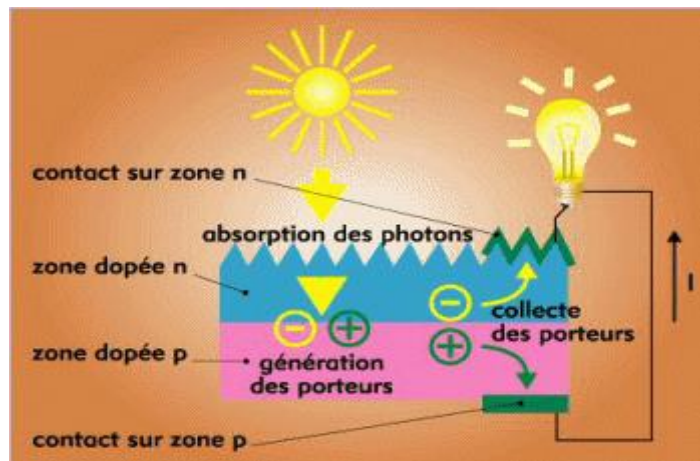


Figure II.1 : Principe de la conversion photovoltaïque [13]

II.2.2.1.1.3 Les types de Technologies Photovoltaïques :

Les technologies photovoltaïques actuelles se répartissent en trois générations principales, chacune offrant des compromis spécifiques entre rendement et coût :

1. Silicium Cristallin (1ère génération)

- **Monocristallin (c-Si) :** Rendement 18-22% (record 26.7%), durée de vie >25 ans [12]
- **Polycristallin (mc-Si) :** Rendement 15-18%, coût réduit de 20% vs monocristallin

2. Couches Minces (2ème génération)

- **Tellure de cadmium (CdTe) :** Rendement 16-18%, adapté aux grands projets [14]
- **Cuivre-Indium-Gallium-Sélénium (CIGS) :** Rendement 12-15%, flexible et léger

3. Technologies Émergentes (3ème génération)

- **Pérovskites :** Rendement R&D >25%, stabilité en amélioration [12]
- **Tandem Si/Pérovskite :** Combinent silicium (infrarouge) et pérovskites (visible), rendements >30% en labo

II.2.2.1.1.4 Différents types de systèmes photovoltaïques :

Il existe trois types de systèmes photovoltaïques : autonomes, hybrides et connectés au réseau. Les deux premiers, indépendants du réseau électrique public, sont souvent utilisés dans les zones isolées.

- **Les systèmes autonomes** : Un système autonome produit et stocke sa propre électricité sans dépendre du réseau. Il se compose généralement de panneaux solaires (qui convertissent la lumière en courant continu), d'un régulateur de charge (pour protéger la batterie), d'une batterie (stockage de l'énergie) et d'un onduleur (si besoin, pour convertir le courant en alternatif). L'énergie est utilisée directement ou stockée pour les périodes sans soleil. [15]
- **Les systèmes hybrides** : Un système hybride combine panneaux solaires et une autre source d'énergie (groupe électrogène, éolien, ou réseau électrique) pour optimiser l'autonomie. Il utilise des batteries pour stocker l'excédent d'énergie solaire et bascule vers l'autre source en cas de besoin, réduisant la dépendance au réseau. [15]
- **Les systèmes connectés au réseau** : Ce système injecte directement l'électricité produite par les panneaux solaires dans le réseau public. Sans batterie, il permet de revendre le surplus ou de compenser sa consommation via un compteur dédié. L'onduleur convertit le courant continu en alternatif compatible avec le réseau. [15]

II.2.2.1.1.5 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

➤ **Avantages :**

- Le soleil fournit une énergie propre et illimitée
- Aucune pollution : zéro émission de CO₂ pendant la production d'électricité
- L'électricité devient gratuite après l'amortissement de l'installation
- Les panneaux s'adaptent à différents supports : toits, terrains ou systèmes mobiles
- Cette solution électrifie efficacement les zones isolées
- L'installation fonctionne sans bruit
- Elle nécessite très peu d'entretien
- Sa durée de vie dépasse 25 ans
- Le système peut se coupler à des batteries ou à la production d'hydrogène
- Il valorise les surfaces inutilisées comme les toitures

➤ **Inconvénients :**

- La production électrique est intermittente (nuit, mauvais temps)
- Le rendement énergétique reste limité (15-22% en moyenne)

- L'investissement initial est élevé (coût des panneaux et installation)
- Le stockage nécessite des batteries onéreuses
- La surface requise est importante ($\approx 15\text{-}20\text{m}^2/\text{kWc}$)
- Le recyclage des composants (silicium, verre, métaux) pose des défis techniques
- La fabrication implique une empreinte carbone non négligeable
- On observe une dégradation annuelle du rendement (0.5-1%/an)
- La rentabilité dépend souvent des subventions publiques
- L'intégration architecturale peut être problématique (aspect visuel, poids)

II.2.2.2 L'énergie éolienne :

II.2.2.2.1 Principe de fonctionnement de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne repose sur la conversion de l'énergie cinétique du vent en électricité grâce à des éoliennes. Lorsque le vent souffle, il exerce une force sur les pales profilées de l'éolienne, faisant tourner un rotor connecté à une nacelle. La rotation initiale du rotor (typiquement 10-30 tr/min) est insuffisante pour le générateur électrique, ce qui nécessite un multiplicateur de vitesse mécanique pour augmenter cette vitesse jusqu'à environ 1500 tr/min, valeur optimale pour le fonctionnement d'un générateur asynchrone standard à 2 paires de pôles dans les systèmes 50 Hz. [16]

À l'intérieur de la nacelle, le générateur transforme cette énergie mécanique en énergie électrique via le principe de l'induction électromagnétique. Cependant, comme la vitesse du vent est variable, des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit pour le synchroniser avec celle du réseau électrique (50 Hz en Europe), tout en permettant au rotor de maintenir une vitesse de rotation variable pour optimiser la capture d'énergie. Enfin, un transformateur élève la tension électrique produite (généralement de 690 V à 20 kV ou plus) pour permettre son transport efficace vers le réseau de distribution public. [17]

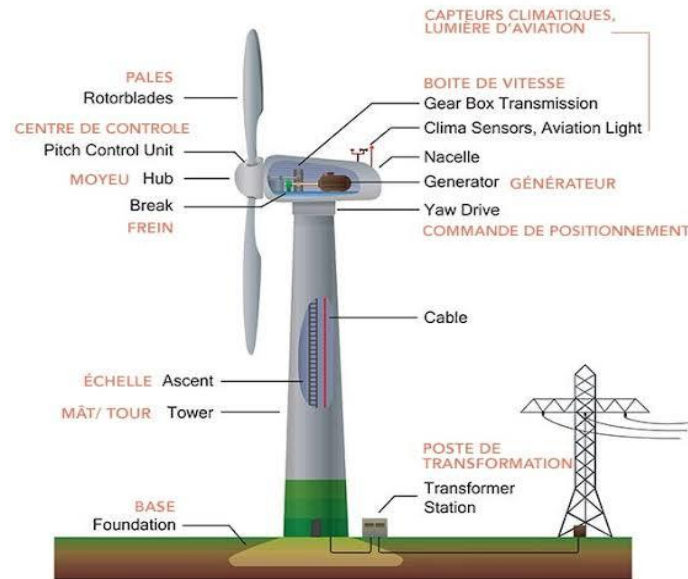


Figure II.2 : fonctionnement d'une éolienne [05]

II.2.2.2.2 Conversion de l'énergie éolienne en énergie mécanique puis électrique

L'énergie éolienne est transformée en électricité grâce à un processus en deux étapes :

➤ **Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique :**

- Les pales de l'éolienne, profilées pour maximiser la portance, captent l'énergie du vent.
- Sous l'effet du vent, les pales entraînent la rotation du rotor, qui est relié à un arbre principal.
- Cet arbre transmet l'énergie mécanique à un multiplicateur (engrenages), augmentant la vitesse de rotation pour optimiser la production électrique.

➤ **Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique :**

- L'arbre rapide entraîne un générateur (synchrone ou asynchrone), où l'induction électromagnétique produit un courant alternatif.
- Un convertisseur adapte la fréquence et la tension du courant pour le rendre compatible avec le réseau électrique.
- Un transformateur élève enfin la tension avant l'injection dans le réseau. [18]

II.2.2.2.3 Structure et composants principaux d'une éolienne :

Une éolienne moderne se compose des éléments clés suivants, chacun jouant un rôle spécifique dans la conversion de l'énergie éolienne en électricité :

➤ **Pales (rotor)**

- Généralement au nombre de trois, profilées aérodynamiquement
- Fabriquées en matériaux composites (fibre de verre/carbone)
- Captent l'énergie cinétique du vent

➤ **Moyeu**

- Pièce centrale reliant les pales à l'arbre lent
- Transmet le mouvement de rotation

➤ **Nacelle**

- Abrite les principaux composants mécaniques et électriques :
 - **Multiplicateur** : Augmente la vitesse de rotation (rapport 1 :50 typiquement)
 - **Générateur** : Convertit l'énergie mécanique en électrique
 - **Système d'orientation** (yaw system) : Pivote la nacelle face au vent
 - **Système de freinage** : Sécurité en cas de vents violents

➤ **Tour**

- Structure tubulaire en acier ou béton
- Hauteur variable (80-160 m) pour capter des vents plus forts

➤ **Système électrique**

- Convertisseurs de puissance
- Transformateur (nacelle ou base)
- Système de contrôle-commande [19]

II.2.2.2.4 Les différents types d'éoliennes :

II.2.2.2.4.1 Les éoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal représentent la technologie la plus répandue actuellement. Elles se caractérisent par un rotor monté sur un axe parallèle au sol, généralement composé de trois pales profilées pour optimiser la captation du vent. Ces pales, fabriquées en matériaux composites légers et résistants, peuvent atteindre jusqu'à 80 mètres de longueur pour les plus grands modèles. Le mât, dont la hauteur varie entre 80 et 160 mètres, permet de placer le rotor dans des couches de vent plus stables et plus puissantes. Un système d'orientation (nacelle

pivotante) permet de toujours positionner les pales face au vent pour maximiser la production d'énergie. Ces éoliennes offrent les meilleurs rendements énergétiques (jusqu'à 50% du potentiel théorique du vent) mais nécessitent des vents réguliers et des espaces dégagés. [16]

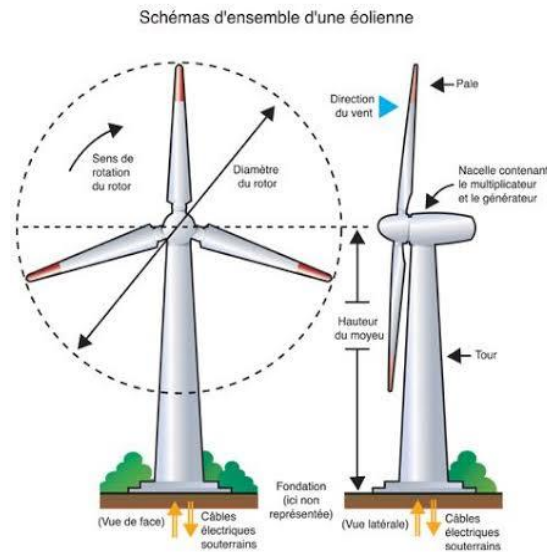


Figure II.3 : éolienne à axe horizontal [05]

II.2.2.2.4.2 Les éoliennes à axe vertical :

Moins communes mais en plein développement, les éoliennes à axe vertical présentent un rotor monté sur un axe perpendiculaire au sol. On distingue principalement deux types : le modèle Darrieus, avec des pales courbées offrant un bon rendement mais nécessitant un démarrage assisté, et le modèle Savonius, avec des pales semi-cylindriques permettant un bon couple de démarrage mais un rendement plus faible. Leur principal avantage réside dans leur capacité à capter le vent quelle que soit sa direction, éliminant ainsi le besoin de système d'orientation. Plus compactes et moins sensibles aux turbulences, elles s'adaptent particulièrement bien aux environnements urbains ou aux sites isolés. Cependant, leur rendement global reste inférieur à celui des éoliennes horizontales (30-40% du potentiel théorique maximum). [16]

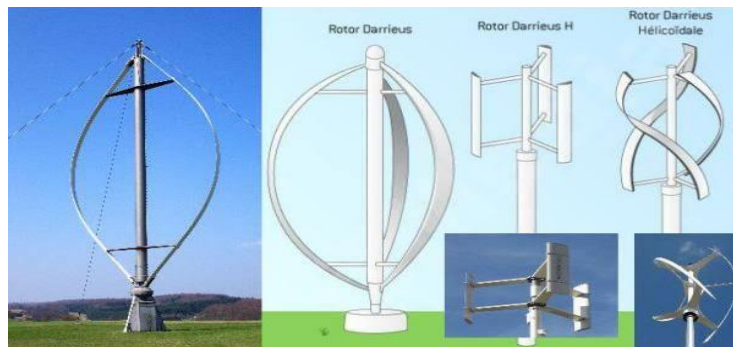


Figure II.4 : éolienne à axe vertical [05]

II.2.2.2.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

➤ **Avantages :**

- L'énergie éolienne est renouvelable et ne s'épuise pas, contrairement aux énergies fossiles comme le pétrole ou le charbon.
- Les éoliennes offrent une grande flexibilité d'exploitation et peuvent être arrêtées rapidement en cas de besoin.
- Cette technologie est propre car elle ne génère pas d'émissions de CO₂ ni de déchets polluants pendant son fonctionnement.
- Les installations éoliennes sont réversibles : les parcs peuvent être entièrement démontés sans laisser d'impact environnemental durable.
- Leur rentabilité économique est bonne, avec des coûts de maintenance relativement bas après l'installation.
- La production locale d'électricité réduit considérablement les pertes énergétiques liées au transport sur longues distances.
- Le secteur bénéficie d'innovations technologiques constantes, comme le développement d'éoliennes offshore et de systèmes à attaque directe plus efficaces.

➤ **Inconvénients :**

- La production est intermittente car elle dépend directement des conditions de vent, qui sont par nature variables et imprévisibles.
- L'investissement initial reste élevé, particulièrement dans les zones où les vents sont moins forts ou moins constants.
- Le fonctionnement génère un impact sonore, principalement dû au multiplicateur, même si les nouvelles technologies réduisent ce problème.
- Les grandes éoliennes ont un impact visuel significatif et peuvent altérer les paysages naturels.
- Elles présentent des risques pour la faune, notamment des collisions mortelles avec des oiseaux et des chauves-souris.
- Leur intermittence nécessite le développement de solutions de stockage d'énergie (batteries, hydrogène) pour stabiliser le réseau électrique.

Leur implantation est soumise à des contraintes spécifiques, comme l'obligation de les éloigner des zones habitées pour limiter les nuisances

II.3 Modélisation du système étudié :

II.3.1 Présentation des composantes du système :

Composant	Fonction principale
Panneaux solaires PV	Produire de l'électricité DC dépendant du soleil
Éolienne	Produire de l'électricité AC dépendant du vent
Convertisseur AC/DC	Convertir la sortie éolienne AC en DC
Convertisseur DC/DC avec MPPT	Optimiser la puissance extraite de PV et éolienne
Régulateur DC/DC	Stabiliser la tension
Pile à combustible	Produire l'énergie à partir d'hydrogène
Gestion de puissance	Centraliser toutes les puissances fournit, et alimente la charge et électrolyseur
Électrolyseur	Décomposer l'eau en hydrogène (H ₂) et oxygène (O ₂)
Réservoir H ₂	Stocker l'hydrogène
Charge (La station)	L'intégrité de notre station

Tableau II.1 : composantes du système

II.3.2 Architecture globale du système étudié :

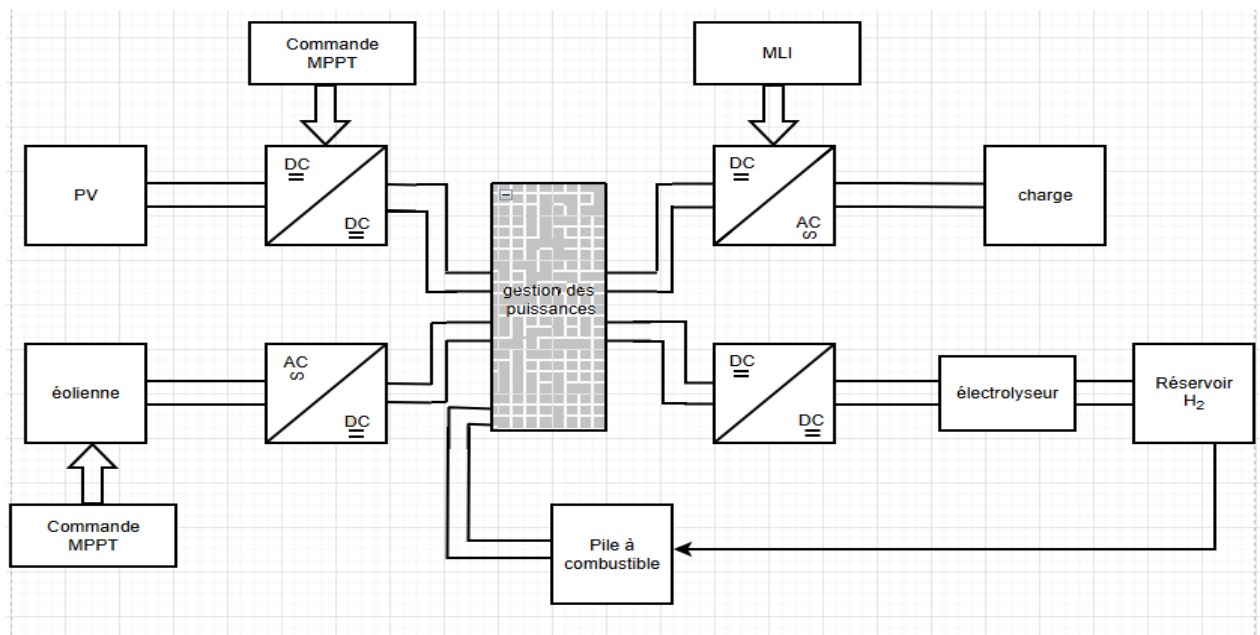


Figure II.5 : Bloc fonctionnelle global

II.3.2.1 Explication Détaillée du schéma :

II.3.2.1.1 Sources d'Énergie Renouvelable :

a) Panneaux Solaires (PV) :

- **Fonction :** Convertir la lumière du soleil en électricité courant continu (DC).
- **Sortie :** Tension DC variable (dépend de l'ensoleillement).
- **Problème :** La puissance maximale n'est pas constante (nécessité d'un MPPT).

b) Éolienne :

- **Fonction :** Convertir l'énergie cinétique du vent en électricité courant alternatif (AC).
Sortie : Tension AC variable (fréquence et amplitude dépendent de la vitesse du vent).
- **Problème :** Doit être convertie en DC pour être compatible avec le reste du système.

c) La pile à combustible :

- **Fonction :** Convertir l'énergie chimique d'un combustible (l'hydrogène déjà produit) et d'un oxydant (généralement l'oxygène) en électricité.
- **Sortie :** Tension DC variable (dépend de la disponibilité de l'hydrogène).

