

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Témouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département de Génie Mécanique



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Energétique
Domaine : Sciences et de Technologie
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Energétique
Thème

Simulation de mini-réseaux autonomes : Intégration des énergies renouvelables avec des éoliennes, des piles à combustible et des électrolyseurs.

Présenté Par :

- BOUROUIS Mebarek
- EMTIR Noredine

Devant le jury composé de :

Dr. BOUNIF Abdelhamid	PR	UAT.B. B (Ain Témouchent)	Président
Dr. NEHARI Tayeb	MCA	UAT.B. B (Ain Témouchent)	Examineur
Dr. REMLAOUI Ahmed	MCA	UAT.B. B (Ain Témouchent)	Encadrant

Année Universitaire 2024/2025

Remerciement

Je remercie mon dieu, le tout puissant de m'avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

*Tout d'abord ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le sans l'aide et l'encadrement de notre Professeur monsieur **Dr. REMLAOUI Ahmed**. Je le remercie pour sa qualité de savoir, qui nous a été transmise, sa patience et sa disponibilité durant mon préparation de ce mémoire.*

Un remerciement à toutes les personnes qui m'a aidé à la réalisation de ce travail sois de près ou de loin.

J'adresse également mon remerciement aux enseignants qui m'a fait l'honneur de participer au jury de ce mémoire.



Dédicace




Nous dédions ce travail

*Aux personnes les plus chers à nos Cœur, nos parent qui nous a
beaucoup soutenu Durant notre Coursus d'étude et à qui on sera
Eternellement reconnaissant.*

A nos frères et nos sœurs,

A toute la famille.

A nos amies et nos collègues



Résumé :

En concordance avec le développement technologique dans le domaine des énergies renouvelables et les besoins croissants en électricité dans les zones isolées, les mini-réseaux autonomes représentent une solution énergétique durable. L'analyse et l'étude paramétrique de ces systèmes permettent d'améliorer leur performance et d'optimiser leur production d'énergie.

À cet effet, ce travail porte sur la simulation d'un mini-réseau autonome intégrant des éoliennes, des électrolyseurs, des piles à combustible ainsi qu'un système de stockage d'hydrogène. L'étude est réalisée sous les conditions climatiques de la région de Aïn Témouchent, à travers deux journées types : le 21 février (hiver) et le 21 juillet (été).

La simulation a été réalisée à l'aide du logiciel TRNSYS, permettant une modélisation précise du système. Ce travail a permis de mieux comprendre le fonctionnement d'un mini-réseau éolien-hydrogène et de proposer des pistes d'optimisation pour améliorer son autonomie énergétique.

Mots clés : Energies renouvelables, mini-réseaux, système hybride, énergie éolienne, pile à combustible, électrolyseur, hydrogène, TRNSYS, simulation, stockage d'énergie.

Abstract:

In line with technological developments in the field of renewable energies and the growing need for electricity in isolated areas, off-grid systems represent a sustainable energy solution. The analysis and parametric study of these systems allow for improved performance and optimized energy production.

To this end, this work focuses on the simulation of an off-grid system integrating wind turbines, electrolyzers, fuel cells, and a hydrogen storage system. The study is conducted under the climatic conditions of the Aïn Témouchent region, across two typical days: February 21 (winter) and July 21 (summer).

The simulation was performed using TRNSYS software, which allows for accurate system modeling. This work provided a better understanding of the operation of a wind-hydrogen mini-grid and suggested optimization options to improve its energy autonomy.

Keywords: Renewable energy, microgrids, hybrid system, wind energy, fuel cell, electrolyzer, hydrogen, TRNSYS, simulation, energy storage.

المستخلص:

تمشيا مع التطورات التكنولوجية في مجال الطاقة المتجددة والحاجة المتزايدة للكهرباء في المناطق المعزولة، تمثل الشبكات الصغيرة المستقلة حلاً مستداماً للطاقة. إن تحليل ودراسة هذه الأنظمة يجعل من الممكن تحسين أدائها وتحسين إنتاجها للطاقة.

ولتحقيق هذه الغاية، يركز هذا العمل على محاكاة شبكة صغيرة مستقلة تجمع بين توربينات الرياح وأجهزة التحليل الكهربائي وخلايا الوقود ونظام تخزين الهيدروجين. تتم الدراسة في ظل الظروف المناخية لمنطقة عين تموشنت، من خلال يومين نموذجيين: 21 فبراير (الشتاء) و21 يوليو (الصيف).

تم إجراء المحاكاة باستخدام برنامج TRNSYS، مما يسمح بالنمذجة الدقيقة للنظام. لقد مكنتنا هذا العمل من فهم أفضل لكيفية عمل شبكة الرياح والهيدروجين الصغيرة واقتراح طرق لتحسينها لتحسين استقلاليتها في مجال الطاقة.

الكلمات المفتاحية: الطاقات المتجددة، الشبكات المصغرة، النظام الهجين، الطاقة الريحية، خلية الوقود، المحلل الكهربائي، الهيدروجين، TRNSYS، المحاكاة، التخزين الطاقوي

Sommaire

Remerciement	I
Dédicaces	II
Résumé	III
Sommaire	IV
Liste des figures	IX
Liste des tableau	X
Nomenclature	XI
Introduction	1

Chapitre I : Recherche bibliographique

Introduction	3
I.1 les mini-réseaux autonomes	3
I.1.1. Définition :	4
I.1.2. Application	4
I.2. Les énergies renouvelables dans les mini-réseaux.....	4
I.2.1. Eoliennes	4
I.2.1.1. Type des turbines éoliennes :.....	5
I.2.1.2. Principe.....	7
I.2.1.3. Défis.....	7
I.2.2. Electrolyseur.....	9
I.2.2.1. Types d'électrolyseur	10
I.2.2.2. Production et stockage de l'hydrogène.....	13
I.2.3. Piles à combustibles :	14
I.2.3.1. Fonctionnement :	15
I.2.3.2. Avantages	16
I.3. Outils de simulation des systèmes énergétiques	18
I.3.1. Présentation de TRNSYS	18
I.3.2. Comparaison avec des autres outils (HOMER, MATLAB/Simulink, etc.)	19

Sommaire

I.4. Études antérieures sur l'intégration des énergies renouvelables dans les mini-réseaux	20
I.4.1. L'optimisation des mini-réseaux	20
I.4.2. Le stockage de l'énergie.....	21
I.4.3. Les stratégies de gestion de l'énergie.....	22
Conclusion.....	23

Chapitre II: Description du système étudié

Introduction	24
II.1 Architecture de mini réseau	24
II.1.1. Schéma fonctionnel du système	24
II.1.2. Interactions entre les composants	24
II.2. Composants de système.....	25
II.2.1. Eolienne	25
II.2.1.1. Modélisation.....	25
II.2.1.2. Paramètre technique	26
II.2.2. Piles à combustible.....	29
II.2.2.1. Rôle	29
II.2.2.2. Caractéristiques	30
II.2.3. Électrolyseurs.....	31
II.2.3.1. Principe de fonctionnement.....	31
II.2.3.2. Intégration	33
II.2.4. Systèmes de stockage (batteries et hydrogène).....	33
II.2.4.1. Le stockage batteries	34
II.2.4.2. Le stockage hydrogène	35
II.3. Données d'entrée pour la simulation	36
II.3.1. Données météorologiques	36
II.3.2. Profil de charge (demande énergétique)	37
Conclusion.....	38

Chapitre III : Modélisation et simulation sous TRNSYS

Introduction	39
III.1 Présentation de TRNSYS	39
III.2. Les applications du TRNSYS.....	40
III.3. Avantages de TRNSYS pour ce projet.....	40
III.4. Description du Mini réseau autonome.....	40
III.5. Description des composants de système sur TRNSYS :	41
III.5.1. Type 90- WECS-éolienne.....	42
III.5.2. Type 160- Electrolyseur	44
III.5.3. Type 167- Compresseur du H2.....	49
III.5.4. Type 164b- Stockage du H2	51
III.5.5. Type 173a- Pile à combustible	52
III.5.6. Type 175a- Onduleurs électriques (DC/AC ou AC/DC).....	54
III.5.7. Type 105a- Contrôles principaux pour un système de mini-réseau éolien-hydrogène	56
III.5.8. Type 150- Contrôleur de sortie retardée.....	57
III.5.9. Type 120a- Modèle générique de moteur diesel (DEGS)	58
III.5.10. Type 15-6- Processeur de données météorologiques.....	58
III.5.11. Type 14h- Fonction de forçage dépendante du temps pour le profil de demande de puissance.....	59
III.5.11.1. Profil journalier normalisé	59
III.5.11.2. Ratios mensuels	60
III.5.11.3. Équation de la Puissance de Charge	61
III.5.12. Type 65c- Traceur graphique en ligne avec fichier de sortie.	61
Conclusion.....	62

Chapitre IV : Résultat de simulation

Introduction	64
IV.1. Données météorologiques.....	64
IV.2. Résultats de simulation de l'éolienne.....	66
IV.2.1. Variation de la puissance générée par l'éolienne et le C_p	66
IV.3. Résultats de simulation de l'électrolyseur	68
IV.3.1. Variation de la température de l'électrolyseur et de refroidissement et le taux d'hydrogène et d'oxygène	68
IV.3.2. Variation de la puissance de (électrolyseur, chaleur générée et stockage) et de l'efficacité (globale, énergétique et faraday)	70
IV.4. Résultats de simulation de La pile à combustible	72
IV.4.1. Variation de la puissance de sortie et l'énergie générée par PAC et la consommation d'air et de H_2	72
IV.5. Résultats de simulation de stockage d'hydrogène	74
IV.5.1. Variation de stockage de gaz en volume et à débit volumétrique, et de stockage de gaz sous pression et sous niveau de pression	74
Conclusion.....	75
Conclusion générale	78
Bibliographie.....