II.3.2.1.2 Conversion et Optimisation de l'Énergie :

a) Convertisseurs DC/DC avec MPPT (pour le PV) :

- **Rôle :**
 - Maximiser la puissance extraite des panneaux solaires via un algorithme MPPT (*Maximum Power Point Tracking*).
 - Ajuster la tension/courant pour l'adapter au système.

b) Redresseur AC/DC + MPPT (pour l'éolienne) :

- **Rôle :**
 - Convertir la sortie AC de l'éolienne en DC.
 - Utiliser un MPPT pour extraire la puissance maximale malgré les variations du vent.
 - Ajuster la tension pour l'adapter au système.

II.3.2.1.3 Gestion de puissance :

Fonction :

- Centraliser l'énergie des trois sources renouvelables.
- Distribuer l'électricité vers L'électrolyseur et la charge.

Avantage :

- Optimisation de l'efficacité énergétique en réduisons les pertes et de maximiser le rendement global du système.
- Adaptabilité aux variations de charge avec une meilleure réponse rapidement aux besoins changeants du système ou de l'utilisateur.

II.3.2.1.4 Électrolyseur :

- **Fonction :**
 - Utiliser l'électricité DC pour décomposer l'eau (H_2O) en hydrogène (H_2) et oxygène (O_2) via une réaction électrochimique.
- **Types courants :**
 - PEM (haute efficacité, coût élevé).
 - Alcalin (moins cher, mais moins flexible).
- **Besoins :**
 - Tension/courant spécifique.
 - Une alimentation d'eau (H_2O)

II.3.2.1.5 Stockage de l'Hydrogène (Réservoir) :

- **Fonction :**
 - Stocker l'hydrogène produit sous pression pour une utilisation ultérieure (pile à combustible, industrie, etc.).

II.3.2.1.6 Charge :

Représente L'intégrité de notre station soit des pompes ...etc

II.3.3 Modèle d'une installation photovoltaïque avec une commande MPPT :

Cette modélisation couvre une installation photovoltaïque, intégrant un algorithme MPPT de type Perturb and Observe, un régulateur PI et un convertisseur Boost. L'objectif est de maximiser la puissance extrait du générateur PV en suivant le point de puissance maximale selon les variations d'ensoleillement.

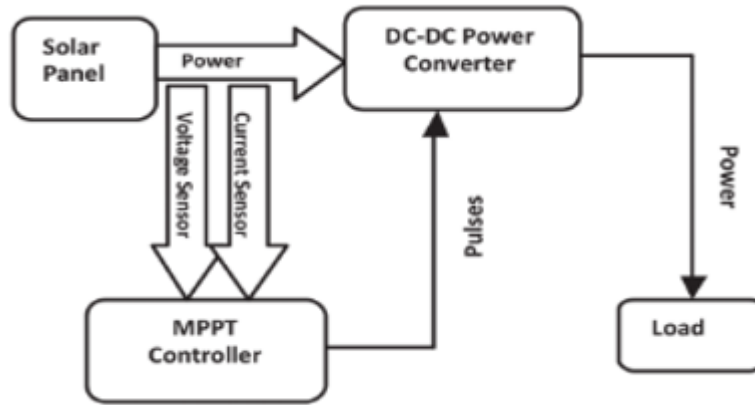


Figure II.6 : générateur photovoltaïque proposé [20]

II.3.3.1 Modèle électrique du Module PV :

Le modèle électrique est basé sur l'équation à une diode. Le schéma du circuit équivalent simplifié d'une cellule photovoltaïque découle des propriétés de la jonction PN et de la réaction du semi-conducteur au rayonnement lumineux.

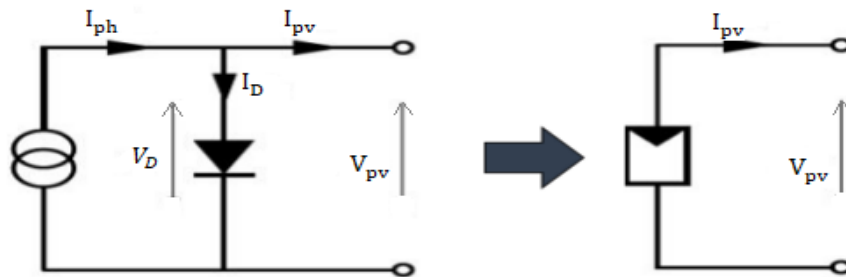


Figure II.7 : schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque [20]

Le modèle le plus couramment utilisé et classique pour une cellule photovoltaïque est le modèle à une diode. Ce modèle intègre un générateur de courant I_{ph} pour représenter le flux lumineux incident, ainsi qu'une diode D pour prendre en compte les phénomènes de polarisation de la cellule. Pour prendre en compte les caractéristiques physiques de la cellule, le modèle est complété par deux résistances en série et en dérivation, respectivement R_s et R_{sh} .

La résistance série R_s représente la résistance interne de la cellule et dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles. La résistance shunt R_{sh} est due à un courant de fuite au niveau de la jonction et dépend de la manière dont cette jonction a été réalisée. [21]

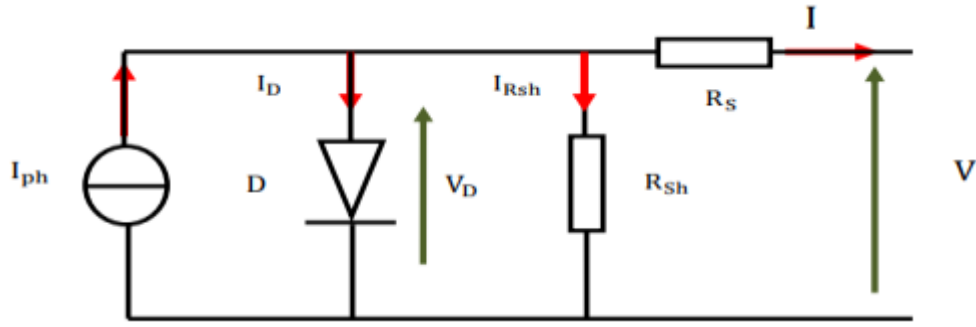


Figure II.8 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque [20]

Lorsque les bornes du circuit sont reliées à une charge R , un courant I circule à travers le circuit, générant ainsi une tension à ses bornes. Cette relation peut être exprimée à l'aide de la loi de Kirchhoff comme suit :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{Rsh} \dots\dots\dots(II.1)$$

Où :

I : Courant délivré par la cellule solaire

I_{ph} : Le photo-courant, peut être exprimé en fonction de l'ensoleillement comme suit :

$$I_{ph} = [((E_s - E_{réf})P_2) + [(T_j - T_{jréf})P_3] + 1]P_1E_s \dots\dots\dots(II.2)$$

Avec :

$E_{réf}$: Ensoleillement dans les conditions standard tel que : $E_{réf}=1000 \text{ w/m}^2$

E_s : Ensoleillement instantané mesuré pendant la journée [w/m^2]

$T_{jréf}$: Température dans les conditions standard tel que : $T_{jréf}=25^\circ\text{C}=298\text{K}$

T_j : Température instantanée pendant la journée (K).

P_1, P_2, P_3 : Paramètres constantes

I_d : Le courant de polarisation d'une diode, il est donné par :

$$I_D = I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{PV} + (I_{PV} * R_s))}{A * n_s * K * T_j} \right) - 1 \right] \dots\dots\dots(II.3)$$

$$I_0 = P_4 T_j^3 \exp \left(\frac{-E_g}{K * T_j} \right) \dots\dots\dots(II.4)$$

Avec :

I_0 : Courant de saturation de la diode [A].

V_{PV} : Tension aux bornes de la diode [V].

R_s : La résistance séries [Ω].

q : Charge d'électron tel que $q=1.062.10^{-19}$ [C].

A : Facteur d'idéalité de la diode.

K : Constante de Boltzmann tel que : $K=1.38 \cdot 10^{-23}$ [J/K].

n_s : Nombre de cellule en série dans un module.

I_0 : Le courant de saturation il est fortement dépendant de la température.

E_g : Energie de gap pour le silicium cristalline 1.12 ev.

I_{Rsh} : Le courant parcourue la résistance Rsh, il est donné par :

$$I_{Rsh} = \frac{V_{PV} + I_{PV} \cdot R_s}{R_{sh}} \dots\dots\dots (II.5)$$

Avec :

R_{sh} : Résistance shunt[Ω].

Ce qui donne :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{PV} + (I_{PV} \cdot R_s))}{A \cdot n_s \cdot K \cdot T_i} \right) - 1 \right] - \frac{V_{PV} + I_{PV} \cdot R_s}{R_{sh}} \dots\dots\dots (II.6)$$

II.3.3.2 Calcul de la Puissance PV :

$$P_{PV}(t) = V_{PV}(t) \cdot I_{PV}(t) \dots\dots\dots (II.7)$$

II.3.3.3 Algorithme MPPT – Perturb and Observe :

L'algorithme Perturb and Observe (P&O) suit une logique itérative pour maximiser la puissance photovoltaïque en ajustant progressivement la tension. À chaque pas, il compare la puissance actuelle avec la précédente : si elle augmente, la perturbation (incrément/décroissement de tension) est maintenue ; sinon, la direction est inversée. Cette méthode simple garantit une convergence vers le point de puissance maximale (MPP), mais induit des oscillations résiduelles autour de ce point en régime stable [22].

Comparaison de la puissance et de la tension aux instants t et t-1 :

$$\Delta P = P(t) - P(t - \Delta t)$$

$$\Delta V = V(t) - V(t - \Delta t)$$

Logique de l'algorithme :

- Si $\Delta P > 0$ et $\Delta V > 0 \rightarrow$ augmenter V_{ref}
- Si $\Delta P > 0$ et $\Delta V < 0 \rightarrow$ diminuer V_{ref}
- Si $\Delta P < 0 \rightarrow$ inverser la direction de variation

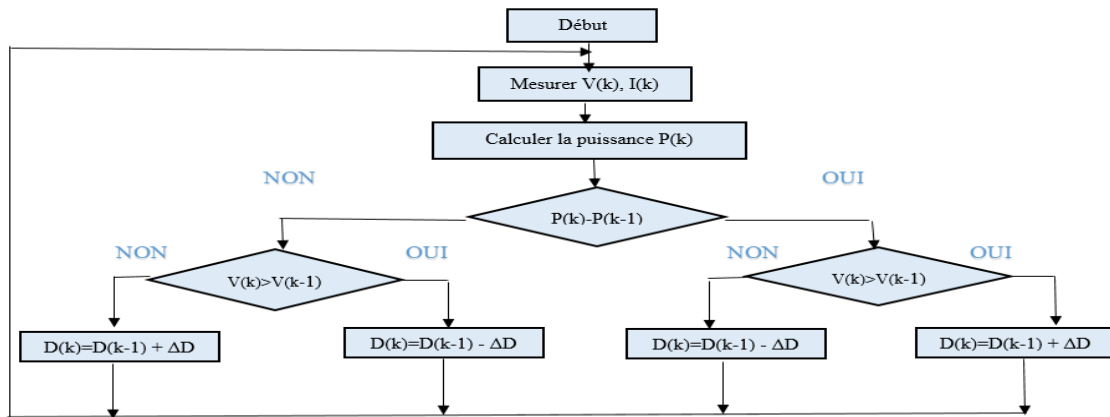


Figure II.9 : Organigramme de l'algorithme de P&O

Programme utilisée :

```

PV_MPPT ▶ MPPT
1  function Vref = MPPT(V, I)
2      % Paramètres MPPT
3      Vrefmax = 80;
4      Vrefmin = 0;
5      Vrefinit = 65;
6      deltaVref = 1;
7
8      % Variables persistantes pour stocker les valeurs précédentes
9      persistent Volt Plot Vreffolt;
10
11     % Initialisation des variables persistantes
12     if isempty(Volt)
13         Volt = 0;
14         Plot = 0;
15         Vreffolt = Vrefinit;
16     end
17
18     % Calcul de la puissance actuelle
19     P = V * I;
20
21     % Calcul des différences
22     dV = V - Volt;
23     dP = P - Plot;
24
25     % Algorithme P&O (Perturb and Observe)
26     if dP ~= 0
27         if dP < 0
28             if dV < 0
29                 Vref = Vreffolt - deltaVref;
30             else
31                 Vref = Vreffolt + deltaVref;
32             end
33         else
34             if dV < 0
35                 Vref = Vreffolt + deltaVref;
36             else
37                 Vref = Vreffolt - deltaVref;
38             end
39         end
40     else
41         Vref = Vreffolt;
42     end
43
44     % Limitation de la tension de référence
45     if Vref >= Vrefmax || Vref <= Vrefmin
46         Vref = Vreffolt;
47     end
48
49     % Mise à jour des variables pour la prochaine itération
50     Vreffolt = Vref;
51     Volt = V;
52     Plot = P;
53 end
  
```

Figure II.10 : Programme utilisée

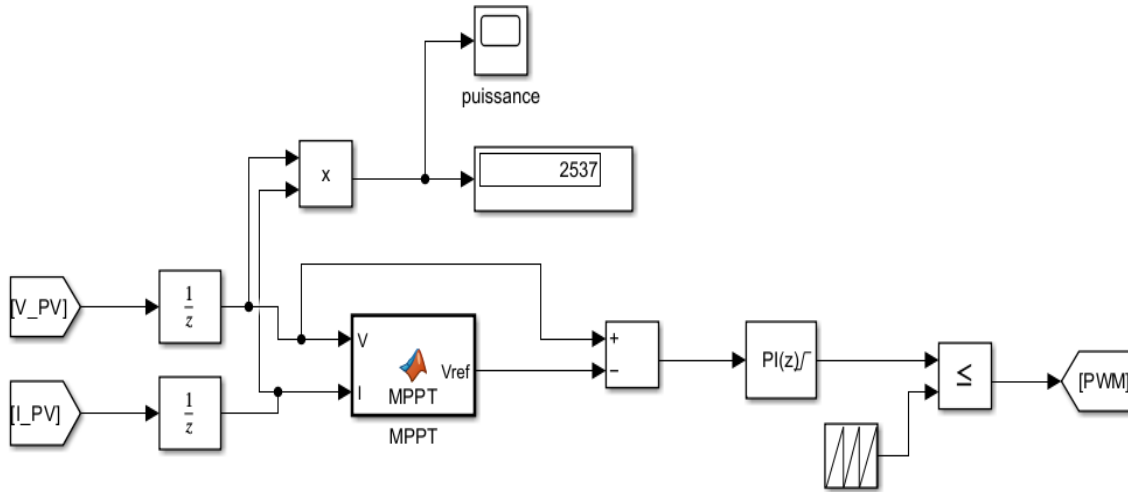


Figure II.11: schéma bloc de la commande MPPT

II.3.3.4 Contrôle par Régulateur PI :

Le régulateur PI (Proportionnel-Intégral) permet d'ajuster dynamiquement la tension de sortie du convertisseur Boost pour que la tension PV suive la tension de référence issue du MPPT.

$$\text{Erreur : } e(t) = V_{\text{réf}}(t) - V_{\text{PV}}(t) \dots\dots\dots(\text{II.8})$$

$$\text{Commande : } u(t) = K_p * e(t) + K_i * \int e(t) dt \dots\dots\dots(\text{II.9})$$

Le signal de commande ajuste le rapport cyclique D de la PWM.

II.3.3.5 Convertisseur Boost :

Le convertisseur Boost est une topologie de conversion DC-DC utilisée pour élever la tension du générateur PV afin de répondre aux besoins du système ou du réseau.

$$\text{Tension de sortie : } V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{(1-D)} \dots\dots\dots(\text{II.10})$$

$$\text{Courant de sortie : } I_{\text{out}} = I_{\text{in}} * (1 - D) \dots\dots\dots(\text{II.11})$$

II.3.3.6 Filtrage LC :

Le filtre LC placé à la sortie du convertisseur Boost permet de lisser les variations rapides de courant et de tension, réduisant ainsi les harmoniques et les ondulations.

$$\text{Formule de l'erreur : } e(t) = V_{\text{réf}}(t) - V_{\text{PV}}(t) \dots\dots\dots(\text{II.12})$$

Commande générée : $u(t) = K_p * e(t) + K_i * \int e(t) dt$, où K_p et K_i sont les gains proportionnel et intégral.

Cette commande agit sur le rapport cyclique (duty cycle) de la PWM envoyée au convertisseur Boost, permettant d'atteindre le point de fonctionnement optimal.

$$\text{Équation de la tension de sortie : } V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{(1-D)} \text{ où } D \text{ est le rapport cyclique.}$$

Courant de sortie : $I_{out} = I_{in} * (1 - D)$. Ce comportement assure que la puissance reste à peu près constante à travers le convertisseur (pertes négligées).