Liste des figures

Chapitre I : Recherche bibliographique

Figure (I. 1) : une mini réseau autonome	4
Figure (I.2) : une éolienne	5
Figure (I.3) : éolienne a axe vertical.....	6
Figure (I.4) : éolienne a axe horizontal	6
Figure (I.5) : Fonctionnement de l'éolienne.....	7
Figure (I.6) : Electrolyseur	10
Figure (I.7) : Electrolyseur alcalin	11
Figure (I.8) : Electrolyseur PME.....	12
Figure (I.9) : Electrolyseur a oxyde solide SOEC.....	13
Figure (I.10) : une pile à combustible	15
Figure (I. 11) : schéma de fonctionnement d'une pile à combustible	16
Figure (I. 12) : Présentation de TRNSYS	19
Figure (I.13) : Le stockage de l'énergie	22
Figure (I.14) : gestion d'énergie.....	23

Chapitre II : Description du système étudié

Figure (II.1) : Schéma fonctionnel du système	24
Figure (II.2) : Schéma d'un système éolien avec multiplicateur.....	25
Figure (II.3) : Schéma d'un système éolien avec multiplicateur.....	26
Figure (II.4) : fonctionnement de pile à combustible.....	30
Figure (II.5) : Le stockage et le transport.....	33
Figure (II.6) : Les batteries embarquées.....	35
Figure (II.7): Stockage d'hydrogène.....	36

Chapitre III : Modélisation et simulation sous TRNSYS

Figure (III.1) : Installation réalisée par TRNSYS	41
Figure (III.2) : Schéma de la turbine éolienne	43
Figure (III.3) : Profil journalier normalisé	59
Figure (III.4) : Ratios mensuels.....	61

Chapitre IV : Résultat de simulation

Figure (IV.1) : la variation de la vitesse de vent, la température ambiante, l'irradiation globale durant les jours (15 février) et de (15 juillet).	65
Figure (IV.2) : Variation du puissance généré par l'éolienne et Cp durant les jours (15 février) et de (15 juillet).	67
Figure (IV.3) : Variation de température de l'électrolyseur et de refroidissement et le taux de transfert de chaleur durant les jours (15 février) et de (15 juillet).	70
Figure (IV.4) : Variation de puissance de l'électrolyseur et la chaleur générée et de l'efficacité (globale, énergétique et faraday) durant les jours (15 février) et de (15 juillet).	72
Figure (IV.5) : Variation de la puissance de sortie et l'énergie généré par PAC et la consommation d'air et de H2 durant les jours (15 février) et de (15 juillet).	74
Figure (IV.6) : Variation de stockage de gaz en volume et à débit volumétrique, et de stockage de gaz sous pression et sous niveau de pression durant les jours (15 février) et de (15 juillet).	75

Liste des tableaux

Chapitre I : Recherche bibliographique

Tableau (I.1) : Comparaison des outils de simulation.....	20
---	----

Chapitre II : Description du système étudié

Tableau (II.1) : Données météorologiques	36
--	----

Tableau (II.2) : Profil de charge (demande énergétique)	37
---	----

Chapitre III : Modélisation et simulation sous TRNSYS

Tableau (III.1) : les données de WECS (type90)	42
--	----

Tableau (III.2) : Les entrées et les sorties d'éolienne.....	43
--	----

Tableau (III.3) : les données de l'électrolyseur (type160)	45
--	----

Tableau (III.4) : Les entrées et les sorties d'électrolyseur	45
--	----

Tableau (III.5) : les données de Compresseur du H2.....	49
---	----

Tableau (III.6) : Les entrées et les sorties de compresseur de H2.....	49
--	----

Tableau (III.7) : les données de Stockage H2	51
--	----

Tableau (III.8) : Les entrées et les sorties de stockage H2.....	51
--	----

Tableau (III.9) : Les données de AFC (PAC)	53
--	----

Tableau (III.10) : Les entrées et les sorties de PAC.....	53
---	----

Tableau (III.11) : Les données d'onduleur électrique (DC/AC ou AC/DC).....	54
--	----

Tableau (III.12) : Les entrées et les sorties d'onduleur.....	55
---	----

Tableau (III.13) : les données de Type 105a- Contrôles principaux pour un système de mini-réseau éolien-hydrogène	57
---	----

Tableau (III.14) : Les entrées et les sorties de Contrôles principaux pour un système de mini-réseau éolien-hydrogène	57
---	----

Tableau (III.15) : Les données de Type 150- Contrôleur de sortie retardée	57
---	----

Tableau (III.16) : Les données de moteur diesel (DEGS).....	58
---	----

Nomenclature

ABREVIATIONS UTILISEES :

TRNSYS	Transient system simulation
SER	Les sources d'énergie renouvelables
SSE	Les systèmes de stockage d'énergie
ENR	Systèmes d'énergies renouvelables
SSE	Systèmes de stockage d'énergie
SGE	Système de gestion de l'énergie
SEH	Système d'énergie hybride
MCI	Moteurs à combustion interne
CVC	Système chauffage, ventilation et climatisation
DEGS	Groupe électrogène diesel
WECS	Wind energy conversion system
PAC	Pile a combustible
PME	Pile a membrane
SOEC	Electrolyseur à oxydes solides

Désignation latine :

Symbole	Définition	Unité
λ	Rapport de vitesses (Tip Speed Ratio)	—
Ω_{turb}	Vitesse angulaire de la turbine	rad/s
R	Rayon du rotor	M
V_{vent}	Vitesse du vent	m/s
P_{vent}	Puissance du vent	W
P_{turbine}	Puissance extraite par la turbine	W
ρ	Densité de l'air	kg/m ³
S	Surface balayée par le rotor	m ²
C_p	Coefficient de performance aérodynamique	—
U_{cell}	Tension réelle de la cellule	V
U_{rev}	Tension réversible (potentiel de Nernst)	V
U_{tn}	Tension thermique (basée sur ΔH)	V

Nomenclature

I_{ely}	Courant de l'électrolyseur	A
Area	Surface active de la cellule	cm ²
I^*	Courant de référence	A
T_{ely}	Température de l'électrolyseur	K
r^*	Résistance ohmique équivalente	$\Omega \cdot \text{cm}^2$
s^*	Coefficient de surtension d'activation	V
t^*	Surtension de concentration	V
r_1, r_2	Coefficients pour r^*	—
s_1, s_2, s_3	Coefficients pour s^*	—
t_1, t_2, t_3	Coefficients pour t^*	—
ΔG	Variation d'énergie libre de Gibbs	J/mol
ΔH	Variation d'enthalpie	J/mol
ΔS	Variation d'entropie	J/(mol·K)
$I_{density}$	Densité de courant	A/cm ²
a_1, a_2	Coefficients pour n_f	—
n_f	Débit molaire d'électrons	mol/s
N_{cells}	Nombre de cellules	—
\dot{n}_{H_2}	Débit molaire d'hydrogène	mol/s
\dot{n}_{O_2}	Débit molaire d'oxygène	mol/s
\dot{n}_e	Débit molaire d'électrons	mol/s
C_T	Capacité thermique de l'électrolyseur	J/K
dT/dt_{ely}	Variation de la température	K/s
Q_{gen}	Chaleur générée	W
Q_{lcss}	Chaleur perdue par convection	W
Q_{cw}	Chaleur extraite par refroidissement	W
R_T	Résistance thermique globale	K/W
$C_{p.H_2O}$	Capacité calorifique massique de l'eau	J/(kg·K)
W_1, W_2	Travail de compression (étapes 1 et 2)	J
P_x, O_{out}	Pressions intermédiaires	Pa
P_{com}	Puissance de compression	W
W_{iso}	Travail isotherme	J
P_{iso}	Puissance isotherme	W
n_{isen}	Rendement isentropique	—

Nomenclature

T_high	Température haute	K
R_f	Rapport de compression	—
Q_cool	Chaleur évacuée	W
P	Pression (gaz réel)	Pa
Vol	Volume de gaz	m ³
n	Nombre de moles de gaz	mol
a, b	Coefficients de Van der Waals	—
T_cr, P_cr	Température et pression critiques	K, Pa
U_mod	Tension d'un module de pile	V
U_0	Tension à vide	V
b	Coefficient logarithmique (perte)	V
R_ohm	Résistance ohmique interne	Ω
I_stack	Courant du stack	A
I_FC	Courant total de la pile	A
n_(c.ser), n_(m.ser)	Cellules/modules en série	—
n_(c.par), n_(s.par)	Cellules/modules en parallèle	—
U_stack	Tension totale du stack	V
P_stack	Puissance totale du stack	W
n_e	Rendement faradique	—
z	Nombre d'électrons par molécule	—
F	Constante de Faraday	C/mol
V_H2	Volume d'hydrogène	m ³
ρ_gas	Densité de l'hydrogène	kg/m ³
S_H2	Stockage énergétique d'hydrogène	kWh ou J
P_loss	Perte de puissance	W

Introduction générale

Introduction générale

Dans un contexte mondial marqué par l'épuisement progressif des ressources fossiles, la volatilité des prix de l'énergie, et les impacts environnementaux croissants liés aux émissions de gaz à effet de serre, la nécessité d'un modèle énergétique durable s'impose avec urgence. La transition vers des sources d'énergie propres, renouvelables et locales représente aujourd'hui un enjeu majeur aussi bien pour les pays développés que pour les pays en développement. Cette transition est d'autant plus cruciale dans des régions isolées ou mal desservies par le réseau électrique national, où la dépendance à des générateurs diesel coûteux et polluants reste encore très présente.

Dans cette optique, les mini-réseaux autonomes, capables de fonctionner indépendamment du réseau national, se présentent comme des solutions technologiques prometteuses. En combinant plusieurs sources d'énergie, notamment renouvelables, avec des moyens de stockage efficaces, ces systèmes hybrides permettent d'assurer une alimentation énergétique fiable, continue et respectueuse de l'environnement. Parmi les configurations possibles, l'association de l'énergie éolienne avec un système de stockage basé sur l'hydrogène constitue une approche innovante et durable pour surmonter l'intermittence des ressources renouvelables.

Le présent travail s'inscrit dans cette logique de durabilité énergétique. Il vise à concevoir, modéliser et simuler un mini-réseau autonome intégrant une éolienne, un électrolyseur, un réservoir d'hydrogène et une pile à combustible, en vue d'alimenter une charge électrique de manière fiable et continue.

Le principal objectif de cette étude est de concevoir, modéliser et simuler un mini-réseau autonome intégrant des sources d'énergies renouvelables, en particulier l'énergie éolienne, couplée à un système de stockage et de conversion d'énergie via un électrolyseur et une pile à combustible.

C'est dans ce contexte qu'on a mené notre étude, qui s'étale sur les chapitres faisant suite à cette introduction :

- Dans le premier chapitre nous avons donné une recherche bibliographique sur notre sujet.
- Dans le second chapitre nous avons donné une description générale des mini-réseaux autonomes et les éléments constituant le système éolienne-hydrogène.

- Le troisième chapitre présente la modélisation et simulation de notre système éolienne-hydrogène avec description d'outil numérique utilisé dans la simulation par le logiciel TRNSYS.
- Le quatrième chapitre présente les résultats de notre programme TRNSYS avec l'interprétation et l'analyse de ces résultats.
- Finalement, on a achevé ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I : Recherche bibliographique

Introduction

L'utilisation des énergies renouvelables dans les systèmes énergétiques autonomes est de plus en plus populaire. Les mini-réseaux autonomes sont des solutions rentable et prometteuse pour fournir de l'électricité de manière fiable tout en luttant contre les changements climatiques, en particulier dans les zones reculées. Cependant, des problèmes de conception importants sont posés par la variabilité des sources renouvelables et la nécessité d'un stockage.

Ainsi, pour mieux comprendre les enjeux et les avancées réalisées dans le domaine en question, il est fondamental de s'appuyer sur des travaux de recherche existants. La présente étude tente d'esquisser un état de l'art dans le cadre des mini-réseaux autonomes. Cette revue de la littérature présentera dans un premier temps le concept, les définitions et les applications des mini-réseaux indépendants. En outre, seront selon les sources d'énergies renouvelables utilisées. La deuxième partie proposera une lecture de la modélisation et la simulation de ces systèmes : cette tâche se focalisera plus précisément sur les outils TRNSYS et sa comparaison avec d'autres logiciels comme HOMER et MATLAB/Simulink. Enfin, une synthèse des études antérieures traitant de l'intégration des énergies renouvelables dans les mini-réseaux permettra d'identifier les tendances et les approches les plus pertinentes.

I.1 les mini-réseaux autonomes

Un mini-réseau est un système composé d'une partie production d'électricité éventuellement combinés à un système de stockage de l'énergie produite et d'une partie distribution d'électricité qui alimente en énergie un petit groupe isolé de clients et qui fonctionne indépendamment du réseau électrique national. Leurs tailles varient généralement entre quelques kilowatts et 10 mégawatts. Les mini-réseaux plus petits sont parfois appelés « micro-réseaux » ou « nanoréseaux ».[1]

Les mini-réseaux peuvent alimenter un large éventail de clients: des ménages privés; des entreprises commerciales comme des magasins, des fabricants de glace et des centres de recharge de téléphones mobiles; des exploitations agricoles pour le pompage de l'eau servant à l'irrigation et pour Le stockage frigorifique; des exploitations productive pour les moulins et les ateliers de travail du bois ou du métal; des centres semi-industriels comme des tours de télécommunication, des usines de transformation ou des fermes floricoles.[1]



Figure (I. 1) : une mini réseau autonome[2]

I.1.1. Définition :

Les mini-réseaux sont des systèmes électriques autonomes, souvent alimentés par des sources d'énergie renouvelable telles que l'énergie solaire ou éolienne , des piles à combustible et des électrolyseurs, qui peuvent fonctionner indépendamment du réseau électrique principal. Ils sont conçus pour fournir une énergie fiable et durable aux zones éloignées ou isolées, ainsi que pour améliorer la résilience énergétique des communautés urbaines. Grâce à leur capacité à fonctionner en mode autonome, les micro-réseaux peuvent réduire les pertes de transmission d'énergie et favoriser l'intégration des technologies vertes.[3]

I.1.2. Application

Les mini-réseaux peuvent aider à améliorer les moyens de subsistance en milieu rural, à accroître les activités économiques, à créer des emplois et à créer de la valeur ajoutée aux produits et services locaux. Ils améliorent la qualité de vie des ménages et peuvent soutenir la croissance des entreprises locales, y compris les industries primaires comme l'agriculture, la pêche et le bois, les industries légères comme les ateliers de transformation du bois et des métaux et les entreprises commerciales et de vente au détail. Les mini-réseaux peuvent également améliorer les services communautaires existants : les écoles, les petits centres de santé et les édifices religieux.[4]

I.2. Les énergies renouvelables dans les mini-réseaux

I.2.1. Eoliennes

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, dite énergie éolienne, laquelle est ensuite le plus souvent transformée en énergie

électrique. Les éoliennes produisant de l'électricité sont appelées « aérogénérateurs », tandis que les éoliennes qui pompent directement de l'eau sont parfois dénommées « éoliennes de pompage » ou « pompes à vent ». Une forme ancienne d'éolienne est le moulin à vent.

Les termes « centrale éolienne », « parc éolien » ou « ferme éolienne » sont utilisés pour décrire les unités de production groupées, installées à terre ou en mer.

Les pays du monde où les champs éoliens sont les plus nombreux sont la Chine, les États-Unis, l'Allemagne, l'Espagne, l'Inde, le Royaume-Uni et, en proportion de la population, le Danemark (voir Production d'énergie éolienne).

Comme l'énergie solaire et d'autres énergies renouvelables intermittentes, l'éolien peut constituer un système d'alimentation autonome, mais il nécessite alors soit une source d'énergie d'appoint pour les périodes moins ventées (par exemple des centrales à gaz), soit un stockage d'énergie de réseau (batteries, stockage hydraulique ou, plus récemment, hydrogène, méthanation, air comprimé), soit encore un réseau électrique intelligent.[5]



Figure (I.2) : une éolienne[5]

I.2.1.1. Type des turbines éoliennes :

a) Eolienne à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les

années 1920 avec un certain succès. Ces genres d'éoliennes ne sont quasiment plus utilisés, puisque les contraintes mécaniques au niveau du sol occupent plus d'espace.[6]



Figure (I.3) : éolienne a axe vertical[6]

b) Éoliennes à axe horizontal

Les aérogénérateurs à axe horizontal présenté dans la figure I.6 sont les plus utilisés actuellement comparativement à ceux à axe vertical puisqu'ils présentent un prix moins important. De plus, ils sont moins exposés aux contraintes mécaniques. Ils sont constitués d'une ou plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le rotor tripale est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le prix et la vitesse de rotation du capteur éolien. Dans la littérature, les principales éoliennes étudiées sont tripales à axe horizontal.[6]



Figure (I.4) : éolienne a axe horizontal[6]

I.2.1.2. Principe

Le vent fait tourner des pales qui font-elles même tourner le générateur de l'éolienne. A son tour le générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique de type éolienne. L'électricité éolienne est dirigée vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage d'électricité éolienne. Pour produire de l'énergie éolienne, les pales du rotor des aérogénérateurs captent l'énergie cinétique du vent, ce qui fait tourner un générateur électrique qui transforme l'énergie mécanique du vent en électricité. Cette énergie électrique produite est une énergie renouvelable et propre qui peut être dirigée vers des batteries de stockage ou le réseau électrique. Le rotor des aérogénérateurs est composé en général de 3 pales tournant à une vitesse maximum de 30 tours par minute et fixés sur un moyeu. Quant à la puissance de l'électricité produite, une éolienne développe environ 2 millions de watts capables d'alimenter près de 2.000 foyers.[7]

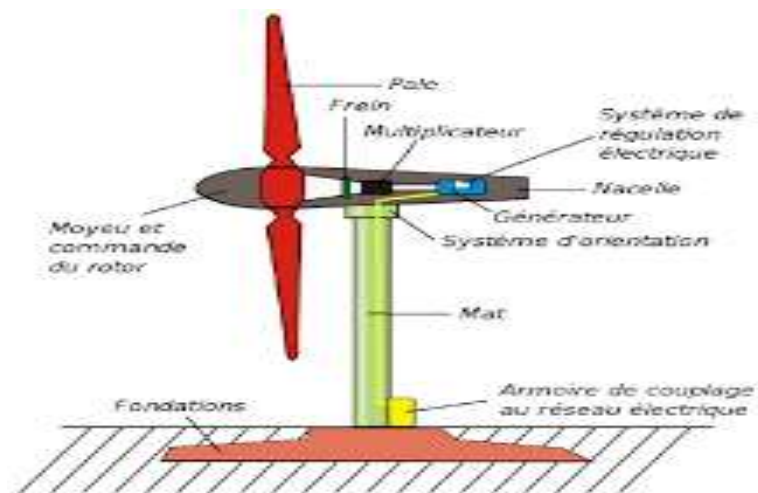


Figure (I.5) : Fonctionnement de l'éolienne[7]

I.2.1.3. Défis

a. Augmentation du coût du capital

Les projets éoliens nécessitent une forte intensité de capital. Cela signifie que les facteurs économiques d'investissement sont très sensibles au coût du capital. Deux facteurs ont entraîné une augmentation rapide du coût du capital au cours de l'année dernière :[8]

- Des taux d'intérêt en hausse, après plus d'une décennie de taux bas (voire négatifs)
- Une prime de risque d'investissement éolienne croissante compte tenu des défis techniques plus récents liés aux composants des turbines.

L'augmentation du coût du capital se traduit directement par une hausse du prix exigé pour développer de nouveaux projets éoliens. Cela a contribué à l'annulation de projets en Europe (par exemple, Vattenfall a annulé le parc éolien offshore Boreas de 1,4 GW au Royaume-Uni) et aux États-Unis (par exemple, l'annulation récente par Orsted de deux grands projets éoliens offshore dans le New Jersey).[8]

En tant que facteur atténuant, le coût du capital semble désormais se stabiliser, ce qui signifie qu'il est peu probable que cette tendance se poursuive.

b. Hausse du coût des matériaux

Une part importante des coûts des projets éoliens est liée aux matières premières utilisées. Cela signifie que les développeurs de projets sont fortement exposés aux coûts des matières premières brutes et raffinées, comme l'acier, le cuivre et le fret.[8]

Les problèmes de chaîne d'approvisionnement post-Covid ont fait grimper le coût des intrants, renforcés par la réponse politique visant à développer davantage d'énergies renouvelables. Les problèmes de chaîne d'approvisionnement et d'inflation des coûts se sont atténués en 2023, mais les coûts restent nettement plus élevés qu'avant la crise. Par exemple, Orsted a spécifiquement fait référence aux problèmes de chaîne d'approvisionnement en matériaux dans sa décision d'annuler de récents projets éoliens et de se retirer d'un consortium éolien offshore norvégien.[8]

c. Défis d'ingénierie

La pression incessante pour réduire les coûts a commencé à provoquer une augmentation substantielle des problèmes et des pannes des composants des parcs éoliens. Les problèmes les plus médiatisés concernent les rotors et les roulements des turbines Siemens (Siemens a enregistré une dépréciation de 2,2 milliards d'euros en août 2023 et prévoit une perte de 4,5 milliards d'euros pour l'année). Mais les problèmes d'ingénierie peuvent être beaucoup plus vastes.[8]

L'industrie éolienne connaît une innovation rapide et impressionnante qui permettra probablement de résoudre ces problèmes. Mais cela peut prendre du temps à résoudre et avoir

un réel impact financier sur les investisseurs et les développeurs éoliens dans l'intervalle. La maintenance et le remplacement des composants sont particulièrement coûteux pour les projets éoliens offshore. Les provisions pour coûts de maintenance plus élevés se répercutent sur l'économie des nouveaux projets éoliens.[8]

d. Problèmes de planification et de connexion

La plupart des marchés européens de l'énergie connaissent des problèmes majeurs de planification et de raccordement des projets éoliens, qui retardent leur déploiement et augmentent les coûts. Ce problème est particulièrement aigu pour l'éolien terrestre, qui est devenu très politisé.[8]

Ces problèmes sont souvent dus à un processus de planification et d'approbation des raccordements qui n'a pas été conçu pour faire face aux énormes volumes de demandes de projets d'énergies renouvelables nécessaires pour soutenir une transition énergétique rapide. Dans la plupart des pays, les projets nécessitent l'approbation de plusieurs autorités (des autorités locales aux autorités fédérales), dont beaucoup manquent de ressources.[8]

Le facteur atténuant ici est que l'accent politique mis sur la résolution des retards s'est considérablement accru en raison de la crise énergétique, par exemple le Plan d'action pour l'énergie éolienne récemment annoncé par l'UE.[8]

e. Rigidité des mesures de soutien

Les mécanismes de soutien politique doivent être adaptés pour tenir compte des défis 1 à 4 ci-dessus. Les trois premiers défis concernent les coûts plus élevés des projets, qui nécessitent au moins temporairement des niveaux de soutien politique plus élevés. L'exemple récent le plus clair en est l'échec du dernier tour d'enchères pour l'éolien offshore au Royaume-Uni, qui n'a pas permis de garantir une quelconque capacité compte tenu d'un prix plafond fixé trop bas.