Équation pour l'inductance : $L * \left(\frac{di_L}{dt}\right) = V_{PV} - V_c$(II.13)

Équation pour la capacité : $C * \left(\frac{dV_c}{dt}\right) = i_L - \frac{V_c}{R_{load}}$(II.14)

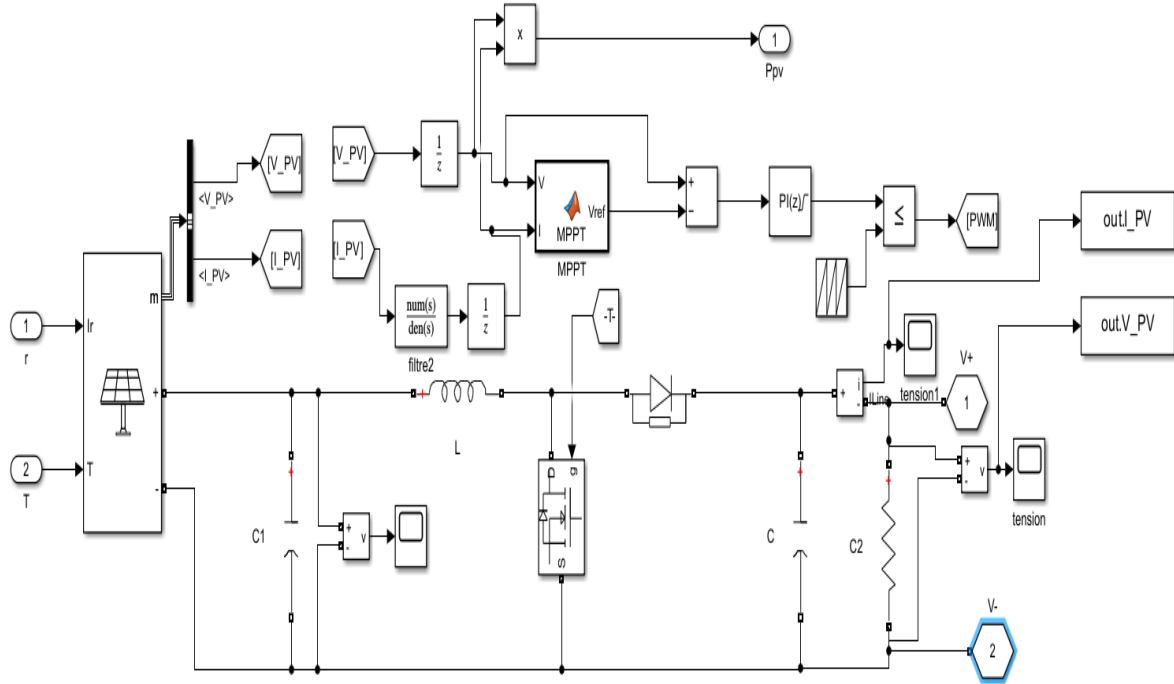


Figure II.12 : Schéma bloc d'une installation photovoltaïque avec une commande MPPT

II.3.4 Modélisation de la chaîne de production éolienne :

La conception d'un modèle éolien implique la prise en compte de plusieurs éléments : la modélisation du vent, l'étude aérodynamique des pales, la transmission mécanique et la conversion électrique via le générateur. Le schéma synoptique de la figure (II.12) représente une turbine éolienne associée à une machine asynchrone et un convertisseur statique, assurant l'alimentation d'une charge autonome grâce à un système d'interconnexion.

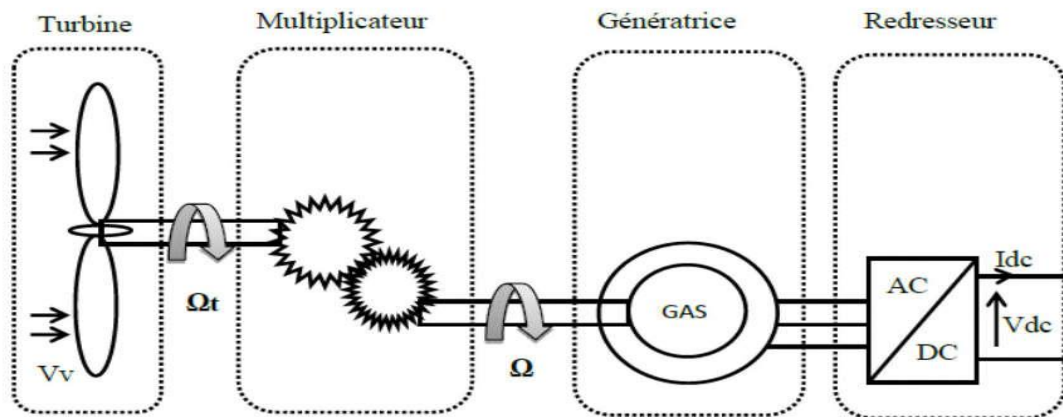


Figure II.13 : Schéma global de l'installation éolienne. [20]

II.3.4.1 Modélisation de la vitesse du vent :

En raison de sa nature fluctuante, la vitesse du vent arrivant sur le système éolien présente des variations complexes à quantifier directement au moyen. Pour contourner cette difficulté, une modélisation statistique est employée, où le vent est représenté comme une variable aléatoire paramétrée. La fonction de distribution couramment utilisée pour décrire son comportement est :

$$V_v = f(t) \dots \dots \dots (II.15)$$

II.3.4.2 Modélisation de la turbine :

Le fonctionnement de la turbine éolienne repose sur l'extraction de l'énergie cinétique contenue dans le flux d'air. Les pales, de surface active S , interceptent ce flux et convertissent son mouvement en énergie mécanique de rotation.[20]

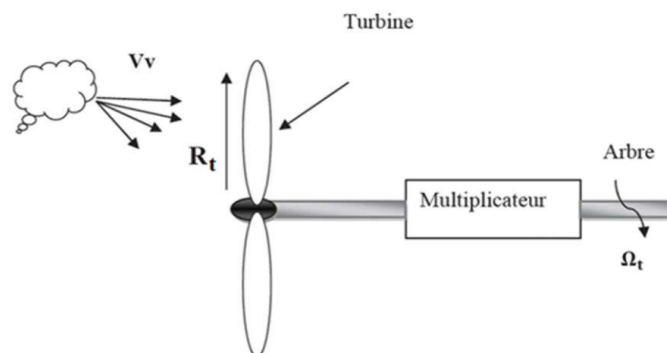


Figure II.14 : Système de la turbine à modéliser [20]

a) Le rapport de la vitesse en bout de pales (tip-speed ratio) : Il mesure le rapport entre la vitesse linéaire des extrémités des pales et la vitesse du vent incident. [20]

On définit le rapport λ comme suit : $\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V} \dots \dots \dots (II.16)$

Avec :

- Ω_t Vitesse de la turbine éolienne
- R_t Rayon de la turbine éolienne

b) Le coefficient de puissance :

La puissance fournie par le vent : $P_V = \frac{1}{2} \rho S_t v^3$ (II.17)

On définit le coefficient de puissance comme suit :

$$C_P = \frac{P_t}{\frac{1}{2} \rho S_t v^3} \text{(II.18)}$$

Avec :

- P_t Puissance de la turbine éolienne, elle est donnée par la relation suivante $P_t = T_t \Omega_t$
- $S_t = \pi R_t^2$ Surface balayée par la turbine éolienne.
- ρ Masse volumique de l'air.
- T_t Couple de la turbine éolienne.

La valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelée limite de Betz, est de $\frac{16}{27} = 0.5926$

c) Le couple de la turbine :

Le couple de la turbine est déterminé par la relation suivante :

$$T_t = \frac{1}{2} C_P \rho S \frac{v^3}{\Omega_t} \text{(II.19)}$$

d) Le multiplicateur de vitesse :

Le rôle fondamental du multiplicateur consiste à ajuster la vitesse de rotation entre la turbine et la génératrice, permettant ainsi le transfert de la puissance mécanique captée. Les vitesses respectives des deux machines sont reliées par la relation cinématique suivante :

$$\Omega_t = \frac{\Omega}{G} \text{(II.20)}$$

Le couple sur l'arbre lent et celui sur l'arbre rapide sont exprimés par la relation suivante :

$$T_{em} = \frac{T_t}{G} \text{(II.21)}$$

Avec :

- G est le gain du multiplicateur
- T_{em} Le couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone.

- Ω Est la vitesse mécanique de la génératrice.
- Ω_t La vitesse de la turbine [rad/s].
- T_t : Le couple développé par la turbine sous l'action du vent [N.m].

e) Equation dynamique de l'arbre de transmission :

Avec la présence du multiplicateur, la transmission mécanique est représentée par l'équation fondamentale de la dynamique pour un arbre rigide : [20]

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f \Omega = T_{em} - T_t \dots\dots\dots (II.22)$$

Avec :

- J : Inertie totale de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine.
- F : coefficient de frottement dynamique.

II.3.4.3 Point de fonctionnement à puissance maximale :

Le contrôleur MPPT optimise en permanence la puissance extraite d'une éolienne en ajustant la vitesse de rotation des pales pour maintenir le rapport λ (vitesse périphérique/vitesse du vent) à sa valeur optimale λ_{opt} , correspondant au coefficient de puissance C_p maximal. Il mesure en temps réel la vitesse du vent, la rotation du rotor et les paramètres électriques, puis agit sur le convertisseur de puissance pour modifier la charge appliquée à la génératrice. Cette régulation active permet d'adapter instantanément le point de fonctionnement aux variations du vent, maximisant ainsi l'énergie produite tout en réduisant les contraintes mécaniques. [23]

L'algorithme est donné par la relation suivante :

$$T_{em} = \frac{C_{p \max}}{\lambda_{opt}^3} * \frac{\rho}{2} * \pi * \frac{R^5}{G^3} * \Omega^2 \dots\dots\dots (II.23)$$

L'expression du coefficient de puissance de la turbine est généralement décrite par un polynôme, issu de l'interpolation des points en provenance des mesures. Le tracé de la turbine choisie est représenté sur la figure (II.15) suivante : [20]

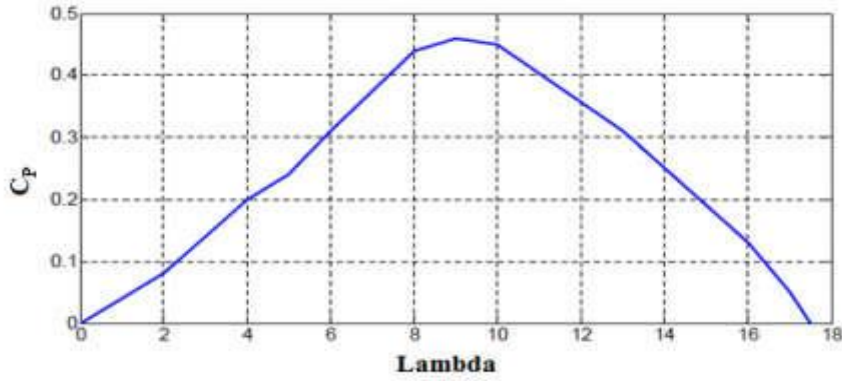


Figure II.15: Courbe $C_P(\lambda)$ [20]

II.3.4.4 Travail à réaliser :

Réaliser sur Matlab-Simulink le modèle de la turbine éolienne pour $\beta = 0$ comme il est représenté par les schémas bloc suivant :

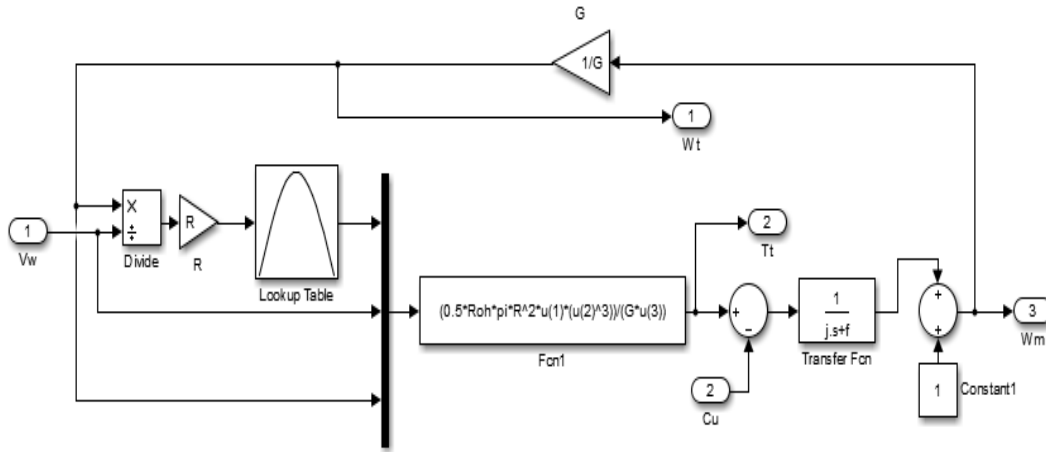


Figure II.16 : Schéma bloc d'une turbine éolienne sans tenir compte de l'algorithme MPPT

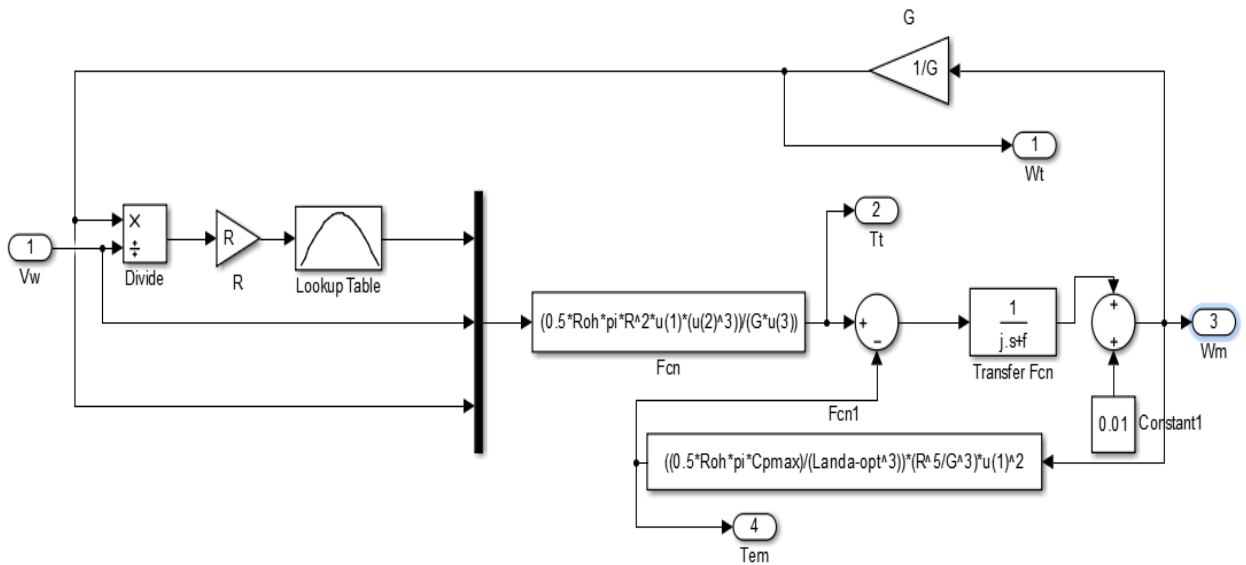


Figure II.17 : Schéma bloc d'une turbine éolienne en tenant compte de l'algorithme MPPT

II.3.4.5 Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents :

La machine synchrone à aimants permanents (MSAP) présente des avantages notables pour les applications éoliennes, notamment en termes de robustesse, de faible maintenance et de compétitivité économique comparée aux machines asynchrones à double alimentation. [20]

1) Modélisation mathématique de la MSAP :

- Circuit magnétique non saturé.
- La distribution sinusoïdale de la FMM créée par les enroulements du stator.
- Négligence des phénomènes d'hystérésis, courants de Foucault et effet de peau.
- L'effet d'encoche est négligeable.
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

Les équations électriques des machines électriques dans un repère fixe lié au stator sont décrites par :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.24)$$

Avec :

$V_{sa, sb, sc}$: Les tensions des phases statoriques.

$i_{sa, sb, sc}$: Les courants statoriques.

R_s : La résistance des phases statoriques.

$\varphi_{sa, sb, sc}$: Les flux totaux à travers les bobines statoriques.

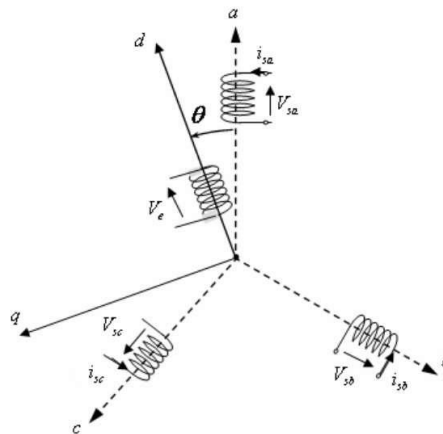


Figure II.18: Structure de la génératrice synchrone [20]

Pour simplifier l'analyse du système d'équations à coefficients variables, nous adoptons une modélisation dans le repère de Park. Ce référentiel diphasé (d,q) équivalent au repère triphasé traditionnel offre une manipulation mathématique plus aisée, comme l'illustrent les figures

(II.18) et (II.19). La conversion entre ces repères s'effectue via une matrice de transformation dédiée.

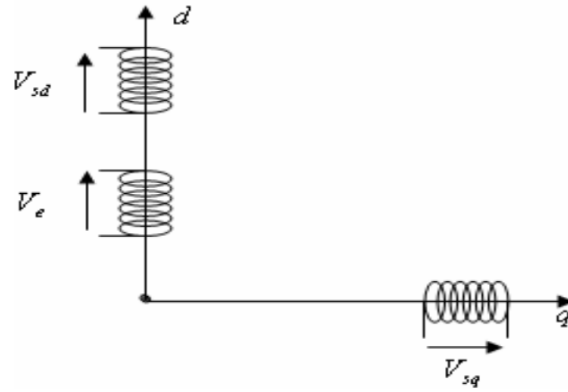


Figure II.19: Développement des enroulements de la génératrice synchrone suivant le système d'axe (dq) . [20]

$$[V_{sdp}] = [P(\theta)][i_{sabc}] \dots \dots \dots (II.25)$$

Avec :

$P(\theta)$: Matrice de Park, donnée par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (II.26)$$

Avec un couplage étoile à neutre non relié, la somme des courants statoriques est nulle à tout instant, annulant ainsi la composante homopolaire.

$$\text{Tel que : } i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \dots \dots \dots (II.27)$$

Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire de tension ou de flux, elle n'intervient pas dans le couple

La matrice de transition de Park devient alors :

$$[P_2(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \dots \dots \dots (II.28)$$

Et sa matrice inverse est donnée par :

$$[P_2(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \dots \dots \dots (II.29)$$

On a :

$$[V_{sdq}]^t = [P_2(\theta)][V_s]^t \dots\dots\dots (II.30)$$

$$[i_{sdq}]^t = [P_2(\theta)]^{-1}[i_s]^t \dots\dots\dots (II.31)$$

Tel que :

$$[V_{sdq}]^t = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix}, [i_{sdq}]^t = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \text{ et } [V_s]^t = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}, [i_s]^t = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.32)$$

Après simplification, on aura :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + L_{sd} \frac{dI_{sd}}{dt} - \varphi_{sq} W_r \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + L_{sq} \frac{dI_{sq}}{dt} - \varphi_{sd} W_r \end{cases} \dots\dots\dots (II.33)$$

Avec :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_{sd} I_{sd} + \varphi_f \\ \varphi_{sq} = L_{sq} I_{sq} \end{cases} \dots\dots\dots (II.34)$$

$I_{sd,sq}$: Courants statoriques dans le repère de Park [A].

$V_{sd,sq}$: Tensions statoriques dans le repère de Park [V].

L_s : Inductance cyclique statorique [H]

R_s : Résistance statorique [ohms].

φ_f : Flux inducteur crée par les aimants permanents.

Sachant que pour la machine synchrone, on a : $W_r = W$, et en remplaçant l'équation (II.35) dans (II.34), on obtient :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + L_{sd} \frac{dI_{sd}}{dt} - L_{sq} I_{sq} W \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + L_{sq} \frac{dI_{sq}}{dt} - L_{sd} I_{sd} W + \varphi_f W \end{cases} \dots\dots\dots (II.35)$$

Le couple électromécanique développé par les machines synchrones à f.é.m. sinusoïdale peut être donné par la relation suivante :

$$C_e = P[\varphi_{sd} * I_{sq} - \varphi_{sq} * I_{sd}] \dots\dots\dots (II.36)$$

Après simplification, on aura :

$$C_e = P \left((L_{sd} - L_{sq}) I_{sd} + \varphi_f \right) I_{sq} \dots\dots\dots (II.37)$$

II.3.5 Modélisation d'un électrolyseur PEM :

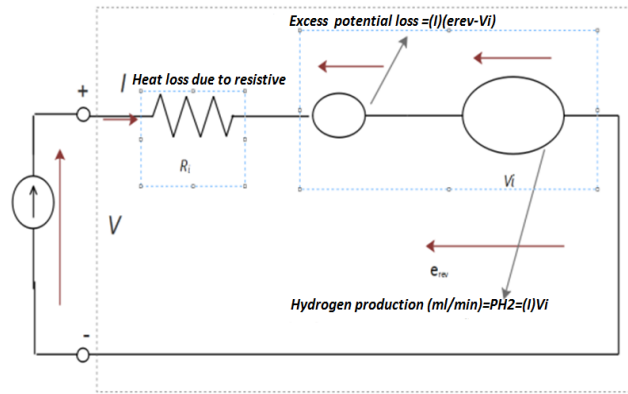


Figure II.20 : Circuit équivalent pour un électrolyseur PEM unique [24]

Des dimensions et une masse réduites, une consommation d'énergie plus faible et des températures de fonctionnement plus basses [25].

Le circuit équivalent d'un électrolyseur à membrane échangeuse de protons (PEM) a été créé dans MATLAB/Simulink afin d'exécuter la simulation.

La figure (II.20) montre le circuit équivalent de l'électrolyseur PEM unique [24, 26]. Afin d'obtenir les caractéristiques courant-tension (I-V) et de production d'hydrogène, certaines équations ont été développées pour des conditions en régime permanent et implémentées dans MATLAB/Simulink.

L'équation (II.38) modélise le processus d'électrolyse et s'écrit comme suit :

$$V = \left(\frac{1}{3.064} \right) * I + 1.476 = 0.326 * I + 1476 = I * R_i + e_{rev} \dots\dots\dots(II.38)$$

L'équation (II.38) représente un modèle de circuit équivalent simple pour le PEM, qui comporte une résistance initiale R_i et une tension inverse e_{rev} .

La tension idéal V_i (électrochimique) est calculé par l'équation (II.39) [24] :

$$V_i = \frac{\Delta G}{2F} \dots\dots\dots(II.39)$$

Où ΔG est la variation de l'énergie libre de Gibbs (J/mol) de l'hydrogène gazeux, et F est la constante de Faraday (96 487 C/mol).

Si l'eau est à l'état liquide, alors ΔG pour une température donnée T (°C) peut être calculée à l'aide de l'équation (II.40) :

$$\Delta G = 285840 - 163.2 * (273 + T) \dots\dots\dots(II.40)$$

La valeur de V_i est calculée dans des conditions nominales de fonctionnement à température ambiante de 20 °C et à une pression de 1 atm.

Elle est de 1,223 V, ce qui est utile pour l'électrolyse et la production d'hydrogène.

Cette valeur est également liée à l'électrochimie, de sorte que le volume molaire V_m est connu à partir de l'expression du gaz parfait donnée dans l'équation (II.41) [24] :

$$V_m = \frac{R \cdot (273 + T)}{p} \dots\dots\dots (II.41)$$

Où R et P sont respectivement la constante des gaz parfaits ($0.082 \text{ L} \cdot \text{atm} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$) et la pression.

Le taux de production d'hydrogène, noté V_H (mL/min), en fonction du courant d'entrée I (A) est déterminé par l'équation (II.42) : [24]

$$V_H = V_m (\text{L}) \cdot \left(\frac{10^3 \text{ L} \cdot \text{ml}}{1} \right) \cdot \left(\frac{60 \text{ s}}{\text{min}} \right) \cdot \left(\frac{1 \left(\frac{\text{C}}{\text{s}} \right)}{2 \cdot F (\text{C})} \right) = V_m \cdot (10^3) \cdot 60 \cdot \frac{I}{2 \cdot F} \dots\dots\dots (II.42)$$

L'énergie électrochimique de l'hydrogène par seconde P_{H_2} , qui est égale à V_H , est calculée par l'équation (II.43) [24] :

$$P_{H_2} = V_m \cdot (10^3) \cdot (60) \cdot \frac{I}{2 \cdot F} \cdot \frac{2 \cdot F \cdot V_i}{V_m \cdot (10^3) \cdot (60)} = V_i \cdot I \dots\dots\dots (II.43)$$

À partir des équations ci-dessus, il est clairement visible que la puissance utile délivrée par la cellule électrolyseur dépend du courant d'entrée I de l'électrolyseur et de la tension idéale V_i .

La puissance électrique d'entrée P de la cellule électrolyseur PEM, qui est une fonction de V_H , peut être déterminée par :

$$P = V \cdot I = I^2 \cdot R_i + I \cdot e_{rev} \dots\dots\dots (II.44)$$

$$P = \left(V_m \cdot \frac{2 \cdot F}{V_H \cdot 10^3 \cdot (60)} \right)^2 \cdot R_i + \left(V_H \cdot \frac{2 \cdot F}{V_m \cdot 10^3 \cdot (60)} \right) \cdot e_{rev} \dots\dots\dots (II.45)$$

Dans ce travail, la tension réversible (inverse) e_{rev} , par rapport à la tension idéale V_i , est calculé à 1,476 V, et la résistance R_i du sous-système PEM est également égale à 0,326 Ohm à une température de 20 °C et une pression de 1 atm.

Ces valeurs sont bien confirmées par le module MATLAB/Simulink.

Le courant d'entrée I (A) de l'électrolyseur est modélisé par l'équation (3), et l'équation (7) est appliquée pour les débits de production d'hydrogène V_H .

Pour un fonctionnement en régime permanent, l'équation (10) est utilisée pour simplifier et déterminer l'entrée du modèle I-V de la cellule électrolyseur PEM en fonction de la pression et de la température [24].

$$V(T, P) = I R_i + e_{rev}(T, P) \dots\dots\dots (II.46)$$

II.3.6 Modélisation du réservoir d'hydrogène :

L'hydrogène comprimé sous forme gazeuse ou liquide peut être stocké dans des réservoirs en utilisant différentes techniques, comme le stockage physique de l'hydrogène [10].

Afin de stocker le gaz hydrogène produit par l'électrolyseur, un module dynamique du réservoir est créé dans MATLAB/Simulink, et peut être exprimé comme suit, équation (11) [28] :

$$P_b - P_{bi} = Z * \frac{N_{H_2} * R T_b}{M_{H_2} * V_b} \dots\dots\dots (II.47)$$

Où :

P_b : est la pression du réservoir mesurée en pascals (Pa)

P_{bi} : est la pression initiale du réservoir de stockage (Pa)

R : est la constante universelle des gaz parfait (J/kmol · K)

T_b : est la température de fonctionnement (K)

V_b : est le volume du réservoir (m³)

T : est la température.

Z : est le facteur de compressibilité en fonction de la pression, comme indiqué dans l'équation (II.48) :

$$Z = \frac{P V_m}{R T} \dots\dots\dots (II.48)$$

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

Il a été constaté que ce modèle détermine la pression du réservoir en utilisant le rapport du débit d'hydrogène vers le réservoir.

L'équation (II.47) est implémentée dans Simulink afin d'obtenir l'hydrogène stocké et délivré à l'application. [27]

II.3.7 Les convertisseurs statiques :

Un convertisseur statique sert d'interface entre une source d'énergie électrique et une charge, avec pour objectif principal d'adapter les caractéristiques de la source à celles du récepteur

II.3.7.1 Différents types de convertisseurs statiques

II.3.7.1.1 Les convertisseurs statiques AC-DC (Les redresseurs)

Les convertisseurs alternatif-continu redressent une tension sinusoïdale pour produire une tension unidirectionnelle, dont le niveau moyen peut être contrôlé à l'aide d'une commande (par angle d'amorçage dans les redresseurs thyristors, par exemple). [28]

➤ Redresseur Triphasé (PD3 - Pont de Diode Triphasé) :

Application : Alimentation industrielle (moteurs DC, machines-outils).

Schéma :

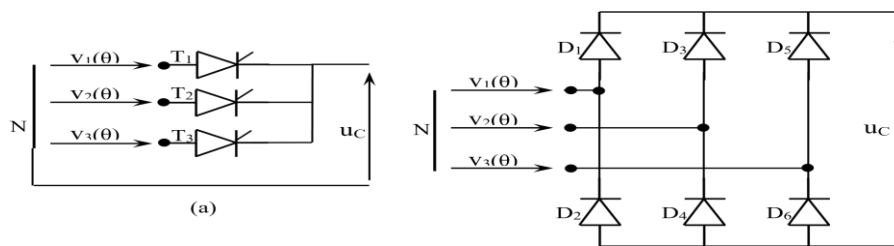


Figure II.21 : Redresseurs triphasés. (a) P3. (b) PD3. [20]

- 6 diodes.
- Source: Tension triphasée 400V / 50Hz (phase-phase).
- Charge : Inductive (ex. moteur DC).

Fonctionnement :

- Chaque paire de diodes conduit pendant $\frac{2\pi}{3}$ (120°).
- Fréquence de sortie : **300 Hz** (6 pulsations par période).

Formes d'onde :

- Sortie : $V_{out} = \max(V_{AB}, V_{AC}, V_{BC})$ (enveloppe des tensions phase-phase).

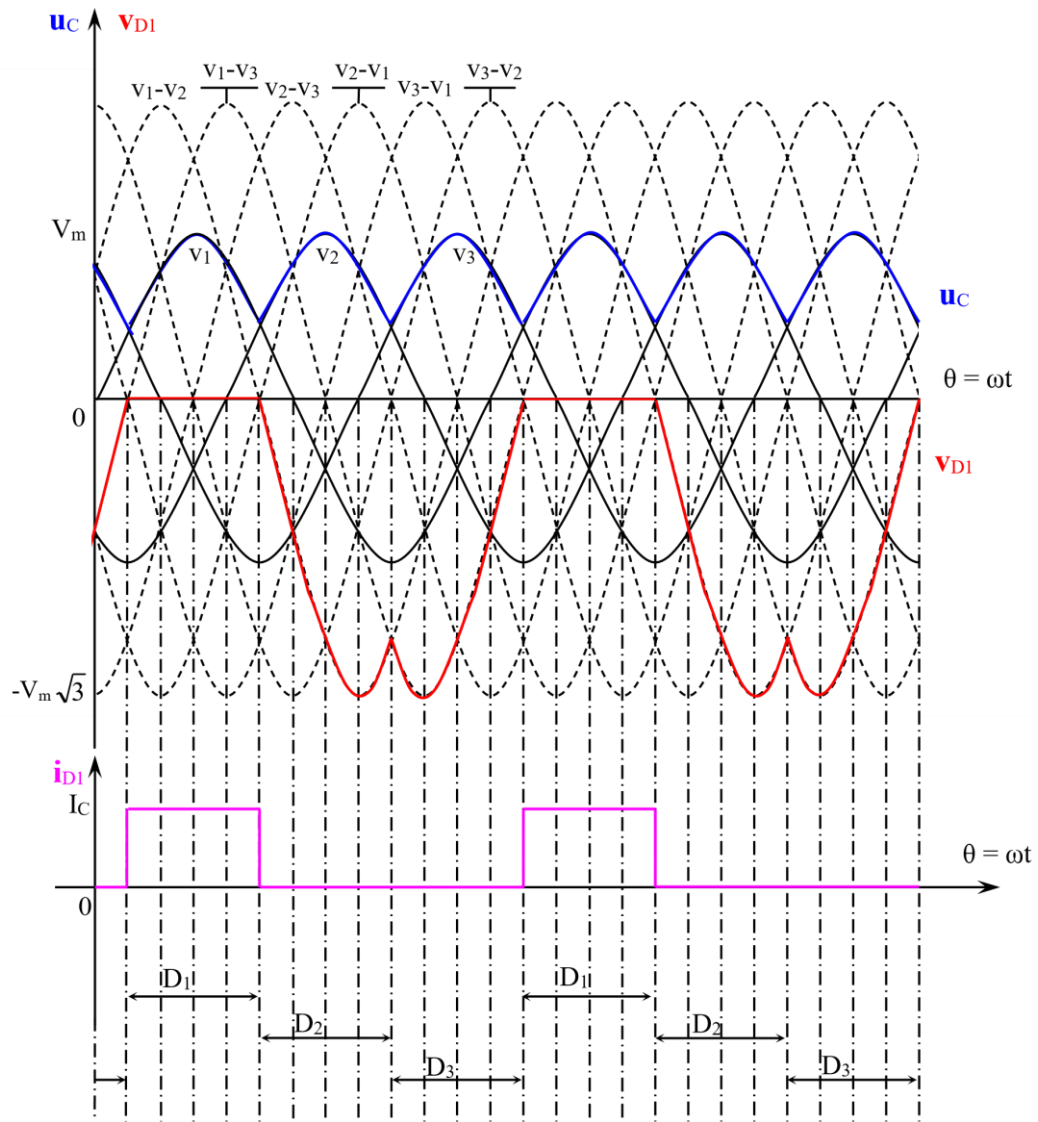


Figure II.22 : Formes d'ondes des différentes grandeurs d'un redresseur P3 toutes diodes.[20]

II.3.7.1.2 Les convertisseurs statiques DC-AC (Les onduleurs) :

L'onduleur est un convertisseur statique qui transforme l'énergie électrique continue (DC) en énergie alternative (AC). Grâce à des composants semi-conducteurs commandés, il génère une tension alternative ajustable en fréquence et en amplitude au niveau du récepteur [29].

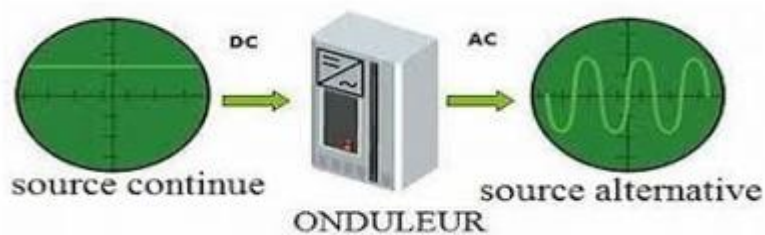


Figure II.23 : Schéma de principe de la conversion continu– alternative (DC/AC) [20]

➤ **Onduleur de tension triphasé :**

Pour réaliser un onduleur triphasé, il suffit d'associer trois onduleurs monophasés en parallèle et de commander leurs interrupteurs de manière à générer trois tensions de sortie déphasées de 120° . Ce montage donne lieu à un onduleur triphasé à six interrupteurs, soit deux interrupteurs par phase, comme illustré dans la figure

Afin d'éviter à la fois le court-circuit de la source de tension continue U_{dc} et l'ouverture des circuits de courant i_a , i_b et i_c , les deux interrupteurs d'un même bras ne doivent jamais être fermés simultanément. Ils sont donc commandés par des signaux complémentaires.

Les interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant pour pouvoir imposer les tensions de sortie, quelle que soit la direction du courant dans la charge. Cette bidirectionnalité est assurée en associant à un semi-conducteur commandé (à l'ouverture et à la fermeture) une diode montée en antiparallèle.

Selon la puissance mise en jeu, les interrupteurs peuvent être réalisés à l'aide de transistors MOS, bipolaires, IGBT ou GTO, tous accompagnés d'une diode permettant la conduction dans les deux sens du courant. [29]

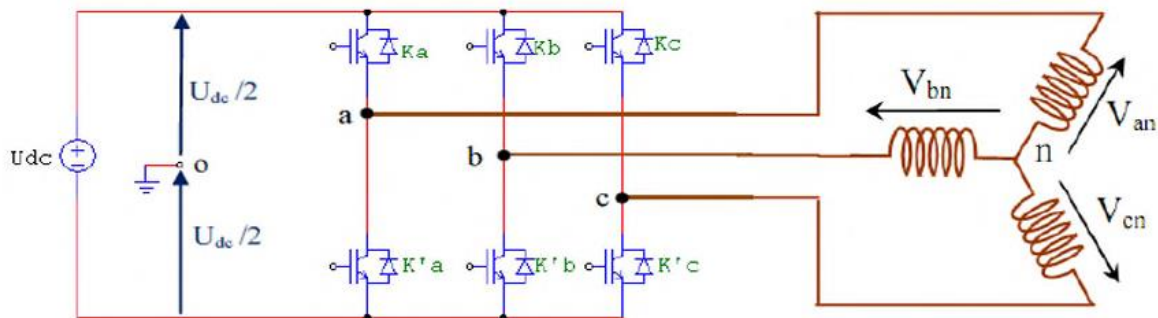


Figure II.24 : Circuit de puissance d'un onduleur triphasé.[20]

II.3.7.1.3 Convertisseurs statiques DC-DC (Hacheurs) :

Le hacheur est un convertisseur continu-continu qui transforme une énergie électrique continue d'un certain niveau de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau. Il est particulièrement utile pour le stockage de l'énergie photovoltaïque dans des batteries ou pour l'alimentation de charges en courant continu [30].