Il existe également un défi à relever pour savoir qui assume le risque d'augmentation des coûts au fil du temps, compte tenu de la structure des contrats de soutien aux politiques. L'indexation sur l'inflation en est un exemple. Dans certains cas, il n'y a pas d'indexation, par exemple en Allemagne. Dans d'autres cas, l'indexation se fait sur l'IPC, qui n'a pas suivi le rythme des augmentations de coûts affectant les projets éoliens.[6]

I.2.2. Electrolyseur

Les électrolyseurs, qui utilisent l'électricité pour séparer l'eau en hydrogène et en oxygène, constituent une technologie essentielle pour produire de l'hydrogène à faibles émissions à partir d'électricité renouvelable ou nucléaire. La capacité d'électrolyse pour la production d'hydrogène dédié a augmenté ces dernières années.[9]

L'électrolyseur d'hydrogène est simplement une pile à combustible inversée. Contrairement à la pile à combustible qui produit de l'électricité à partir de l'oxygène et de l'hydrogène, ce dispositif produit ces derniers grâce à l'électricité. L'électrolyseur est un dispositif composé d'un récipient d'eau dans lequel se trouve un électrolyte. Il comprend aussi deux électrodes : une anode ou un pôle positif et une cathode ou un pôle négatif.[9]

Une fois traversé par un courant électrique, l'électrolyseur induit une réaction chimique des deux côtés de l'électrolyte : c'est l'électrolyse. Cette réaction décompose progressivement les substances composées en d'autres substances composées ou singulières.[9]



Figure (I.6) : Electrolyseur[9]

1.2.2.1. Types d'électrolyseur

a. Electrolyseur alcalin

L'électrolyse Alcaline utilise une solution alcaline (en général une solution d'hydroxyde de potassium KOH), comme électrolyte. Bien qu'elle soit moins performante que la PEM pour des hautes densités de courants, elle a l'avantage d'utiliser des catalyseurs peu coûteux et de ne pas avoir besoin de quelque membrane spécifique que ce soit. Cela en fait une option attractive pour les applications à grandes échelles comme la production industrielle d'hydrogène. Son rendement est également mesuré en kWh par mètres cubes d'hydrogène

produit. Les électrolyseurs alcalins à taille industrielles ont une efficacité d'approximativement 65% (jusqu'à 67%), ils opèrent généralement entre 60 et 90°C avec des densités de courants de 0.2 à 0.4 A/cm², ce qui lui donne une durée de vie moyenne de 60 000 à 90 000 heures.[10]



Figure (I.7) : Electrolyseur alcalin[10]

b. Electrolyseur PEM

La PEM est largement utilisée pour la production d'hydrogène en temps réel à petite échelle. Elle fonctionne à basse température et utilise une membrane polymère conductrice de protons pour séparer les gaz. La haute efficacité de la PEM repose dans sa capacité à être fonctionnelle avec des densités de courants élevées et à réagir rapidement aux variations de demandes. Cependant, elle nécessite des catalyseurs coûteux et des procédures de maintenance strictes. Le rendement énergétique de la PEM est généralement mesuré en kWh par mètres cubes d'hydrogène produit. La PEM peut atteindre jusqu'à 77% d'efficacité.[10]



Figure (I.8) : Electrolyseur PME[10]

c. Électrolyseur à Oxyde Solide (SOEC)

La SOEC fonctionne à des températures élevées et utilise un électrolyte en céramique conductrice d'oxydes ioniques. Bien qu'elle ait besoin d'une chaleur externe pour fonctionner, ce type d'électrolyseur peut utiliser la chaleur résiduelle d'une autre processus industriel, améliorant ainsi son efficacité globale. La SOEC a un haut rendement et le potentiel de créer de l'hydrogène d'une façon plus durable en utilisant l'électricité restante des sources d'énergies renouvelables. Les systèmes utilisant le SOEC atteignent des efficacités électriques plus élevées (84% atteints par Sunfire, bien que ce ne soit pas directement comparable avec d'autres technologies étant donné l'entrée de chaleur additionnelle nécessaire dans ce genre de système) et peut être une solution prometteuse où les pertes de chaleurs sont disponibles comme par exemple dans les HUBS industriels étant donné qu'elles requièrent des températures dépassant les 650°.[10]



Figure (I.9) : Electrolyseur a oxyde solide SOEC[10]

I.2.2.2. Production et stockage de l'hydrogène

a. Sources d'hydrogène

L'hydrogène n'existe pas à l'état naturel. Sa production est effectuée par deux procédures :

Reformage catalytique d'hydrocarbures (principalement gaz naturel) et production par électrolyse de l'eau. [11]

Aujourd'hui, environ la moitié de l'hydrogène produit dans le monde provient du reformage du gaz naturel, qui représente la source la plus économique. L'autre moitié de l'hydrogène est produite à partir du charbon ou du pétrole. L'électrolyse de l'eau est un procédé plus coûteux et ne représente aujourd'hui que quelques pour cent de l'hydrogène total produit. Dans cette étude, on s'intéresse à la deuxième procédure qui va dans le contexte des énergies renouvelables.[11]

b. Production par l'électrolyse

L'électrolyse de l'eau est une réaction électrochimique de décomposition de l'eau en hydrogène et en oxygène. Elle est rendue possible par le passage d'un courant continu à travers deux électrodes immergées dans un électrolyte liquide ou solide. Donc un électrolyseur permet de transformer l'électricité en dihydrogène par l'électrolyse de l'eau. Trois types d'électrolyseurs à eau ont été développés :[11]

- Electrolyseurs alcalins.
- Electrolyseurs PEM.

- Electrolyseurs à haute température.

c. Le stockage de l'hydrogène

L'hydrogène peut être stocké puis distribué sous plusieurs formes :[11]

- Sous forme gazeuse, comprimée sous haute pression (350–700 bar).
- Sous forme liquide (-253°C).
- Sous forme solide : hydrure de métaux, où différents métaux peuvent être utilisés, par exemple, Mg, Al ou d'autres alliages métalliques.

A) Le stockage sous pression La première étape consiste à comprimer le gaz, souvent à travers un système multi-étape. Le stockage sous forme gazeuse nécessite alors des réservoirs capables de résister à une forte pression (entre 350 et 700 bars) et à l'élévation de température due à la compression rapide du gaz. L'hydrogène peut être stocké dans des bouteilles de 10 litres jusqu'à des réservoirs de 10000 m³. On peut aussi stocker l'hydrogène sous terre sous forme comprimée. [11]

B) Le stockage sous forme liquide L'hydrogène est sous sa forme liquide lorsque sa température est de -253°C (20K). Le réservoir a souvent deux parois séparées par un espace pour éviter les pertes thermiques par convection.[11]

C) Le stockage sous forme solide C'est une forme de stockage d'hydrogène qui permet à celui-ci de s'insérer dans le réseau cristallin d'un métal avec lequel l'hydrogène a la propriété de former des liaisons covalentes ou ioniques. Ce type de métaux ou alliages peuvent donc stocker l'hydrogène entre leurs atomes.[11]

I.2.3. Piles à combustibles

Une pile à combustible est un générateur électrique dans lequel la fabrication de l'électricité se fait grâce à l'oxydation, sur une électrode, d'un combustible réducteur (par exemple le dihydrogène), couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant, tel que le dioxygène de l'air. La réaction d'oxydation de l'hydrogène est accélérée par un catalyseur qui est généralement du platine. Si d'autres combinaisons sont possibles, la pile la plus couramment étudiée et utilisée est la pile dihydrogène-dioxygène ou dihydrogène-air, car la production de dihydrogène est maîtrisée (très majoritairement à partir d'hydrocarbures, mais aussi par électrolyse de l'eau, le dihydrogène étant un vecteur énergétique), et des recherches sont à l'étude pour en trouver à l'état naturel.[12]

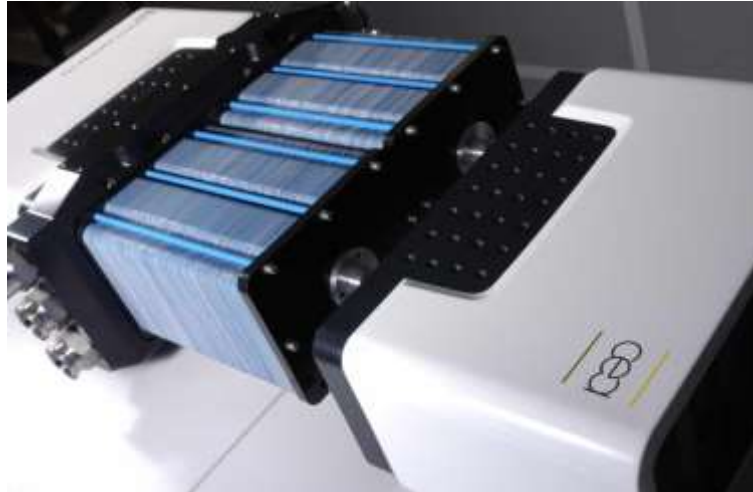


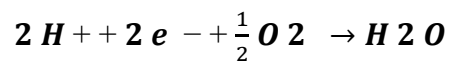
Figure (I.10) : une pile à combustible[13]

I.2.3.1. Fonctionnement :

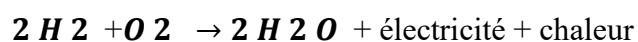
La pile à combustible est un générateur fonctionnant grâce à l'oxydation de l'hydrogène sur une électrode associée à la réduction de l'oxygène sur l'autre électrode. La pile à combustible a besoin seulement de l'hydrogène et l'oxygène pour son fonctionnement. Dans le côté de l'anode l'hydrogène se décompose selon la demi réaction (l'oxydation de l'hydrogène).[14]



Il y a libération de deux électrons qui vont circuler dans l'électrode vers la charge extérieure. Les ions hydrogène H^+ ou proton vont migrer vers la cathode à travers l'électrolyte. Les électrons passent ensuite par le circuit extérieur et arrivent à la cathode. Dans le côté de la cathode l'oxygène se décompose selon la demi réaction (la réduction de l'oxygène).[14]



En séparant ces deux demi-réactions pour un électrolyte non conducteur d'électrons. Les électrons libérés par la décomposition de l'hydrogène passent par le circuit extérieur, par contre les ions H^+ (les protons) peuvent traverser l'électrolyte. Le bilan global de la réaction se produisant dans une pile à combustible est.



L'eau formé est un liquide dans les conditions normal de température et dépression (0C° et 1 atm ou 273K et 1013 hpa) Comme le montre la figure suivante.[14]

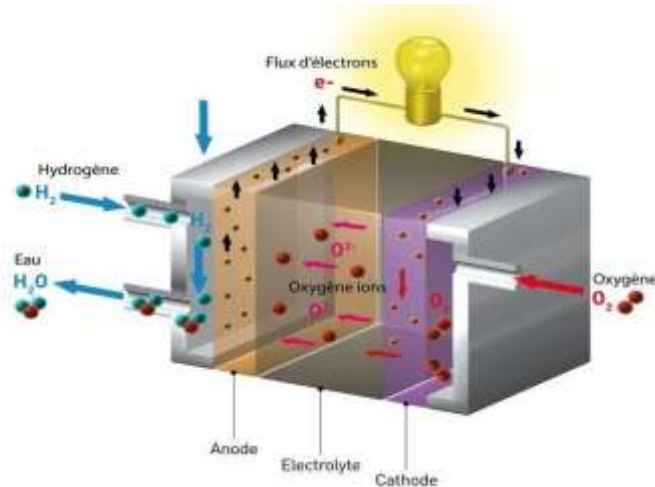


Figure (I. 11) : schéma de fonctionnement d'une pile à combustible[14]

En principe, pour le fonctionnement de la pile à combustible on utilise un assortiment de carburants et d'oxydants. L'hydrogène a été reconnu comme le carburants le plus efficace parce qu'il a la plus haute réactivité électrochimique que les autres carburants, tels que les hydrocarbures ou les alcools. L'oxygène est le meilleur oxydant grâce à sa haute réactivité et son abondance dans l'air.[14]

I.2.3.2. Avantages

a. Puissance zéro émission

Les piles à combustible à hydrogène (HFC) ne produisent aucune émission nocive, éliminant ainsi les coûts associés à la manipulation et au stockage de matières toxiques comme l'acide de batterie ou le carburant diesel. En fait, lorsqu'elles sont alimentées à l'hydrogène pur, les seuls sous-produits sont la chaleur et l'eau, ce qui fait de nos produits une source d'énergie durable à zéro émission. Les piles à combustible à hydrogène font partie de nombreux programmes de développement durable bien planifiés par les entreprises.[15]

b. Fiabilité robuste

La technologie des piles à combustible à hydrogène a fait ses preuves dans des conditions difficiles, notamment dans des environnements froids allant jusqu'à -40 degrés F/C, dans des environnements météorologiques tels que les ouragans, les déserts et les tempêtes hivernales, et même dans les environnements commerciaux difficiles des entrepôts de manutention.[15]

c. Efficacité améliorée

Selon le ministère américain de l'Énergie, les piles à combustible à hydrogène ont généralement une efficacité énergétique comprise entre 40 et 60 %. Cette fourchette est comparable à celle du moteur à combustion interne typique d'une voiture, qui a une efficacité énergétique d'environ 25 %. L'efficacité des piles à combustible à hydrogène est mise à profit pour améliorer la productivité des entrepôts jusqu'à 15 % en utilisant des chariots élévateurs à pile à combustible pour augmenter l'autonomie des véhicules électriques.[15]

d. Évolutif

Les avantages d'un produit modulaire sont considérables : une plus grande fiabilité et une facilité d'entretien. Mais le plus important des avantages des piles à combustible est peut-être l'évolutivité – et les économies réalisées lors de l'achat et de l'utilisation des piles à combustible. Ces produits peuvent être conçus précisément pour répondre à une variété de besoins énergétiques des clients – qu'il s'agisse de véhicules électriques routiers, de flottes de manutention ou d'énergie stationnaire. Payer uniquement pour ce dont vous avez besoin est tout simplement logique.[15]

e. Coûts opérationnels réduits

Par rapport aux batteries et aux générateurs à combustion interne, les piles à combustible permettent d'économiser de l'argent. Elles éliminent le besoin de changer, de charger et de gérer les batteries, réduisant ainsi la main-d'œuvre, le temps, l'espace et les besoins en énergie de pointe. Les unités fonctionnent plus longtemps que les batteries au plomb et peuvent être alimentées en seulement trois minutes, ce qui réduit considérablement les temps d'arrêt des véhicules et du personnel. De plus, la maintenance simple et le nombre réduit de visites sur site signifient des coûts d'exploitation jusqu'à 84 % inférieurs par rapport aux générateurs à

combustion pour l'alimentation stationnaire. La fiabilité robuste élimine le besoin de visites de maintenance trimestrielles sur le site, ce qui permet au personnel du site de se concentrer sur ses tâches essentielles.[15]

I.3. Outils de simulation des systèmes énergétiques

I.3.1. Présentation de TRNSYS

TRNSYS est un environnement de simulation complet et extensible pour la simulation transitoire de systèmes, y compris de bâtiments multizones. Il est utilisé par des ingénieurs et des chercheurs du monde entier pour valider de nouveaux concepts énergétiques, des simples systèmes d'eau chaude sanitaire à la conception et à la simulation de bâtiments et de leurs équipements, incluant les stratégies de contrôle, le comportement des occupants, les systèmes d'énergie alternative (éoliennes, solaires, photovoltaïques, systèmes à hydrogène), etc.[16]

L'un des facteurs clés du succès de TRNSYS depuis 25 ans réside dans sa structure ouverte et modulaire. Le code source du noyau ainsi que les modèles de composants sont fournis aux utilisateurs finaux. Cela simplifie l'extension des modèles existants pour les adapter aux besoins spécifiques de l'utilisateur.[16]

L'architecture basée sur des DLL permet aux utilisateurs et aux développeurs tiers d'ajouter facilement des modèles de composants personnalisés, en utilisant tous les langages de programmation courants (C, C++, PASCAL, FORTRAN, etc.). De plus, TRNSYS peut être facilement connecté à de nombreuses autres applications, pour le pré- ou le post-traitement, ou par des appels interactifs pendant la simulation (par exemple, Microsoft Excel, Matlab, COMIS, etc.). Les applications TRNSYS incluent :[16]

- Systèmes solaires (solaire thermique et photovoltaïque)
- Bâtiments basse consommation et systèmes CVC avec des fonctionnalités de conception avancées (ventilation naturelle, chauffage/refroidissement par dalle, double façade, etc.)
- Systèmes d'énergie renouvelable
- Cogénération, piles à combustible
- Tout ce qui nécessite une simulation dynamique !



Figure (I. 12) : Présentation de TRNSYS[17]

I.3.2. Comparaison avec des autres outils (HOMER, MATLAB/Simulink, etc.)

Les logiciels de simulation vous permettent de prédire le comportement d'un système. Vous pouvez utiliser les logiciels de simulation pour évaluer un nouveau design, diagnostiquer des problèmes sur un design existant et tester un système dans des conditions difficiles à reproduire, par exemple un satellite dans l'espace. Pour exécuter une simulation, vous avez besoin d'un modèle mathématique de votre système, qui peut être représenté sous la forme d'un schéma bloc, d'un schéma, d'un diagramme d'états ou même de code. Les logiciels de simulation calculent le comportement du modèle au fur et à mesure de l'évolution des conditions ou lorsque des événements se produisent. Les logiciels de simulation incluent également des outils de visualisation, comme l'affichage des données et des animations 3D, pour pouvoir suivre la simulation lors de son exécution.[18]

Les ingénieurs et les scientifiques utilisent les logiciels de simulation pour de nombreuses raisons :

- La création et la simulation de modèles est plus économique que la construction et le test de prototypes hardware.
- Vous pouvez utiliser les logiciels de simulation pour tester différents designs avant de passer à la fabrication du prototype hardware.

- Vous pouvez connecter les logiciels de simulation au hardware pour tester l'intégration de l'ensemble du design.

Critère	TRNSYS	HOMER	MATLAB/Simulink	PSS/E, DIGSILENT
Objectif	Simulation dynamique	Optimisation techno-économique	Modélisation et simulation de systèmes dynamiques	Analyse de stabilité et gestion du réseau
Énergies supportées	Tous types	Principalement hybride PV/éolien/diesel	Tous types	Tous types
Précision	Très élevée (transitoire)	Moyenne (approche simplifiée)	Élevée (systèmes dynamiques)	Élevée (flux de puissance et stabilité)
Facilité d'utilisation	Intermédiaire	Facile	Complexe	Complexe
Coût	Payant (licence académique possible)	Gratuit pour usage limité	Payant	Payant
Analyses possibles	Évaluation détaillée du système, gestion de l'énergie	Étude de rentabilité, configuration optimale	Commande et régulation des composants	Stabilité et analyse des réseaux

Tableau (I.1) : Comparaison des outils de simulation

I.4. Études antérieures sur l'intégration des énergies renouvelables dans les mini-réseaux

I.4.1. L'optimisation des mini-réseaux

La région de Binalood, en Iran, bénéficie d'une vitesse moyenne du vent de 6,82 m/s à 40 m d'altitude et d'un rayonnement solaire quotidien moyen de 4,79 kWh/m² / jour. Dans ce contexte, un village rural isolé de la région de Binalood, Sheikh Abolhassan, devrait disposer d'un potentiel largement suffisant pour répondre à sa demande grâce à un système hybride autonome d'énergie renouvelable . Cependant, le fournisseur d'électricité public local a étendu le réseau électrique jusqu'au village en 2006 afin de renforcer le générateur diesel déjà présent . Cette étude vise, dans un premier temps, à déterminer s'il aurait été économique de maintenir l'alimentation électrique du village par le générateur diesel et d'ajouter des générateurs d'énergie renouvelable pour augmenter la part renouvelable du système. Dans un deuxième temps, nous avons cherché à déterminer comment les sources d'énergie

renouvelables (SER) peuvent encore être intégrées au réseau électrique actuel de Sheikh Abolhassan afin de parvenir à un système plus économique et plus respectueux de l'environnement. Le logiciel HOMER est utilisé dans cette étude pour évaluer la faisabilité de divers systèmes énergétiques hybrides diesel-énergies renouvelables et réseau-énergies renouvelables. Les résultats indiquent que l'ajout de générateurs d'énergie renouvelable au système, avant et après l'extension du réseau, pourrait et peut encore aboutir à un système énergétique plus économique, évidemment plus propre et plus respectueux du climat.[19]

I.4.2. Le stockage de l'énergie

Les systèmes de stockage d'énergie (SSE) sont reconnus comme une technologie fondamentale pour les réseaux électriques. Ils permettent de stocker l'énergie électrique dans différents états et de la reconvertir en électricité lorsque nécessaire. Leurs excellentes caractéristiques, telles que la disponibilité, la polyvalence, la flexibilité des performances, le temps de réponse de la flotte et la modularité, rendent les SSE plus attractifs pour les applications des réseaux électriques. Les SSE apportent des contributions et des applications significatives pour optimiser l'exploitation des réseaux électriques, avec ou sans intégration de systèmes d'énergies renouvelables (ENR). Cet article présente une analyse complète des technologies SSE et de leurs applications dans les réseaux électriques. Cinq types de SSE, à savoir les systèmes mécaniques, chimiques, électriques, électrochimiques et thermiques, sont explorés en détail, avec leurs principales caractéristiques et applications. Une synthèse d'une analyse comparative visant à identifier le SSE le plus adapté aux applications des réseaux électriques et une analyse de la mise en œuvre pratique de différents SSE dans le monde sont présentées, reflétant leur adéquation aux applications des réseaux électriques. L'analyse comparative démontre également la nature des différents SSE, notamment leurs avantages et leurs limites dans des applications spécifiques. Les principaux défis identifiés par ces analyses sont la capacité des systèmes de stockage d'énergie (SSE), l'intégration des énergies renouvelables (ER), leurs coûts élevés de maintenance et de mise en œuvre, leur dégradation, la gestion des déchets et la pollution environnementale. De plus, l'analyse révèle que de nombreux défis technologiques et économiques restent à relever pour rendre les applications pratiques des SSE viables pour le secteur de l'énergie. Elle identifie également les recherches clés récentes susceptibles de répondre efficacement à ces enjeux et explore les orientations futures que les chercheurs peuvent entreprendre pour améliorer diverses caractéristiques des SSE. Enfin, la voie de transition vers la promotion des SSE pour les applications des systèmes électriques avec et sans intégration des ENR est abordée afin de

démontrer la possibilité et le potentiel d'un déploiement à grande échelle des SSE pour un avenir durable et respectueux du climat.[20]