Ce dispositif est constitué principalement de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans un modèle idéal, ces composants présentent un rendement élevé et ne dissipent aucune puissance active [30].

Fonctionnant par découpage de la grandeur d'entrée continue (tension ou courant), les hacheurs délivrent en sortie une grandeur également continue ou présentant une faible ondulation [30].

II.3.7.1.3.1 Convertisseur DC-DC Boost :

Le convertisseur Boost (aussi appelé hacheur parallèle ou élévateur de tension) est un type d'alimentation à découpage qui augmente la tension continue d'entrée pour fournir en sortie une tension continue plus élevée.[31]

Il est composé essentiellement d'un interrupteur K (exemple : transistor) et d'une diode D . L'interrupteur K est commandé par un signal à modulation de largeur d'impulsion (MLI) de période de découpage fixe T_d et de rapport cyclique variable α .

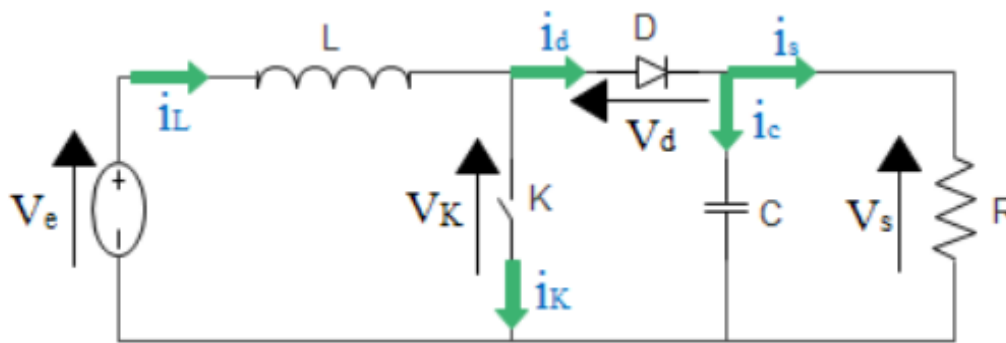


Figure II.25 : Schéma de base d'un convertisseur boost [20]

Sur l'intervalle $0 < t < \alpha T$, K est fermé et D est bloquée. On obtient :

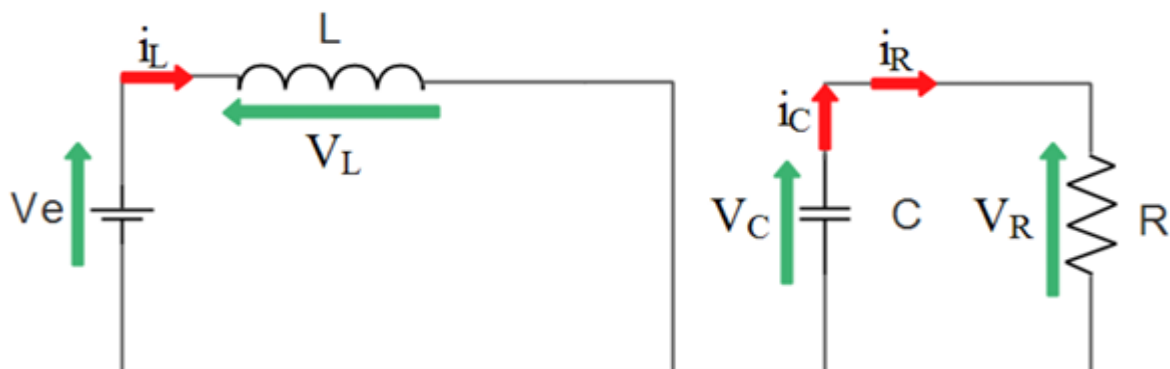


Figure II.26 : Schéma équivalent du Boost avec K fermé [20]

D'après le schéma on a obtenu les équations suivantes :

$$V_e = L \frac{di_L}{dt} \dots \dots \dots (II.49)$$

Ce qui donne :

$$i_L = I_{min} + \frac{V_e}{L} t \dots \dots \dots (II.50)$$

I_{min} , représente la valeur minimale du courant dans l'inductance.

A l'instant $t = \alpha T_d$ le courant i_L atteint sa valeur maximale dans l'inductance I_{max} suivant la relation :

$$I_{max} = I_{min} + \frac{V_e}{L} \alpha T_d \dots \dots \dots (II.51)$$

Sur l'intervalle $\alpha T < t < T$, **K** est ouvert et **D** est passante, on obtient le schéma ci-après :

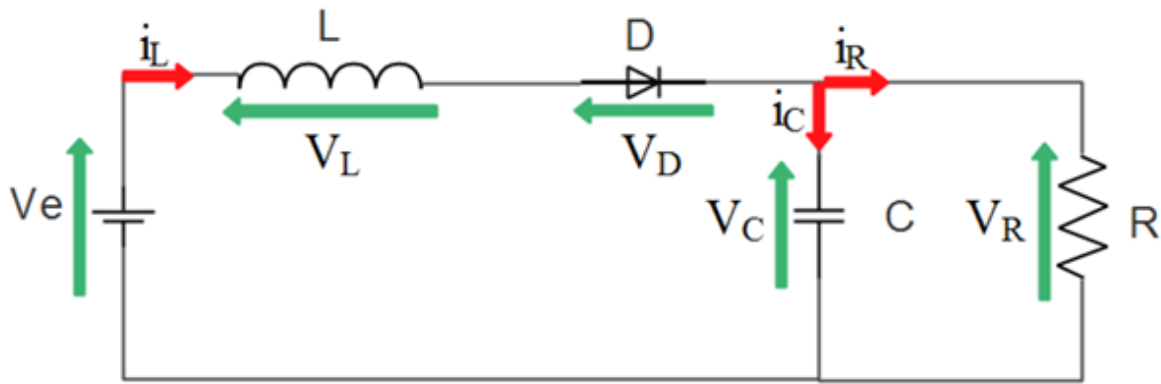


Figure II.27 : Schéma équivalent du Boost avec K ouverte [20]

D'après le schéma, on obtient les équations suivantes :

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e - V_R \dots \dots \dots (II.52)$$

$$i_L = I_{max} + \frac{V_e - V_R}{L} (t - \alpha T_d) \dots \dots \dots (II.53)$$

Avec $\Delta i_L = I_{max} - I_{min}$ qui représente l'ondulation du courant dans l'inductance, donc l'association des deux équations nous donne :

$$I_{min} = I_{max} + \frac{V_e - V_R}{L} (t - \alpha) T_d \dots \dots \dots (II.54)$$

D'après l'équation (II.54) la valeur moyenne de la tension de sortie du convertisseur peut être contrôlée en faisant varier la tension d'entrée ou bien le rapport cyclique α . Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, donc c'est ce qui nous permet d'augmenter la tension de sortie.

Equation de la tension :

$$\frac{V_S}{V_e} = \frac{1}{1 - \alpha} \dots \dots \dots (II.55)$$

II.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons modélisé un système complet de production d'hydrogène par électrolyse, alimenté par des sources d'énergie renouvelables. La modélisation a débuté par les générateurs, à savoir le panneau photovoltaïque et la turbine éolienne, qui assurent l'apport énergétique nécessaire. Ensuite, l'électrolyseur a été représenté, permettant la conversion de cette énergie en hydrogène. Le réservoir de stockage a également été modélisé afin d'accumuler l'hydrogène produit, ainsi que la pile à combustible, chargée de reconvertir l'hydrogène en électricité en fonction des besoins de la charge. Enfin, un système de gestion de puissance a été intégré pour coordonner de manière intelligente les flux entre la production, le stockage et la consommation. Cette modélisation constitue une base essentielle pour les simulations du chapitre suivant, visant à analyser le comportement du système dans diverses conditions d'exploitation.

Chapitre III : Résultats de la simulation du système étudié

III.1 Introduction :

Dans le but de valider la faisabilité et les performances du système hybride de production et de gestion d'énergie basé sur l'hydrogène vert, À l'aide des modèles et des lois de commande élaborés dans les chapitres précédents pour les différents éléments composants, le système étudié une simulation a été réalisée sous l'environnement MATLAB/Simulink. Ce système intègre trois sources principales : une centrale photovoltaïque, une éolienne, ainsi qu'une pile à combustible alimentée par de l'hydrogène produit localement via un électrolyseur.

Le modèle comporte également un réservoir de stockage d'hydrogène, une charge représentant la station de production de l'hydrogène, et un système de gestion de puissance permettant de coordonner les différents flux énergétiques. La simulation permet d'étudier le comportement dynamique du système en fonction des variations des ressources renouvelables (ensoleillement et vent), de la demande énergétique, et de la capacité de stockage.

Ce chapitre présente les différentes composantes du modèle simulé, les hypothèses retenues, les résultats obtenus ainsi que leur interprétation. L'analyse permettra d'évaluer la capacité du système à assurer une alimentation continue de la charge tout en optimisant la production, le stockage et la consommation d'hydrogène.

III.2 Simulation générale appliqué au système global de production et stockage d'hydrogène :

La figure (III.1) représente un modèle du système hybride qui a été développé sous Simulink pour simuler la production, le stockage et la gestion de l'énergie. Il comprend les principales composantes : sources PV et éolienne, électrolyseur, pile à combustible, réservoir d'hydrogène, charge et système de gestion de puissance. Cette section présente brièvement chaque sous-système du modèle.

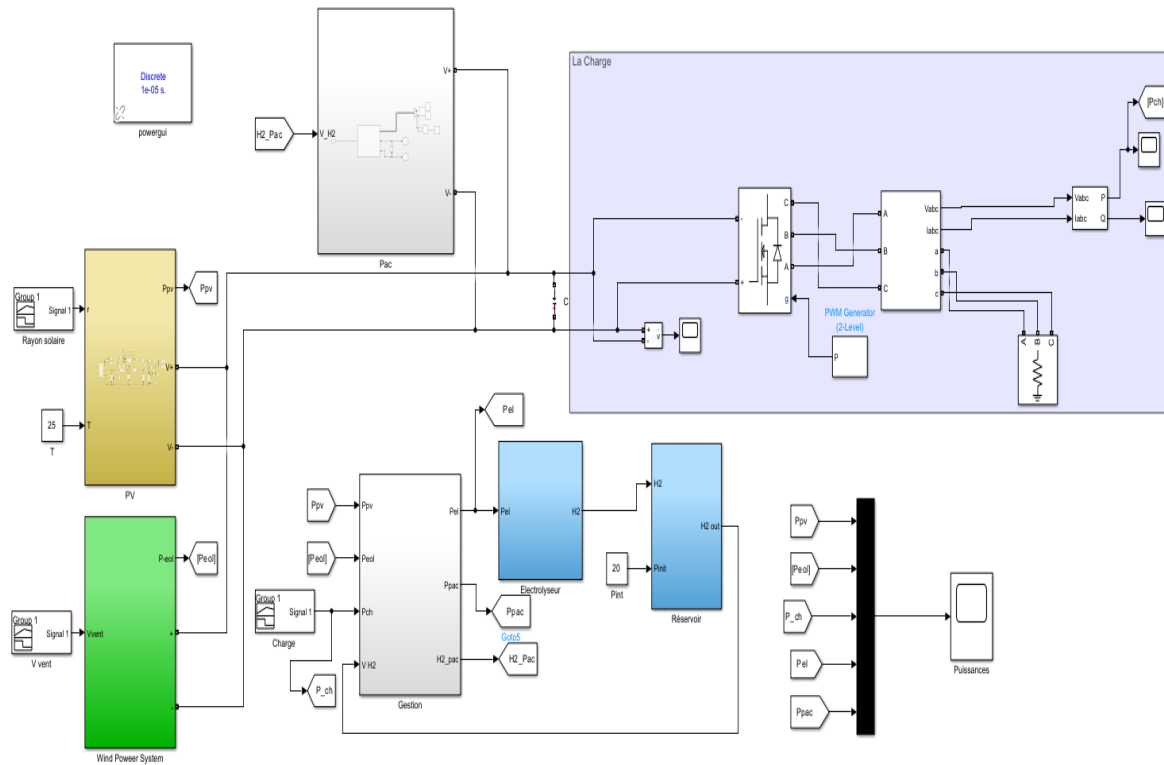


Figure III.1 : Schéma globale de simulation

III.3 Description du modèle programme :

III.3.1 Sources de production d'énergie, photovoltaïque et éolienne :

Le modèle Simulé intègre deux sources d'énergie renouvelable : le panneau photovoltaïque (PV) et l'éolienne.

- La figure (III.2) représente le bloc PV qui convertit le rayonnement solaire en énergie électrique selon l'irradiation et la température ambiante. Il est basé sur un modèle courant-tension caractéristique du comportement des cellules solaires, et une commande MPPT type PO pour maximiser l'énergie extraite de solaire.

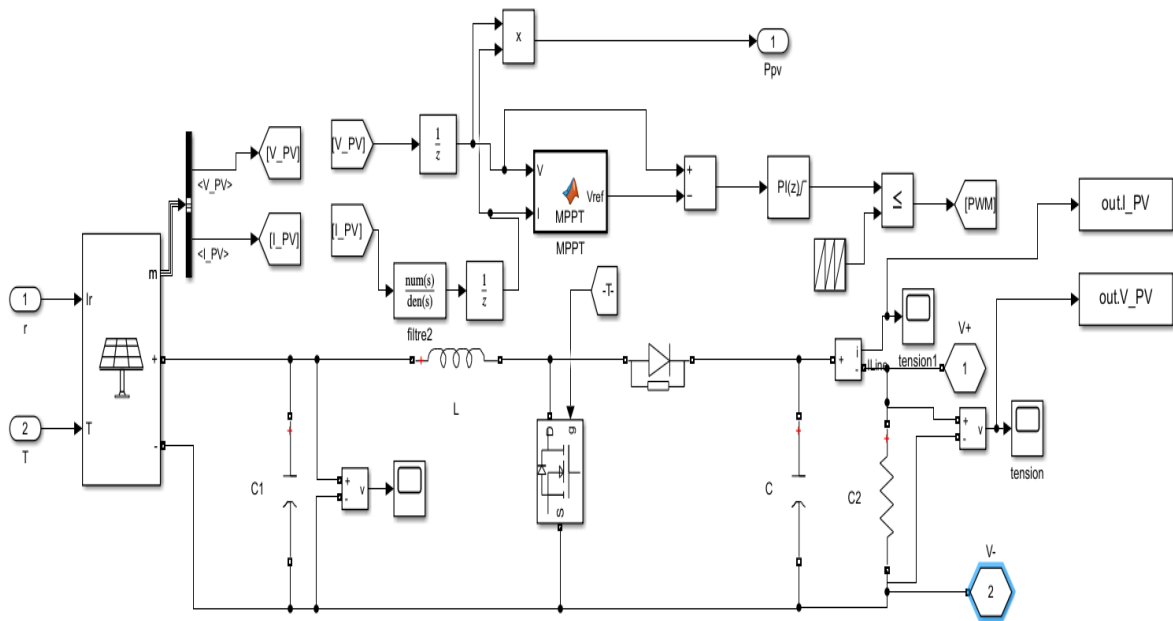


Figure III.2 : Schéma bloc de système photovoltaïque avec MPPT

- La figure (III.3) représente le bloc éolien qui simule la production d'électricité à partir de la vitesse du vent. Il comprend une turbine couplée à un générateur, avec un système de conversion de puissance pour adapter la sortie à la charge, et deux commande MPPT type PO et type Incrémental conductance (IncCond) intégrer pour maximiser l'énergie extraite de solaire.

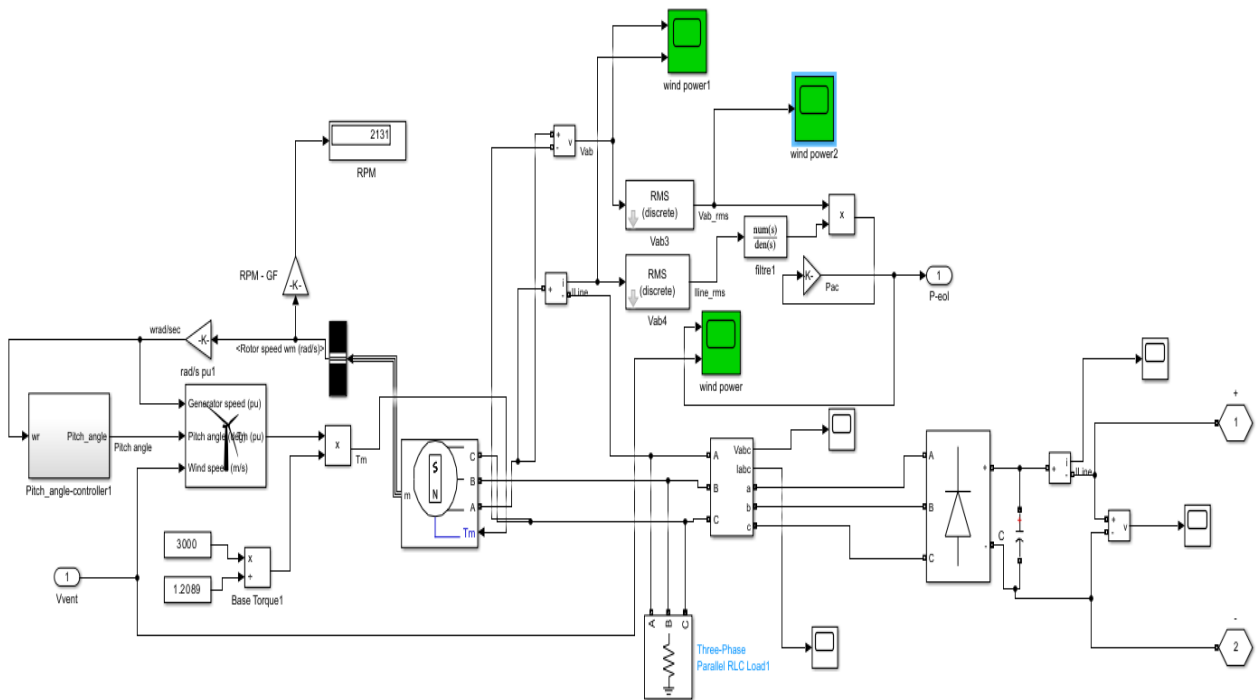


Figure III.3 : Schéma bloc de système éolien

III.3.2 Système de stockage et de conversion : électrolyseur, réservoir et pile à combustible :

Le système de stockage d'énergie est basé sur la production et l'utilisation d'hydrogène vert : La figure (III.4) représente l'électrolyseur qui transforme l'électricité excédentaire (provenant du PV ou de l'éolienne) en hydrogène par électrolyse de l'eau. Son fonctionnement dépend de la disponibilité en énergie et des besoins du réservoir.