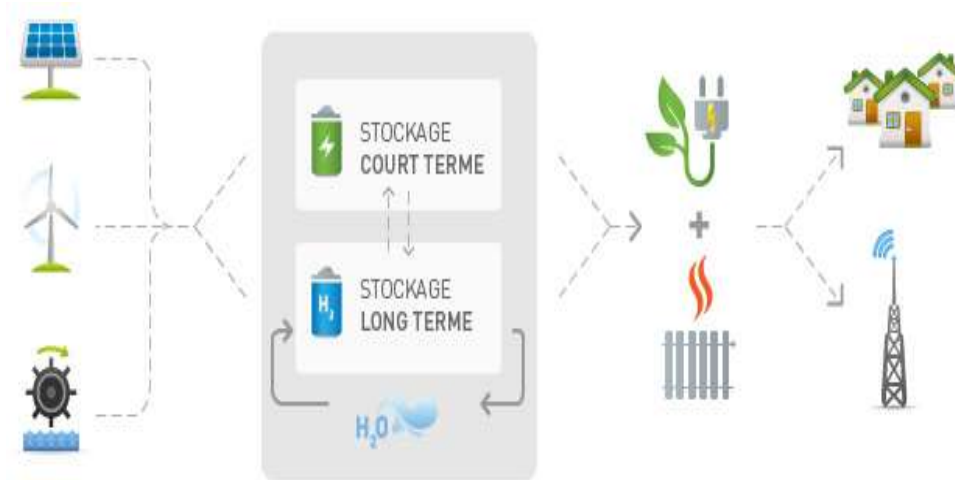


Figure (I.13) : Le stockage de l'énergie[21]

I.4.3. Les stratégies de gestion de l'énergie

Dans cette étude, un contrôleur de gestion de l'énergie (SGE) amélioré est proposé pour un système d'énergie hybride (SEH), d'un système d'énergie hybride, qui est constitué de deux sources d'énergie renouvelable, d'un générateur diesel, et d'un système de stockage, batteries en mode connecté au réseau et en mode charge isolée. Nos principales contributions dans cette étude sont les suivantes : premièrement, nous avons développé un système de supervision , en utilisant les réseaux de neurones récurrent Elman (ENN), pour atténuer la complexité et l'exigence d'une structure basée sur des règles ou d'une modélisation mathématique préalable. Deuxièmement, nous avons conçu une stratégie de gestion de l'énergie (SGE) en utilisant l'approche le simulateur Stateflow pour extraire les ensembles des données d'apprentissage et de test du contrôleur ENN. Diverses techniques de commande ont été appliquées pour assurer la stabilité et la fiabilité du SEH qui peuvent être résumées comme suit : La commande du bus continu a été réalisé à l'aide de logique floue, ce dernier a été appliqué pour contrôler les puissances active et réactive du réseau. Ensuite, la commande prédictive (MPC) a été utilisé pour contrôler le courant de la batterie et le convertisseur bidirectionnel afin de contrôler les opérations de charge et de décharge. L'MPPT par mode glissant a été utilisé pour extraire la puissance maximale de l'éolienne. Le contrôleur prédictif utilisé pour générer le courant de référence pour l'éolienne en régulant la vitesse mécanique à la valeur de référence. Les résultats obtenus démontrent que la stratégie proposée offre les

fonctionnalités de modélisation les plus avancées pour les SGE afin d'atteindre une fiabilité élevée et de minimiser la complexité de calcul. Par rapport aux stratégies classiques. L'SGE propose est comparé à une stratégie de réseau de neurones perceptrons multicouches (MLP) pour évaluer leurs performances. Les résultats ont montré que le contrôleur ENN est plus précis que le MLPNN. Ainsi, la stratégie proposée est une solution appropriée pour un contrôle efficace de la gestion de l'énergie basée sur un modèle prédictif, car elle n'est pas très complexe et ne nécessite pas une machine de traitement élevée.[22]

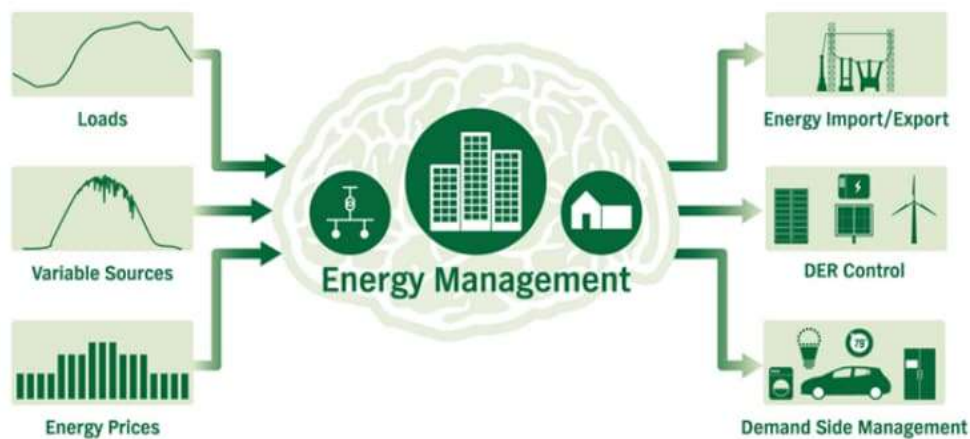


Figure (I.14) : gestion d'énergie[23]

Conclusion

Cette revue de littérature a été essentielle pour mettre en évidence les informations disponibles sur les mini-réseaux auto-suffisants et leur intégration dans les énergies renouvelables. L'étude de diverses sources d'énergie comme le vent et l'hydrogène révèle leur potentiel ainsi que les défis liés à leur intermittence et à leur stockage. Des technologies telles

que les piles à hydrogène et les électrolyseurs semblent être de bons candidats pour fournir une puissance stable et continue.

De plus, l'étude des outils de simulation révèle qu'il existe plusieurs façons de modéliser ces systèmes, chacun ayant des avantages uniques. Le système TRNSYS est reconnu pour sa facilité à simuler des systèmes énergétiques hybrides et c'est la raison de son choix pour le reste de ce travail.

Enfin, l'analyse des recherches antérieures démontre différentes approches d'optimisation et de contrôle des micro-réseaux, qui à leur tour offrent des opportunités pour améliorer leur performance opérationnelle et leur viabilité économique. Tous ces facteurs serviront de fondement au travail qui consiste à modéliser et analyser les simulations qui seront détaillées dans les chapitres suivants.

Chapitre II : Description du système étudié

Introduction

Ce chapitre a pour objectif d'élaborer sur le système de mini-réseau énergétique étudié. Pour expliquer son fonctionnement, je vais d'abord présenter l'architecture générale du mini-réseau en présentant un schéma fonctionnel et en décrivant les interrelations entre ses différentes parties. Dans une deuxième partie, nous allons élaborer en détail sur chaque élément, en commençant par les éoliennes (leur modélisation et leurs paramètres techniques), puis en passant aux piles à combustible (leur fonction et leurs caractéristiques associées), et enfin en couvrant les électrolyseurs (leur principe fonctionnel et l'intégration au système) ainsi que les systèmes de stockage d'énergie (batteries et hydrogène). Enfin, nous spécifierons les variables qui devront être saisies pour la simulation du mini-réseau, notamment les données météorologiques (vitesse du vent) et le profil de charge (demande d'énergie). Cette élucidation approfondie fournira les bases nécessaires pour aborder la simulation et l'évaluation de performance du système.

II.1 Architecture de mini réseau

II.1.1. Schéma fonctionnel du système

Un réseau électrique est un ensemble d'outils destiné à produire, transporter, distribuer l'énergie électrique et veiller sur la qualité de cette énergie, notamment la continuité de service et la qualité de la tension. L'architecture ou le design du réseau est un facteur clé pour assurer ces objectifs. Cette architecture peut être divisée en deux parties ; D'une part, l'architecture du poste, et de l'autre part l'architecture de la distribution.

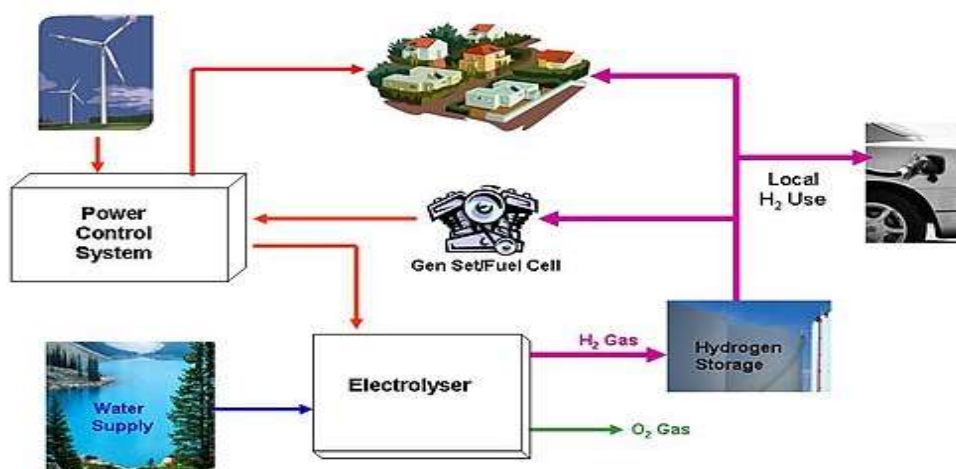


Figure (II.15) : Schéma fonctionnel du système[24]

II.1.2. Interactions entre les composants

Les différents composants interagissent de manière dynamique dans un système mini-réseau autonome afin d'assurer la stabilité du réseau énergétique. L'objectif principal est de garantir un équilibre entre la production d'énergie renouvelable, le stockage intermédiaire (hydrogène, batteries) et la consommation finale.

La production qui sert à produire l'énergie électrique grâce à l'éolienne qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique puis en énergie électrique. Cette énergie est dirigée vers les charges électriques. En cas de production excédentaire, le système envoie l'excédent à l'électrolyseur pour décomposer l'eau et produire de l'hydrogène.

L'hydrogène produit stocke dans des réservoirs. Lorsque la production d'électricité d'éolienne plus faible et moins de la et ne répond pas aux besoins et la demande (moins de vent ou plus consommation), La pile à combustible utilisée hydrogène pour produire de l'électricité afin de répondre aux besoins.

Enfin, la stratégie de conservation de l'énergie vise à assurer la continuité de l'approvisionnement en électricité.