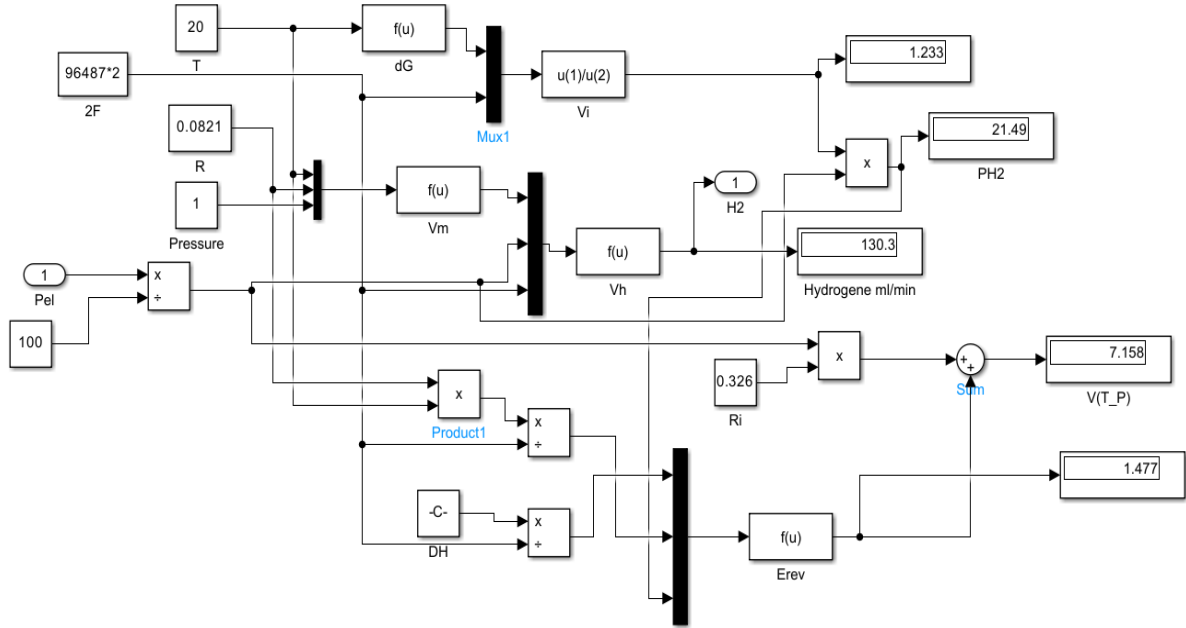


Figure III.4 : Schéma bloc d'un électrolyseur

- La figure (III.5) représente le réservoir d'hydrogène qui stocke le H_2 produit pour une utilisation ultérieure. Son niveau varie selon les phases de production (par l'électrolyseur) et de consommation (par la pile).

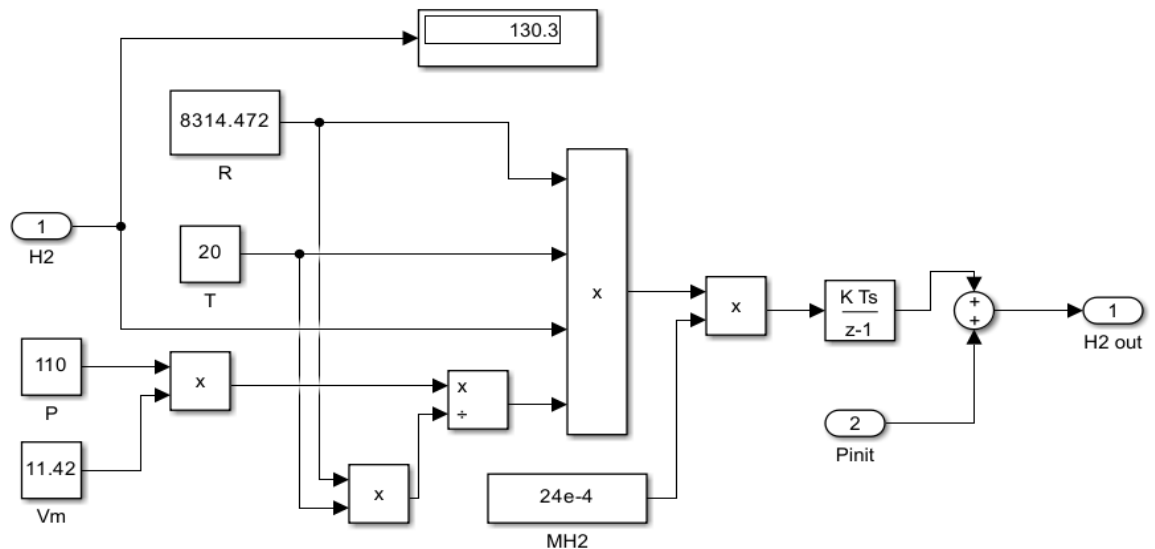


Figure III.5 : Schéma bloc d'un réservoir d'hydrogène

- La figure (III.6) représente la pile à combustible (PAC), son rôle est de reconvertit l'hydrogène en électricité en période de faible production renouvelable, assurant ainsi la continuité d'alimentation de la charge.

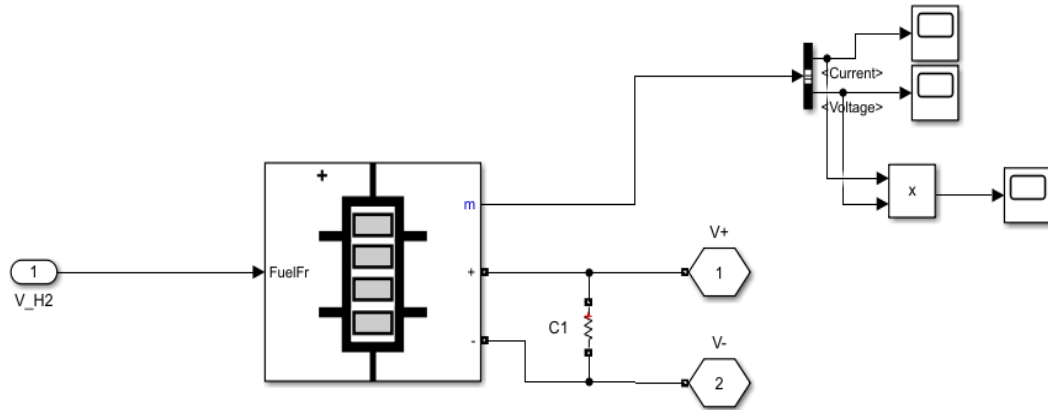


Figure III.6 : Schéma bloc d'une pile à combustible

Ce sous-système assure l'autonomie énergétique en compensant les variations de la production renouvelable.

III.3.3 Gestion des puissances :

La gestion de puissance joue un rôle central dans le bon fonctionnement du système hybride. Ce bloc contrôle les flux d'énergie entre les différentes sources (PV, éolienne, pile à combustible), le stockage (électrolyseur et réservoir) et la charge. Il prend des décisions en temps réel selon la situation énergétique du système qui est représenté dans l'organigramme suivant :

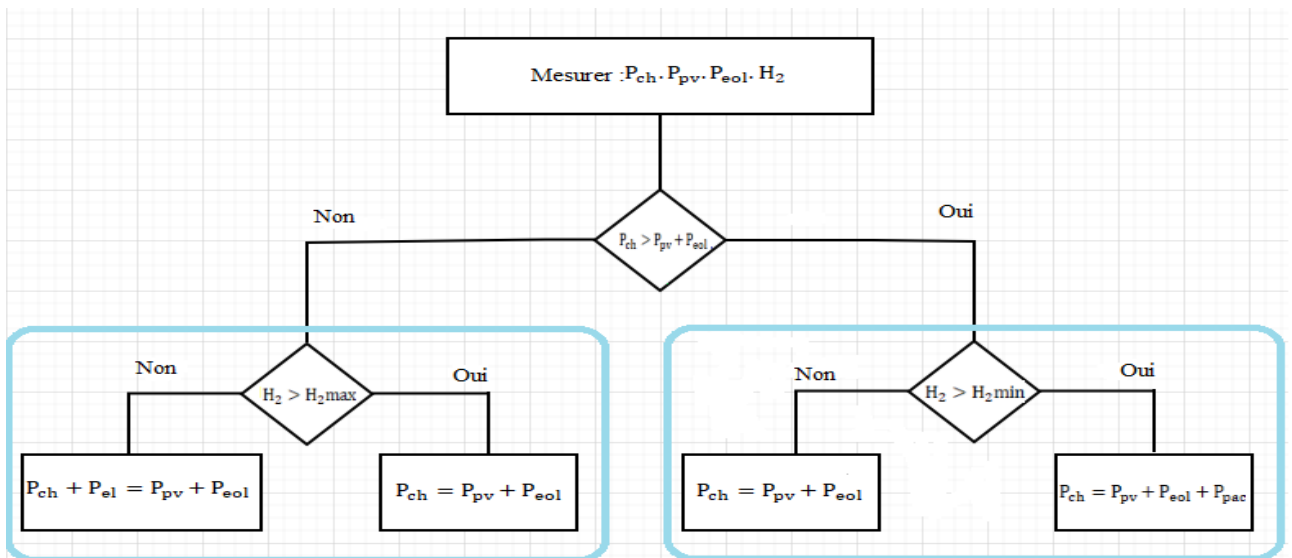


Figure III.7 : organigramme de la gestion des puissances

L'objectif est d'assurer l'alimentation de la charge (P_{ch}) en combinant les différentes sources d'énergie (PV, éolienne, pile à combustible) tout en gérant la production et le stockage d'hydrogène (H_2).

Étape 1 : Mesure des grandeurs

Le système commence par mesurer :

- P_{ch} : la puissance demandée par la charge,
- P_{pv} : la puissance produite par le photovoltaïque,
- P_{eol} : la puissance produite par l'éolienne,
- H_2 : la quantité d'hydrogène disponible dans le réservoir.

Étape 2 : Comparaison entre production renouvelable et charge

Condition : $P_{ch} > P_{pv} + P_{eol}$

Cette condition détermine si la production renouvelable est insuffisante pour alimenter la charge.

- **Oui** → le système entre dans le mode déficit (besoin de source complémentaire : pile à combustible).
- **Non** → le système est en surplus (possibilité d'alimenter l'électrolyseur pour stocker l'hydrogène).

Cas 1 : Production insuffisante $P_{ch} > P_{pv} + P_{eol}$

Vérifie si le réservoir est vide :

Condition : $H_2 > H_{2min}$

- **Oui** : assez d'hydrogène → on active la pile à combustible.

Action : $P_{ch} = P_{pv} + P_{eol} + P_{pac}$

- **Non** : plus assez d'hydrogène

Action : $P_{ch} = P_{pv} + P_{eol}$

Cas 2 : Surplus de production $P_{ch} < P_{pv} + P_{eol}$

Vérifie si le réservoir est plein :

Condition : $H_2 > H_{2max}$

- **Oui** : le réservoir est plein → on n'alimente pas l'électrolyseur, on envoie juste l'énergie vers la charge.

Action : $P_{ch} = P_{pv} + P_{eol}$

(le surplus est ignoré ou envoyé vers une autre charge éventuelle)

- **Non** : le réservoir peut encore stocker → on active l'électrolyseur.

Action : $P_{ch} + P_{el} = P_{pv} + P_{eol}$

(la production alimente la charge et l'électrolyseur)

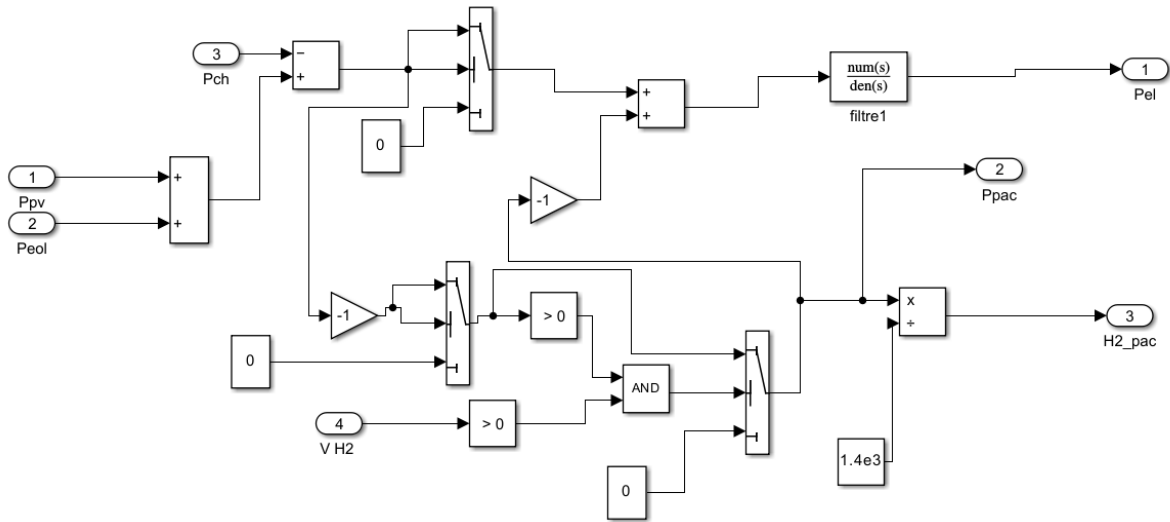


Figure III.8 : schéma bloc de la gestion de puissance

III.4 Hypothèses de simulation :

Afin de simuler le comportement du système hybride de production, de stockage et de gestion de l'hydrogène vert, certaines hypothèses et conditions initiales ont été définies. Ces hypothèses permettent de représenter des situations réalistes tout en simplifiant certains aspects complexes du fonctionnement réel. Elles concernent les conditions environnementales et la charge.

III.4.1 Conditions environnementales :

Dans le cadre de cette étude, une simulation a été réalisée sur une période d'une heure afin d'observer le comportement du système sous différentes conditions environnementales. Les hypothèses suivantes ont été adoptées :

III.4.1.1 Durée de la simulation :

La simulation s'étale sur une durée d'une heure, correspondant à une tranche horaire choisie aléatoirement en journée, afin de représenter des conditions météorologiques typiques.

III.4.1.2 Irradiation solaire :

Le profil d'irradiation solaire a été défini manuellement et évolue de manière discrète en paliers durant l'heure simulée.

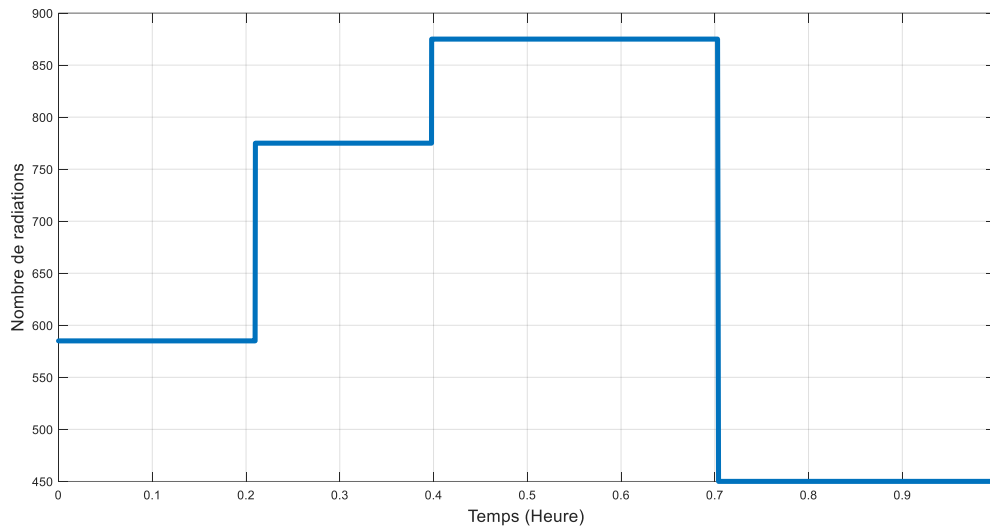


Figure III.9 : Nombre de radiations (W/m²)

Ce profil permet de simuler l'effet de variations de l'ensoleillement sur la production d'énergie par les panneaux photovoltaïques.

III.4.1.3 Vitesse de vent :

- La vitesse du vent a été simulée sous forme de variation continue et aléatoire, avec des fluctuations naturelles.
- Cette approche vise à représenter des conditions réalistes de fonctionnement d'une éolienne durant une courte période avec des rafales variables.
- Ces variations influencent directement la puissance générée par le générateur éolien dans le système hybride

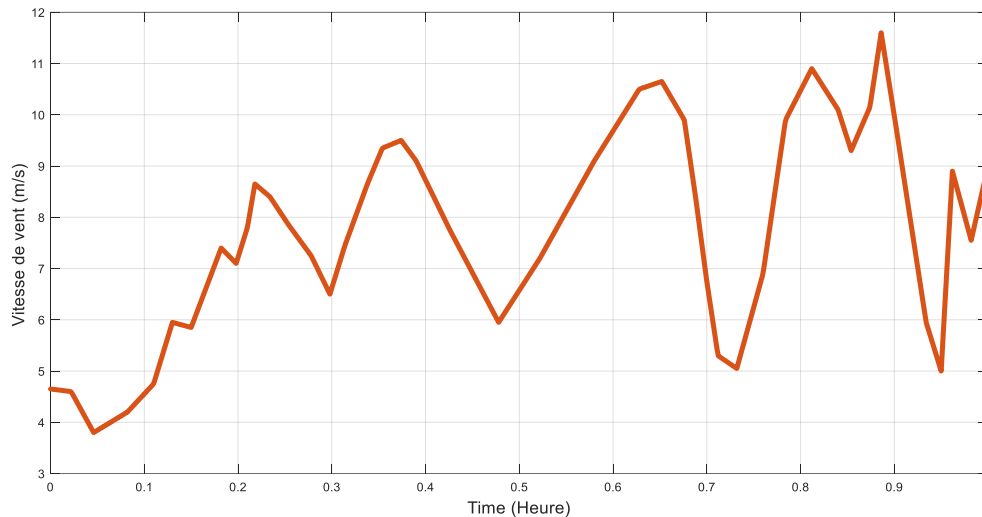


Figure III.10: vitesse de vent

III.4.1.4 Température ambiante et autres facteurs climatiques :

- La température a été supposée constante à 25°C pour simplifier l'analyse et ne pas alourdir la simulation.
- L'humidité, la pression atmosphérique ou autres facteurs n'ont pas été pris en compte dans ce modèle.