II.2. Composants de système

II.2.1. Eolienne

II.2.1.1. Modélisation

Un système éolien est composé d'une turbine qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique, d'un multiplicateur de vitesse qui permet d'augmenter la vitesse de rotation et de diminuer le couple, d'un générateur électrique qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique et d'un convertisseur de puissance[19]

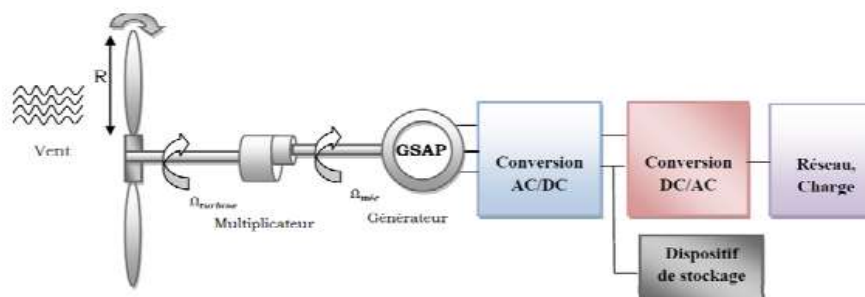


Figure (II.16) : Schéma d'un système éolien avec multiplicateur[19]

La tendance actuelle consiste à supprimer la boîte de vitesse qui est un organe mécanique dont les défauts sont : pollution sonore, maintenance, pertes mécaniques, un poids supplémentaire dans la nacelle et enfin une probabilité de panne importance devant les autres organes. La vitesse de rotation d'une éolienne étant de l'ordre de 100 tr/min (pour une éolienne de 20kW), l'omission du multiplicateur de vitesse ne permet plus d'utiliser des machines classiques (deux ou quatre paires de pôles). Il faut noter que ce dispositif nécessite une génératrice multi pôles et un convertisseur de fréquence composé d'un redresseur et d'un onduleur en cascade. Le Figure (II,2) représente un système éolien sans multiplicateur de vitesse.[19]

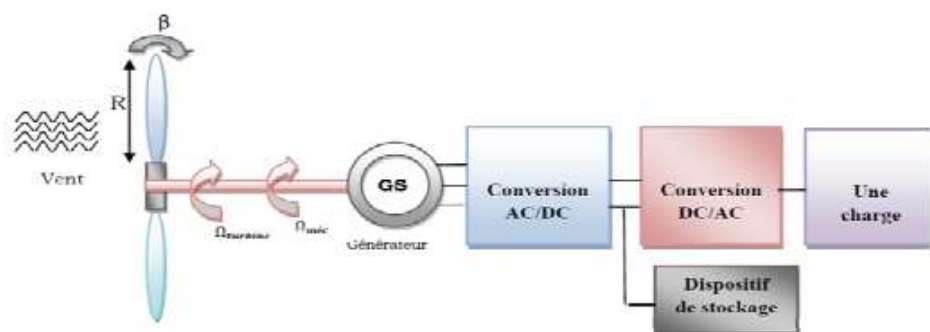


Figure (II.17) : Schéma d'un système éolien avec multiplicateur[19]

II.2.1.2. Paramètre technique

Maintenant que nous avons une idée des perspectives du marché mondial de l'énergie éolienne et de la croissance attendue de la demande d'éoliennes, examinons certains des facteurs clés qui influencent l'efficacité des éoliennes. Connaître ces facteurs aidera les entreprises d'équipements électriques et les détaillants à disposer du bon inventaire et à fournir le bon support à leurs clients dans leur parcours d'achat.

II.2.1.2.1. Vitesse de vent

Cela va sans dire. En tant que source d'énergie primaire, la vitesse du vent et la saison sont des déterminants importants de la performance et de l'efficacité des éoliennes. La vitesse du vent à un endroit donné détermine la quantité d'énergie éolienne qui peut être générée par les éoliennes.

Cela est dû au fait que la vitesse du vent affecte la quantité d'énergie cinétique qui peut être captée par les pales de l'éolienne pour être transférée au générateur. Si tous les facteurs

sont maintenus constants, on estime qu'une augmentation de 10 % de la vitesse du vent pourrait entraîner une augmentation de 33 % de la puissance éolienne.[20]

Il est également important de prendre en compte la saison du vent, car la vitesse du vent varie selon les endroits en fonction de la période de l'année et des conditions météorologiques.[20]

II.2.1.2.2 Densité et température de l'air

Un autre facteur important qui affecte l'efficacité des systèmes d'éoliennes est la densité de l'air et la température de l'emplacement de l'utilisateur. La densité de l'air est la quantité de particules ou de masse présente dans un volume d'air donné, et cette densité affecte la vitesse à laquelle la masse d'air circule à travers l'éolienne, ce qui affecte à son tour la production d'énergie.[20]

La température de l'air affecte l'efficacité des éoliennes en raison de la dilatation et de la contraction thermiques des matériaux résultant des différences de niveaux de température de l'air. Pour assurer un fonctionnement efficace du générateur et des composants électriques de l'éolienne, il est important de prendre en compte les différences de densité et de température de l'air pour ajuster le facteur de puissance et le système de refroidissement de manière appropriée .[20]

II.2.1.2.3. Hauteur de l'axe ou hauteur

En général, les vents augmentent avec l'altitude. C'est pour cette raison que les tours d'éoliennes plus hautes sont capables de capter plus d'énergie. Le phénomène de changement de la vitesse du vent avec la hauteur est appelé cisaillement du vent.[20]

À des hauteurs d'axe plus longues ou à des altitudes plus élevées, le vent peut circuler plus librement car il y a moins d'obstacles provenant du sol, tels que des arbres, des montagnes et des bâtiments. L'emplacement des éoliennes doit donc être pris en compte, car il déterminera la hauteur de moyeu requise pour une production optimale d'énergie éolienne.[20]

II.2.1.2.4. Diamètre des pales du rotor de la turbine

Le diamètre du rotor, ou la largeur circulaire balayée par les pales en rotation d'une éolienne, a une forte influence sur l'énergie captée par les pales. Le diamètre du rotor des éoliennes a augmenté régulièrement au fil du temps dans le but de capturer plus d'énergie éolienne grâce à leurs ailes plus longues.[20]

Cela signifie que les éoliennes dotées de rotors de plus grand diamètre sont capables de balayer une plus grande surface, captant ainsi plus de vent et produisant donc plus d'électricité. Il est donc possible que même dans une zone où le vent est relativement faible, les éoliennes dotées de pales plus longues puissent capter plus de vent disponible que les éoliennes dotées de pales plus courtes. Cette capacité à récolter plus de vent à des vitesses de vent plus faibles représente une plus grande efficacité.[20]

II.2.1.2.5. Contrôler le degré de déviation et de déviation

Un autre facteur qui affecte les performances et l'efficacité des éoliennes est la stratégie de contrôle et d'optimisation des éoliennes. Les stratégies de contrôle sont les méthodes utilisées pour réguler le pas des pales de turbine, la vitesse du rotor, le couple du générateur et l'angle de lacet. Les stratégies d'optimisation sont des techniques utilisées pour déterminer les valeurs et les paramètres optimaux des variables de contrôle de la turbine en fonction des objectifs et des contraintes du système de turbine.[20]

Pour obtenir des performances de turbine plus efficaces, il est important de mettre en œuvre des stratégies de contrôle et d'optimisation efficaces et adaptables. Un contrôle optimal du tangage et du lacet permet aux éoliennes de produire de l'énergie sur une large plage de vitesses de vent.[20]

II.2.1.2.6. Disposition des turbines sur la ferme

La plupart des parcs éoliens possèdent plus d'une éolienne sur place. À la lumière de ce qui précède, il est important de veiller à ce que l'agencement du parc éolien soit optimisé pour éviter de placer des éoliennes dans l'ombre du vent d'autres éoliennes.

Les pales des éoliennes sont situées à l'avant du parc éolien créant des effets de vents turbulents qui atteignent les turbines à l'arrière. Un tel scénario pourrait réduire considérablement la quantité d'énergie produite par les éoliennes non amarrées, car elles capteraient moins d'énergie en raison de l'efficacité réduite des pales causée par les vents turbulents.[20]

II.2.1.2.7. Fiabilité et maintenabilité

La fiabilité d'une turbine est déterminée par la fiabilité de certains composants clés, notamment les pales, la boîte de vitesses et le générateur. La défaillance de ces composants

clés arrêtera la fonction principale de l'éolienne, à savoir produire de l'énergie, ce qui entraînera des temps d'arrêt et la nécessité de réparations et de remplacements.[20]

Les conceptions d'éoliennes avec des taux de fiabilité plus élevés affectent l'efficacité globale du système d'éoliennes. Mais au-delà de la conception et de la fiabilité des composants, il est important pour les utilisateurs d'adhérer à des pratiques de maintenance cohérentes et efficaces pour maintenir des performances optimales et maximiser la production d'énergie.[20]

II.2.2. Piles à combustible

II.2.2.1. Rôle

Le fonctionnement d'une pile à combustible découle d'une réaction nommée oxydoréduction. Le cœur d'une pile comprend trois éléments : deux électrodes (une anode oxydante qui émet des électrons et une cathode réductrice qui collecte des électrons) et un électrolyte qui les sépare.[21]

L'électrolyte central a la capacité de transmettre des molécules chargées d'ions d'une électrode à l'autre et de les bloquer pour les faire ensuite transiter par le circuit externe de la pile, ce qui permet de se servir de leur énergie électromotrice.[21]

Un réservoir approvisionne par ailleurs les deux électrodes en combustible. S'il s'agit d'une pile à combustible à hydrogène, l'anode va recevoir de l'hydrogène et la cathode de l'oxygène.

L'anode oxyde le combustible, puis libère des électrons que l'électrolyte va forcer à passer par un circuit externe. Celui-ci génère un courant électrique continu. Ce processus est appelé "oxydation".[21]

De son côté, l'oxygène présent dans la cathode va réagir au contact des électrons libérés par la réaction décrite précédemment. Il s'agit d'une "réduction" qui produit de la chaleur et de l'eau.

Pour que la catalyse s'effectue correctement lors de cette procédure, on dépose généralement du platine en fines couches sur chaque électrode (en plus grande quantité sur la cathode). Ce métal est cependant rare et onéreux, ce qui impacte négativement la compétitivité des piles à combustible. Pour solutionner ce problème, plusieurs recherches sont menées à l'heure actuelle sur des nanomatériaux favorisant la catalyse.[21]

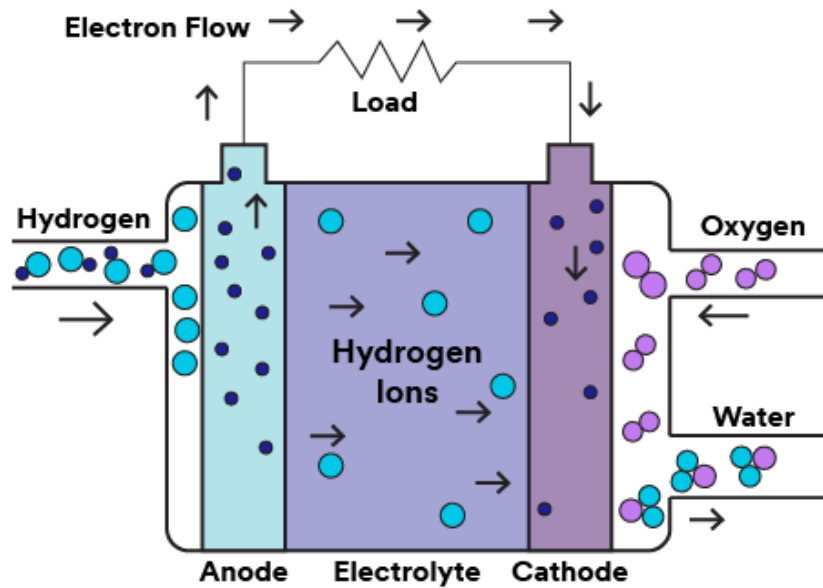


Figure (II.18) : fonctionnement de pile à combustible[21]

II.2.2.2. Caractéristiques

II.2.2.2.1. Une énergie décarbonée

Lorsqu'elles sont alimentées avec de l'hydrogène généré à partir d'énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire, éolienne ou hydroélectrique, les piles à combustible ne produisent aucune émission d'échappement.[28]