III.4.2 Hypothèses sur la charge :

Type de charge : l'intégrité de notre station de production. La puissance demander est supposé dans la figure III.11

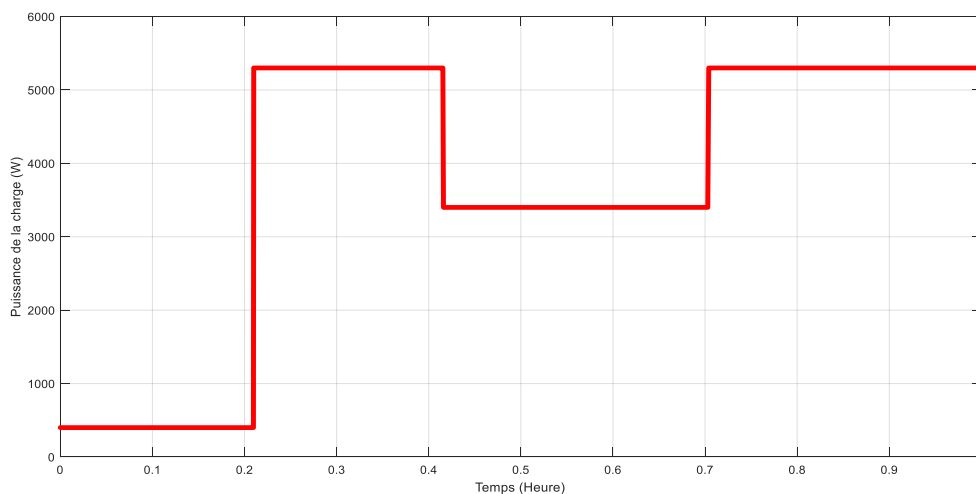


Figure III.11 : Puissance demander

III.4.3 Paramètres de simulation :

- **Durée de simulation** : 24 heures (profil journalier)
- **Pas de simulation** : 1 seconde (afin de capturer les variations dynamiques)
- **Logiciel utilisé** : MATLAB/Simulink (version R2023a), avec Simscape pour les composants électriques

III.4.4 Hypothèses simplificatrices :

- Les pertes dans les câbles et les convertisseurs sont négligés.
- La réponse dynamique des composants est supposée instantanée.
- La production PV et éolienne suit un profil prédéfini, sans variabilité aléatoire.
- L'eau pour l'électrolyse est supposée disponible en quantité suffisante et pure

III.5 Résultats de simulation :

Après l'analyse des profils de l'irradiation solaire et de la vitesse du vent, cette section présente les puissances électriques générées par les deux sources renouvelables, et leur utilisation dans le processus de production d'hydrogène par électrolyse.

III.5.1 Puissance solaire générée :

La puissance fournie par le générateur photovoltaïque est proportionnelle à l'irradiation solaire et dépend également du rendement des panneaux, et la tension V_{dc} de la charge. Le profil d'irradiation utilisé donne les puissances suivantes :

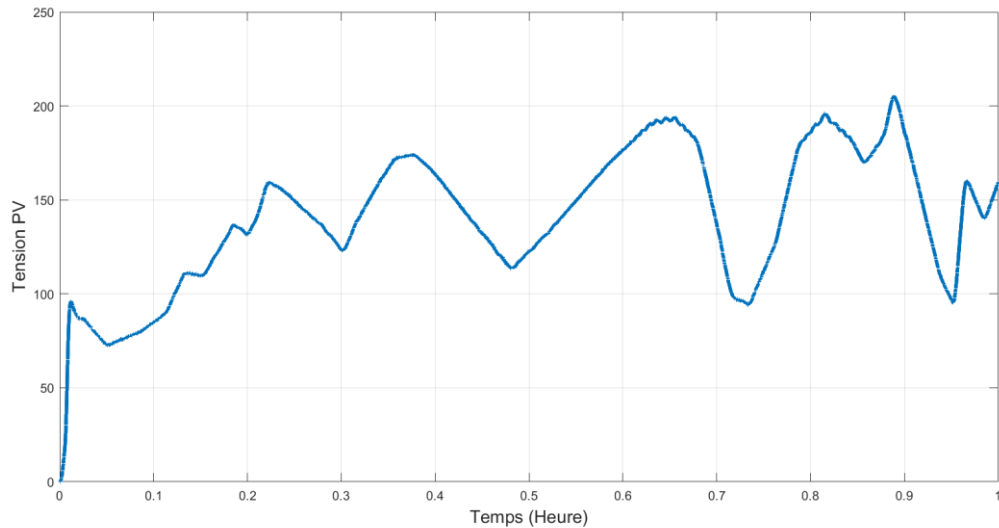


Figure III.12 : Tension générée par le système photovoltaïque

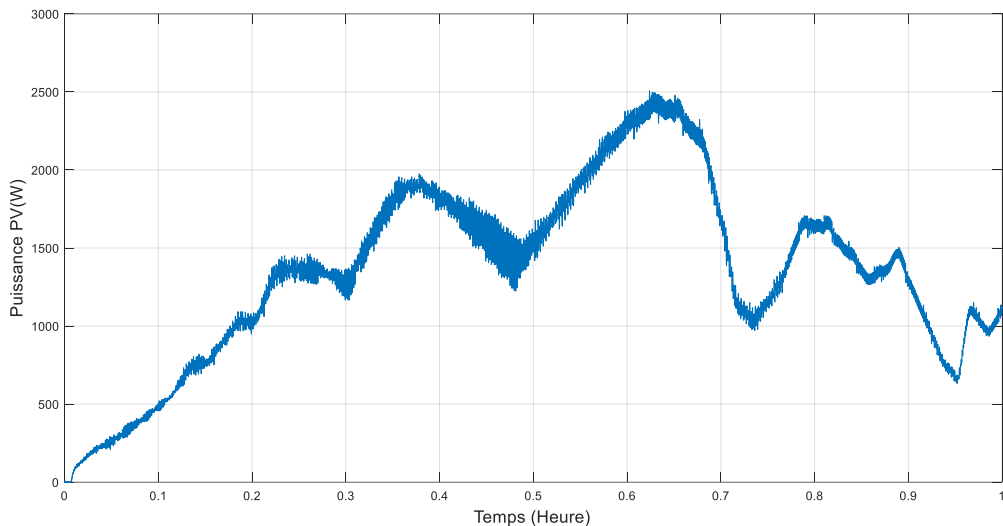


Figure III.13 : Puissance instantanée délivrée par le système photovoltaïque

On observe que la puissance générée par le champ photovoltaïque varie en fonction de l'irradiation solaire simulée. La puissance augmente lorsque l'irradiation est élevée (jusqu'à un pic vers 880 W/m²), traduisant le bon rendement du générateur sous un ensoleillement optimal. À l'inverse, les chutes d'irradiation entraînent une diminution rapide de la puissance produite.

Cette variabilité met en évidence l'intermittence naturelle de la source solaire, ce qui justifie l'intérêt de la combiner avec une autre source pour assurer une alimentation plus stable de l'électrolyseur.

III.5.2 Puissance éolienne générée :

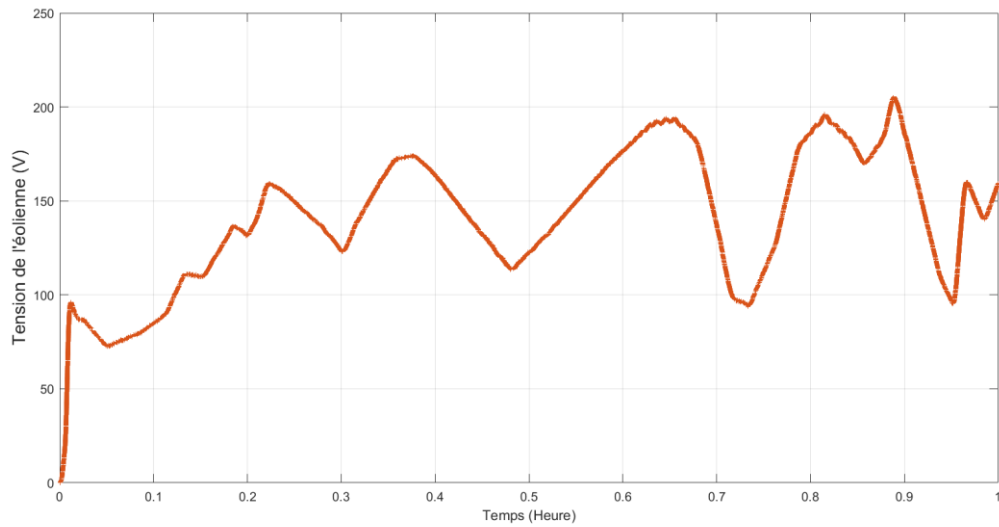


Figure III.14 : Tension générée par le système éolienne

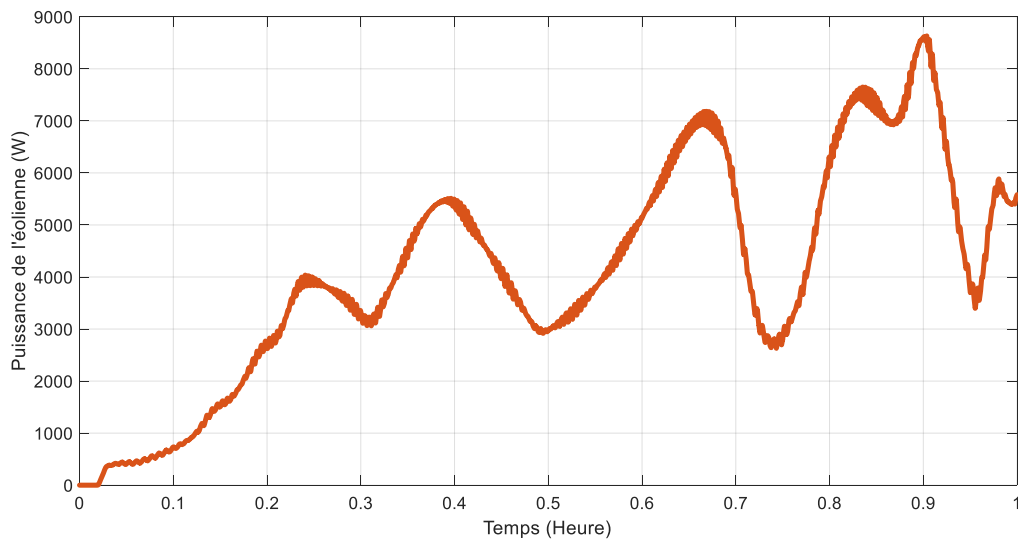


Figure III.15 : puissance générée par le système éolienne

La tension et la puissance produite par l'éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. En utilisant le profil supposé :

- La puissance varie fortement en raison des fluctuations rapides de la vitesse du vent.
- Les pics de vitesse (jusqu'à ~ 11.7 m/s) permettent d'atteindre des puissances élevées temporairement.
- Durant les creux (3.8 – 5 m/s), la puissance est plus faible, mais reste suffisante pour maintenir un fonctionnement minimal.

III.5.3 Résultats de l'électrolyseur :

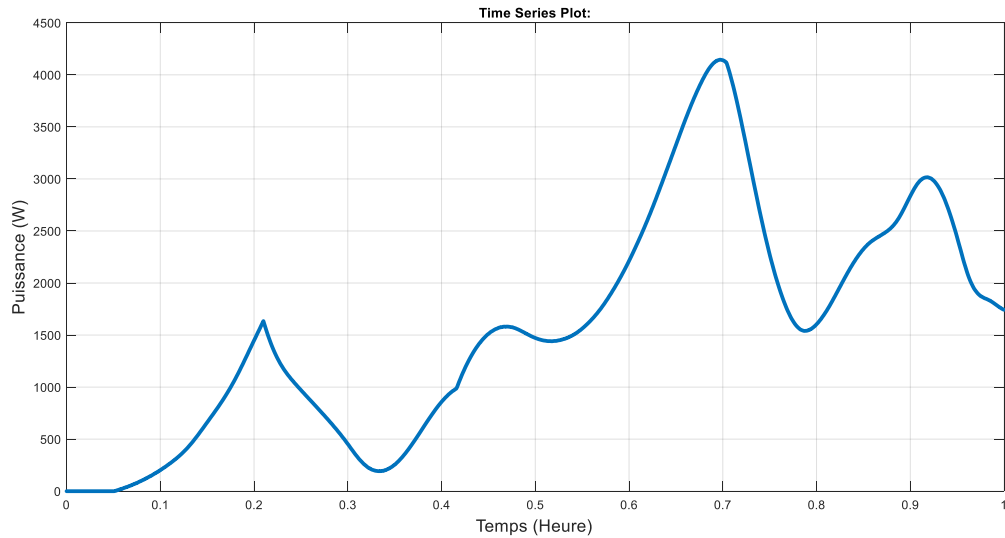


Figure III.16 : la puissance fournie à l'électrolyseur

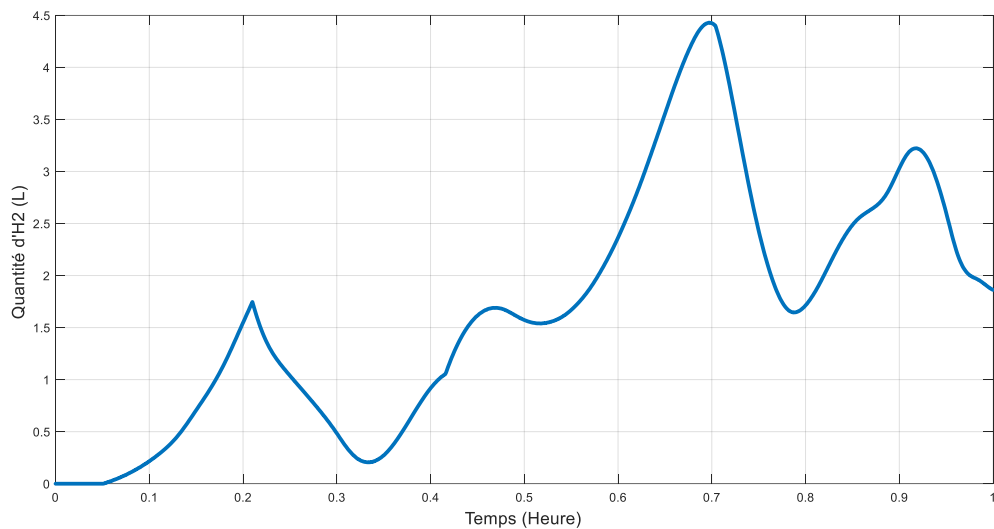


Figure III.17 : quantité d'H2 produite par l'électrolyseur

On observe que la production d'hydrogène par l'électrolyseur suit proportionnellement la puissance électrique qui lui est fournie. Plus la puissance injectée est élevée, plus le débit de production d'hydrogène augmente, traduisant une bonne réactivité du système et un fonctionnement cohérent avec la gestion énergétique.

III.5.4 Comportement du réservoir d'hydrogène :

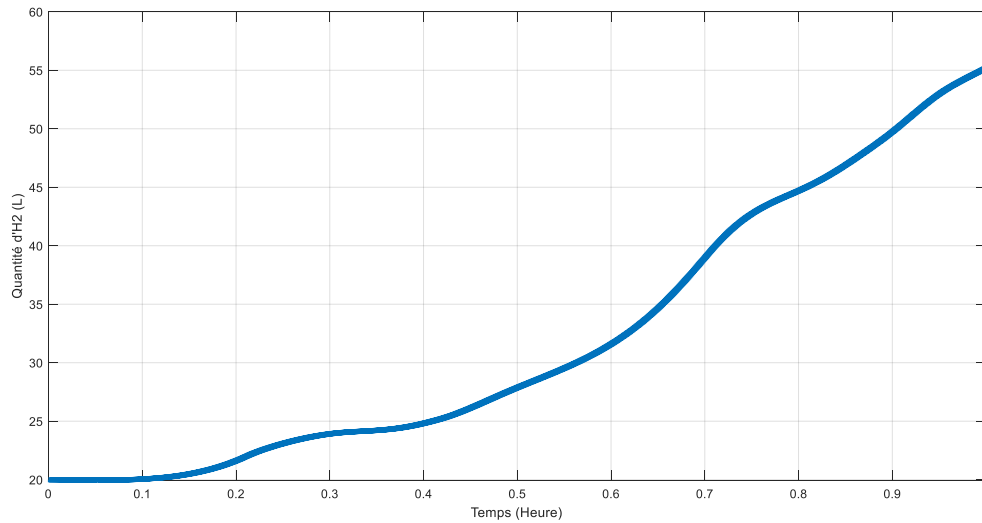


Figure III.18 : quantité d'H2 dans le réservoir

On observe, dans certaines séquences de la simulation, une stabilisation temporaire de la quantité d'hydrogène dans le réservoir, ce qui peut s'expliquer par plusieurs phénomènes :

- La consommation d'hydrogène par la pile à combustible, qui puise dans le réservoir pour alimenter la charge lorsque la production renouvelable est insuffisante.
- L'arrêt progressif de la production d'hydrogène par l'électrolyseur, imposé par la stratégie de gestion énergétique du système.
- Ce ralentissement n'est pas immédiat : l'électrolyseur continue à produire une petite quantité d'hydrogène, ce qui explique que la courbe de stockage ne chute pas brutalement, mais montre plutôt une phase de transition douce.
- Cette inertie du système est un comportement normal, lié aux caractéristiques dynamiques de l'électrolyseur.

III.5.5 Résultats de la pile à combustible (PAC) :

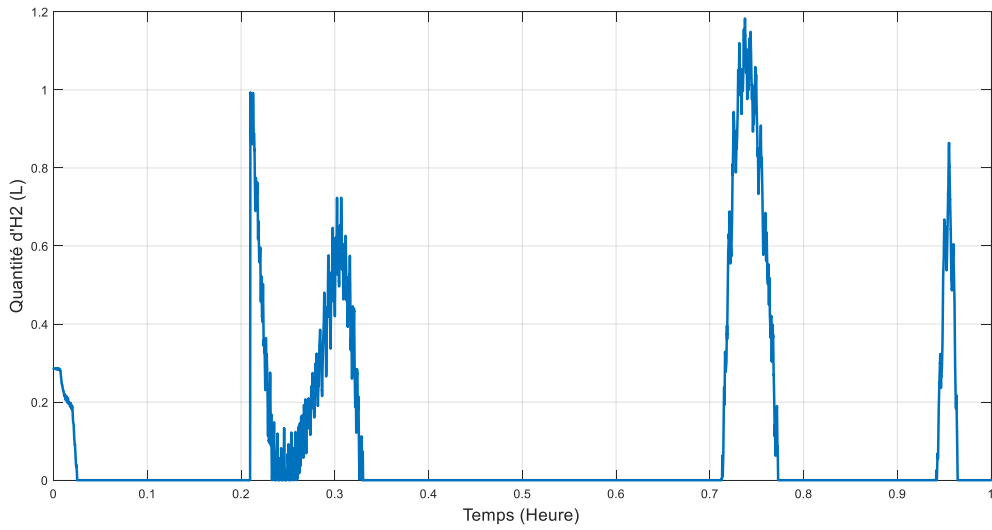


Figure III.19 : quantité d'H₂ fournie à la pile

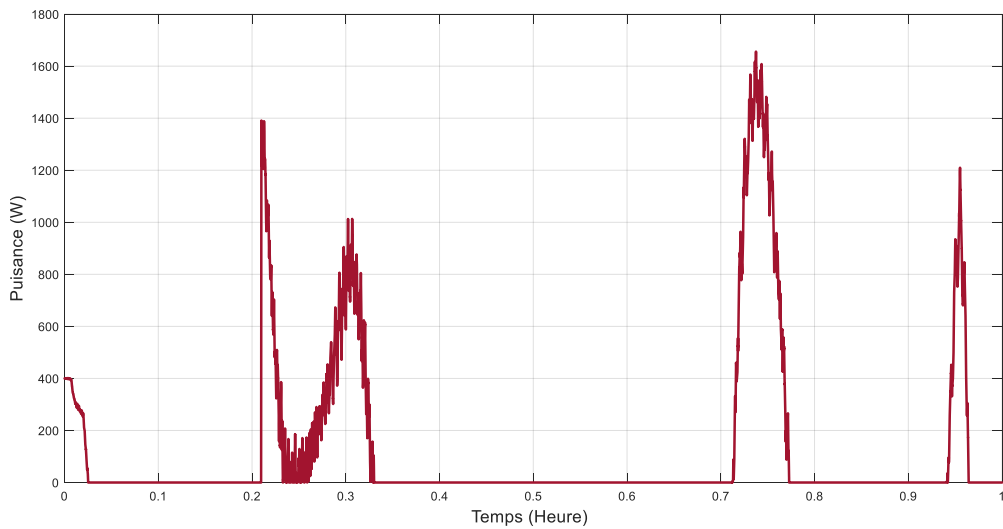


Figure III.20 : Puissance générée par la pile

- La première figure illustre la quantité d'hydrogène extraite du réservoir et fournie à la pile à combustible. On observe que les périodes d'utilisation de l'hydrogène correspondent exactement aux phases où la courbe de stockage dans le réservoir cesse d'augmenter, voire se stabilise. Cela indique une synchronisation entre la consommation par la PAC et l'arrêt de production par l'électrolyseur, confirmant l'efficacité de la gestion énergétique.
- La deuxième figure met en évidence que la puissance électrique générée par la pile à combustible est directement liée à la quantité d'hydrogène qui lui est injectée. En effet, on constate une augmentation de la puissance de sortie de la PAC en parallèle

avec l'accroissement du débit d'alimentation en hydrogène, ce qui est caractéristique du fonctionnement proportionnel d'une pile à combustible en régime dynamique.

III.5.6 Résultats de la gestion de puissance :

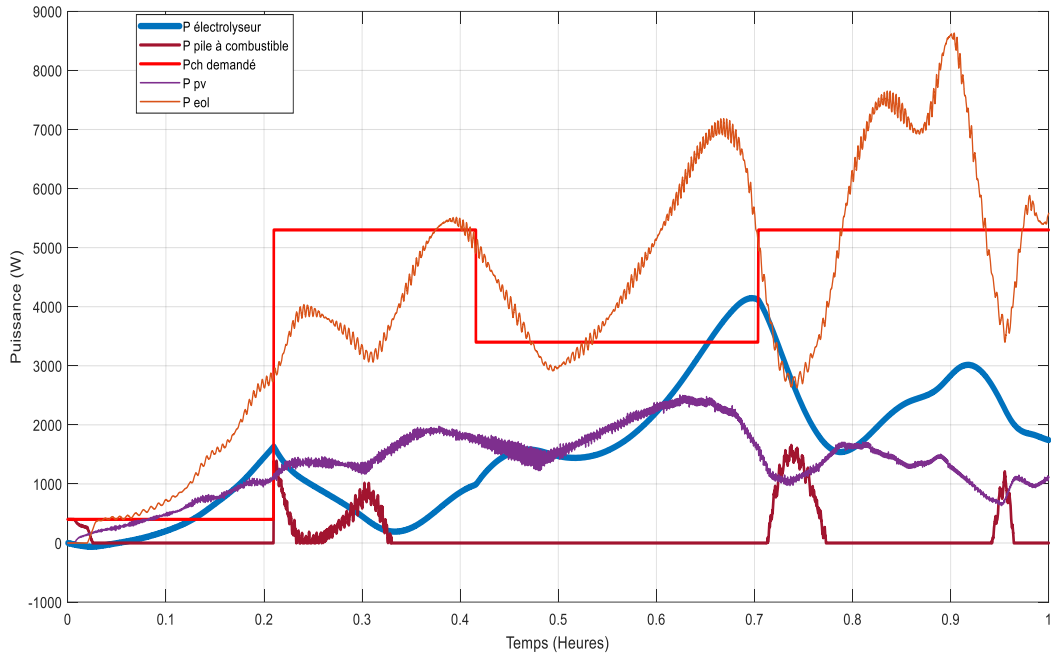


Figure III.21 : les puissances de système simulée

L'analyse du comportement de la pile à combustible (PAC) montre qu'elle intervient principalement dans deux situations bien définies :

- Lorsque la puissance électrique demandée par la charge est supérieure à celle fournie par les générateurs renouvelables (photovoltaïque et éolien).
- Lorsque le réservoir contient une quantité suffisante d'hydrogène permettant l'activation de la PAC.

Dans ces conditions, la PAC prend le relais pour compenser le déficit de puissance et assurer la continuité de l'alimentation. On observe alors que l'électrolyseur cesse de fonctionner, en raison d'une priorité donnée à la charge dans la stratégie de gestion énergétique : toute l'énergie disponible est redirigée vers la charge, ce qui rend insuffisante la puissance pour produire de l'hydrogène.

Inversement, lorsque la puissance produite par les sources renouvelables dépasse les besoins de la charge, plusieurs éléments se vérifient :

- La consommation d'hydrogène par la pile devient nulle, car celle-ci n'est plus sollicitée.

- La puissance électrique délivrée par la PAC tombe à zéro.
- L'électrolyseur est alimenté, et commence alors à produire de l'hydrogène, ce qui se traduit par une augmentation progressive de la quantité stockée dans le réservoir.

Ce comportement global valide le bon fonctionnement du système de gestion de puissance, qui optimise intelligemment l'utilisation des ressources en priorisant la charge, en exploitant l'hydrogène stocké lorsque nécessaire, et en réinjectant l'excédent d'énergie dans la production d'hydrogène.

III.6 Conclusion :

En conclusion, les résultats de simulation ont permis de valider le bon fonctionnement du système hybride proposé. La gestion de puissance assure une coordination efficace entre les sources renouvelables, l'électrolyseur, le réservoir d'hydrogène et la pile à combustible. Le comportement dynamique du système montre que la production et la consommation d'hydrogène s'adaptent aux conditions énergétiques, garantissant une alimentation continue de la charge. Ces résultats confirment la faisabilité d'une station autonome basée sur l'hydrogène vert et l'intégration intelligente des énergies renouvelables.

Conclusion Générale

IV.1 Conclusion générale :

Ce mémoire a porté sur l'étude, la modélisation et la simulation d'un système de production d'hydrogène vert à partir d'énergies renouvelables, dans l'objectif de proposer une solution durable pour l'alimentation énergétique autonome.

Dans une première étape, nous avons présenté les aspects fondamentaux liés à la production, au stockage et à l'utilisation de l'hydrogène, en mettant en avant son rôle central dans la transition énergétique. Ensuite, nous avons développé un modèle complet combinant une source photovoltaïque, une éolienne, un électrolyseur, un réservoir de stockage et une pile à combustible, tous pilotés par une stratégie de gestion intelligente de la puissance.

Les résultats de simulation sous MATLAB/Simulink ont confirmé la cohérence du système. Ils montrent que la gestion énergétique assure un équilibre fiable entre production, consommation et stockage, tout en garantissant l'alimentation continue de la charge.

Ainsi, ce travail met en évidence le potentiel technologique des systèmes hybrides basés sur l'hydrogène vert, tout en ouvrant la voie à de futures études expérimentales et à une optimisation plus poussée des performances en conditions réelles.

En guise de perspectives nous proposons de :

- Ajouter un système de stockage électrochimique pour le système hybride.
- Utiliser un autre type d'électrolyse de l'eau (alcalin) et comparer les résultats.
- Intégrer des techniques d'MPPT pour les systèmes de production d'hydrogène.

Références bibliographiques

BIBLIOGRAPHIE

- [01]: McDowall, W., & Eames, M. (2007). Towards a sustainable hydrogen economy: A multi-criteria sustainability appraisal of competing hydrogen futures. *International journal of hydrogen energy*, 32(18), 4611-4626.
- [02]: Züttel, A. (2004). "Hydrogen Storage Methods". *Naturwissenschaften*, 91(4), 157-172: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00114-004-0516-x>
- [03]: Dutta, S. (2014). A review on production, storage of hydrogen and its utilization as an energy resource. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(4), 1148-1156.
- [04]: Gao, S., Wang, X., Liu, H., He, T., Wang, Y., Li, S., et al. "Effects of nano-composites (FeB, FeB/CNTs) on hydrogen storage properties of MgH₂." *Journal of Power Sources* 438 (2019) : 227006.
- [05]: Pudukudy, M., Yaakob, Z., Mohammad, M., Narayanan, B., & Sopian, K. "Renewable hydrogen economy in Asia—Opportunities and challenges: An overview." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 30 (2014): 743-757.
- [06]: Sun, Z., Lu, X., Nyahuma, F. M., Yan, N., Xiao, J., Su, S., & Zhang, L. "Enhancing hydrogen storage properties of MgH₂ by transition metals and carbon materials: abriefreview." *Frontiers in Chemistry* 8 (2020): 552.
- [07]: Eberle, Ulrich, Michael Felderhoff, and Ferdi Schueth. "Chemical and physical solutions for hydrogen storage." *Angewandte Chemie International Edition* 48.36 (2009): 6608-6630.
- [08] : Roquefere, Jean-Gabriel. Nouveaux intermétalliques ternaires à base de magnésium pour le stockage de l'hydrogène. Doctoral dissertation, Université Sciences et Technologies Bordeaux I, 2009.
- [09]: Kibria, A. F., Mo, Y. H., Park, K. S., Nahm, K. S., & Yun, M. H. (2001). Electrochemical hydrogen storage behaviors of CVD, AD and LA grown carbon nanotubes in KOH medium. *International Journal of hydrogen energy*, 26(8), 823-829.

- [10] : Gondor, G. (2008). Pour le stockage de l'hydrogène : Analyse thermodynamique de la formation d'hydrures métalliques et optimisation du remplissage d'un réservoir (Doctoral dissertation, Université de Franche-Comté).
- [11] : Khadraoui, A. (2018). Étude ab initio du stockage d'hydrogène dans l'intermétallique TiFe (Thèse de doctorat).
- [12]: IEA (2021). "World Energy Outlook 2021 - Special Report on Solar Energy". Agence Internationale de l'Énergie <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
- [13] : Dr. S.BELAID Maître de conférence classe B : “Cours Energie Solaire Photovoltaïque” Université de Bejaia 2014/2015
- [14]: Green, M.A. (2022). "Solar Cells: From Basics to Advanced Systems". Elsevier, p.45-48
- [15] : ADEME. (2020). *Les systèmes photovoltaïques autonomes*. [En ligne] Disponible sur : www.ademe.fr
- [16] : ADEME (Agence de la Transition Écologique). (2021). L'éolien : comment ça marche ? www.ademe.fr
- [17] : Khelfat L. & Maataoui L. Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée. Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba
- [18]: Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2021). *Wind Energy Handbook* (3rd ed.). Wiley.
- [19]: Hau, E. (2013). *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics* (3rd ed.)
- [20] : Krimia Adel, (étude d'un système hybride (Eolien-photovoltaïque)), mémoire master : université Badji Mokhtar Annaba, 2020

- [21] : KADI, F., et MOUACI, N. « Etude, Implémentation et Comparaison des techniques MPPT sous ensoleillement uniforme et en cas d'ombrage partiel », Mémoire master de l'Université DE BEJAIA, 2021.
- [22]: F. Liu et al., "*Comparison of P&O and Incremental Conductance MPPT Methods for PV Systems*", Journal of Renewable Energy, vol. 2015, pp. 1-10, 2015.
- [23]: J. Fletcher et B. Yang, "*Maximum Power Point Tracking of Wind Turbines Using Perturbation and Observation*", Renewable Energy, vol. 83, 2015.
- [24]: Atlamand, O., and Kolhe, M. 2011. "Equivalent Electrical Model for a Proton Exchange Membrane (PEM) Electrolyser." Energy Conversion and Management 52 (8): 2952-7.
- [25]: Wang, C. 2006. "Modeling and Control of Hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Distributed Generation Systems." Ph.D. thesis, the Montana State University.
- [26]: Beainy, A., Karami, N., and Moubayed, N. 2014. "Simulink Model for a PEM Electrolyzer Based on an Equivalent Electrical Circuit." Renewable Energy 978:145-9.
- [27]: Al-Refai, M. 2014. "MATLAB/Simulink Simulation of Solar Energy Storage System." International Science Index 8 (2): 279-302.
- [28] : Mémoire de fin d'études pour L'obtention du Diplôme de Master Réalisation d'un onduleur à deux niveaux triphasé commandé par MLI vectorielle Préparé par : Mr : Chehb Adda Mr : Betta Rabeh
- [29]: Ben Ahmed Bouzid, M., Ghedamsi, K., & Chelbi, F. (2018). *Implémentation sur DSP F28335 des Stratégies de Commande d'un Convertisseur DC/AC* [Mémoire de Master]. Université A. MIRA-BEJAIA, Faculté de Technologie, Département de Génie Electrique.
- [30] : Hananou Fatiha ; Rouabah Aicha, "Modélisation Et Simulation D ' Un Système Photovoltaïque", Mémoire Master Académique : Université Kasdi Merbah Ouargla, 2014.

Bibliographie

[31] : Achour Abderraouf, "Analyse Et Commande D ' Un Hacheur Buck- Boost", Mémoire De Master : Université Mohamed Khider De Biskra, 2018.

Production et stockage d'hydrogène par électrolyse de l'eau

Résumer :

Ce mémoire explore la production d'hydrogène vert par électrolyse de l'eau, alimentée par des énergies renouvelables (solaire photovoltaïque et éolien). Le premier chapitre présente les principes fondamentaux liés à la production et au stockage de l'hydrogène dans le cadre de la transition énergétique. Le deuxième chapitre propose la modélisation d'un système hybride comprenant un électrolyseur, un réservoir de stockage, une pile à combustible et un dispositif de gestion de l'énergie. Le troisième chapitre expose les résultats de simulations sous MATLAB/Simulink, validant les performances du système en matière de production, de stockage et d'exploitation de l'hydrogène. Les simulations confirment la viabilité d'une solution énergétique autonome, propre et durable basée sur l'hydrogène vert.

Mots-clés :

Hydrogène vert, Électrolyse de l'eau, Énergies renouvelables, Pile à combustible, Photovoltaïque, Éolienne, Stockage d'hydrogène, Système hybride, Gestion de puissance, Transition énergétique, Production décentralisée, Autonomie énergétique.

إنتاج وتخزين الهيدروجين عن طريق تحليل الماء كهربائياً

الملخص

يركز هذا البحث على إنتاج الهيدروجين الأخضر من خلال تحليل الماء كهربائياً باستخدام مصادر الطاقات المتجددة مثل الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح. يقدم الفصل الأول الأسس النظرية لإنتاج وتخزين الهيدروجين، مع إبراز أهميته في سياق التحول الطاقوي. يتناول الفصل الثاني نمذجة نظام هجين يضم محلل كهربائي، خزان تخزين، خلية وقود، ونظام إدارة للطاقة. أما الفصل الثالث، فيعرض نتائج المحاكاة، والتي تؤكد على فعالية النظام وأدائه. وتُظهر النتائج إمكانية تحقيق حل طاقي نظيف، ذاتي التشغيل، باستخدام MATLAB/Simulink برنامج ومستخدم قائم على الهيدروجين الأخضر.

الكلمات المفتاحية

الهيدروجين الأخضر، التحليل الكهربائي للماء، الطاقات المتجددة، خلية الوقود، الطاقة الشمسية الكهروضوئية، طاقة الرياح، تخزين الهيدروجين، النظام الهجين، إدارة الطاقة، التحول الطاقوي، الإنتاج اللامركزي، الاستقلالية الطاقوية.

Production and Storage of Hydrogen by Water Electrolysis

Abstract:

This research focuses on the production of green hydrogen through water electrolysis powered by renewable energy sources such as photovoltaic solar and wind energy. The first chapter introduces the theoretical foundations of hydrogen production and storage, emphasizing their relevance to the energy transition. The second chapter presents the modeling of a hybrid system comprising an electrolyzer, a storage tank, a fuel cell, and a power management system. The third chapter details the simulation results obtained using MATLAB/Simulink, which validate the operation and performance of the proposed system. The results demonstrate the feasibility of a clean, autonomous, and sustainable energy solution based on green hydrogen.

Keywords:

Green hydrogen, Water electrolysis, Renewable energy, Fuel cell, Photovoltaic, Wind turbine, Hydrogen storage, Hybrid system, Power management, Energy transition, Decentralized production, Energy autonomy.