II.2.2.2.2. Zéro émission de Nox

Tous les moteurs à combustion interne (MCI), même les plus économes en carburant, émettent du protoxyde d'azote associé au processus de combustion. La combustion ne se produit pas dans une unité électrique à pile à combustible à hydrogène et ne produit donc pas d'émissions de Nox.[22]

II.2.2.2.3. Efficacité énergétique supérieure

Parce qu'elles convertissent l'énergie chimique latente directement en électricité, les piles à combustible évitent les goulots d'étranglement thermiques car le processus est plus efficace sans qu'il soit nécessaire de procéder à un traitement et à une conversion supplémentaires de l'énergie stockée.[22]

II.2.2.2.4. Ravitaillement rapide et familier

Le ravitaillement d'un groupe motopropulseur à pile à combustible à hydrogène est similaire au ravitaillement d'un véhicule équipé d'un moteur diesel. Au lieu d'une pompe diesel, une pompe à hydrogène est utilisée pour « remplir » le réservoir d'hydrogène.[22]

II.2.2.2.5. Mieux pour l'environnement

L'eau et la vapeur étant les seuls sous-produits, les piles à combustible PEM ne pollueront pas l'air avec des émissions.[22]

II.2.2.2.6. Faible entretien

Les piles à combustible comportent moins de pièces mobiles nécessaires pour continuer à fonctionner à des performances optimales que les moteurs à combustion traditionnels. Moins de pièces à entretenir = moins d'entretien global requis.[28]

II.2.3. Électrolyseurs

II.2.3.1. Principe de fonctionnement

L'eau utilisée est d'abord purifiée (on parle de déionisation) puis soumise à un courant électrique pour former du dioxygène et du dihydrogène. D'abord comprimé, le gaz est ensuite purifié avant d'être transporté et distribué aux consommateurs. L'électrolyseur ne rejette ainsi aucun polluant. La déionisation de l'eau destinée à l'électrolyse est préalablement déionisée afin d'en extraire les ions calcium, magnésium, chlorure et sodium. Cette déionisation est opérée par osmose inverse, qui est un système de purification via un filtrage très fin qui ne laisse passer que les molécules d'eau. L'eau introduite doit être la plus pure possible car les impuretés risquent de demeurer dans les équipements et s'accumuler au fil de l'électrolyse, perturbant à la fin les réactions électrolytiques par la formation de boues ou la réaction des ions chlorure sur les électrodes. Ainsi, il est important d'obtenir une eau avec une conductivité ionique faible pour favoriser la réaction d'électrolyse.[29]

Les impuretés extraites sont ainsi réinjectées dans une partie de l'eau qui ne sera pas utilisée dans le processus, tandis que la partie de l'eau déionisée est acheminée vers le module d'électrolyse.[29]

II.2.3.1.2. L'électrolyse

Le rôle de la cuve de l'électrolyseur est de dissocier les atomes de la molécule d'eau afin d'en extraire les atomes d'hydrogène et d'oxygène. La formule de la décomposition de l'eau

par électrolyse s'écrit comme suit : $2H_2O \rightarrow O_2 + 2H_2$ Cette décomposition nécessite un apport d'énergie électrique, généralement compris entre 4 et 5 kWh par norme mètre cube* d'hydrogène, qui alimente une cellule constituée de deux électrodes. L'anode (la borne positive) et la cathode (la borne négative) sont reliées à un courant continu, et séparées par un électrolyte (milieu conducteur ionique), par exemple une solution aqueuse. Une unité de stockage tampon en aval de l'unité de production par électrolyse vise ensuite à stocker temporairement l'hydrogène produit, en amont de sa compression. Celle-ci inclut de nombreux éléments de contrôle (pression, volume) et de sécurité (valves, capteurs) afin de permettre un suivi adapté du gaz. Ce stockage a pour objectif de réguler le flux d'hydrogène en sortie d'électrolyse et d'alimenter les compresseurs de la station de stockage. L'oxygène produit peut quant à lui être éventé, c'est-à-dire dispersé dans l'air, ou valorisé via compression en bouteille pour un usage futur.[29]

II.2.3.1.3. La compression

Le flux d'hydrogène gazeux produit est acheminé vers l'unité de compression, dotée de plusieurs compresseurs fonctionnant en parallèle. Le gaz produit par le procédé d'électrolyse est initialement à pression atmosphérique et doit être comprimé à 330 bars avant d'être purifié. Les technologies de compression varient selon les installations et selon la compression souhaitée. Plusieurs techniques de compression peuvent être utilisées, telles que la compression à piston ou celle membranaire.[29]

II.2.3.1.4. La purification

En sortie d'électrolyseur, le flux d'hydrogène est chargé en eau et en oxygène. Il doit donc être purifié afin d'atteindre un niveau de pureté de 99,999 %, et ce avec une teneur maximale de 5ppm en oxygène et de 5ppm en eau (ppm : partie par million, qui équivaut à un millionième). Cela correspond aux standards de la norme ISO 14786-2. L'unité de purification nécessaire au traitement du flux d'hydrogène est principalement composée d'un réacteur catalytique (désoxydant) dédié au traitement de l'oxygène et d'un système de séchage du gaz constitué de colonnes permettant l'absorption de l'eau.[29]

II.2.3.1.5. Le stockage et le transport

La production peut ensuite être distribuée sur place, stockée, ou transportée sur un autre site de distribution. Dans le premier cas, il est donc nécessaire d'installer une station de distribution adossée à l'unité de production. Dans le cas du transport, il faut mettre en place

une unité de remplissage de camions de ravitaillement, qui transportent l'hydrogène comprimé dans des tubes généralement entre 200 et 300 bars. Ces "tubes trailers" acheminent ensuite l'hydrogène produit vers les différents lieux de distribution pour de la mobilité ou de la consommation industrielle.[29]

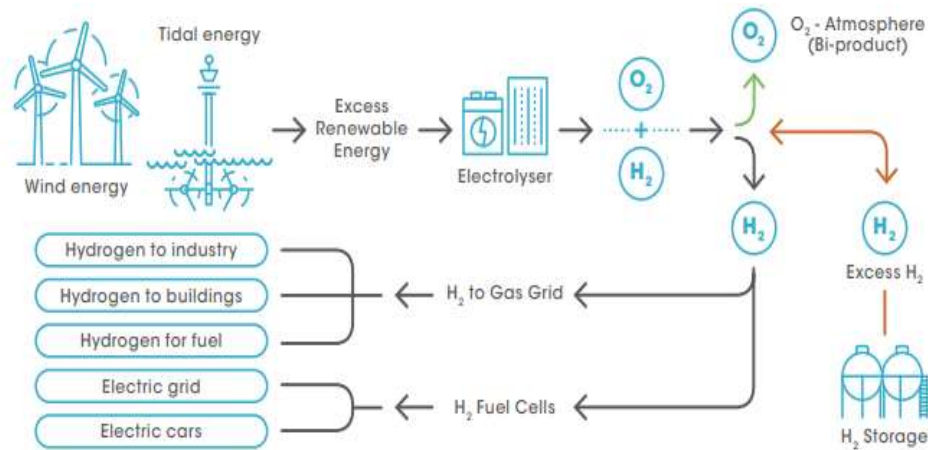


Figure (II.19) : Le stockage et le transport[29]

II.2.3.2. Intégration

Dans un mini-réseau autonome, un électrolyseur peut être utilisé pour stocker l'énergie renouvelable sous forme d'hydrogène. Voici comment il s'intègre[30] :

Source d'Énergie Renouvelable : L'électrolyseur est alimenté par l'excédent d'énergie produite par des éoliennes.

Production d'Hydrogène : Lorsque la production d'énergie dépasse la demande, l'électricité alimente l'électrolyseur pour produire de l'hydrogène.

Stockage de l'Hydrogène : L'hydrogène produit est stocké sous forme gazeuse (réservoirs haute pression) ou liquide.

Utilisation de l'Hydrogène : Converti en électricité via une pile à combustible lorsque la production d'énergie renouvelable est faible.

Utilisé comme carburant pour des applications industrielles ou de transport.

II.2.4. Systèmes de stockage (batteries et hydrogène)

Avec la demande croissante de sources d'énergie propres et durables, le stockage d'énergie devient de plus en plus important pour stabiliser les réseaux électriques et améliorer la

production d'énergie à partir de sources renouvelables. Les technologies de stockage d'énergie à base d'hydrogène et de batteries sont des solutions innovantes qui nous permettent de relever les défis du changement climatique et de répondre aux besoins énergétiques croissants. Dans cette introduction, nous passons en revue les bases de ces deux sujets et abordons les opportunités et les défis associés à chacun.[31]

L'hydrogène est l'élément le plus léger et le plus abondant de l'univers et est considéré comme un vecteur d'énergie potentiel, propre et renouvelable. L'hydrogène peut être produit à partir de diverses sources, telles que l'eau, le gaz naturel et divers hydrocarbures, et peut être converti en énergie électrique à l'aide de piles à combustible. Malgré les formidables opportunités disponibles, le stockage de l'hydrogène en est encore à ses balbutiements en termes de défis liés à la production, à la distribution et au stockage efficaces.[31]

D'autre part, les batteries sont l'un des systèmes de stockage d'énergie les plus courants, permettant de stocker l'énergie électrique sous forme chimique et de la récupérer à la demande. Il existe de nombreux types de batteries, comme les batteries lithium-ion et sodium-soufre, et leurs applications vont de l'alimentation des appareils portables à l'amélioration de l'efficacité des réseaux électriques et à la transition vers les véhicules électriques. La technologie des batteries progresse rapidement, mais elle est confrontée aux mêmes défis liés à la rareté des ressources, à la durabilité et à l'efficacité à long terme.[31]

II.2.4.1. Le stockage batteries

Les batteries sont des dispositifs de stockage d'énergie portables qui convertissent l'énergie chimique en énergie électrique et vice versa. Les batteries sont constituées de trois composants principaux : la cathode, l'anode et l'électrolyte (le matériau qui conduit les ions). Les ions circulent entre la cathode et l'anode à travers l'électrolyte tandis que le courant électrique circule dans le circuit externe, permettant ainsi de stocker et de récupérer l'énergie. Les batteries rechargeables comprennent plusieurs technologies telles que le lithium-ion, le sodium-soufre et l'oxyde rouge de vanadium. Le stockage d'énergie dans les batteries au lithium coûte plus de 200 dollars par kilowattheure (kWh) en 2020 et devrait chuter à 100 dollars à mesure que les prix des batteries baisseront à l'avenir.[31]



Figure (II.20) : Les batteries embarquées[32]

II.2.4.2. Le stockage hydrogène

L'hydrogène peut être produit par électrolyse (à partir d'une source d'énergie propre et renouvelable) et stocké sous plusieurs formes, puis utilisé, exporté ou converti en d'autres supports chimiques ; C'est ce qu'on appelle le stockage d'énergie renouvelable par la voie de l'hydrogène. Le stockage de l'hydrogène comporte plusieurs aspects, comme suit :[31]

Stockage de l'hydrogène sous forme de gaz : L'hydrogène est stocké à haute pression (jusqu'à 700 bars) dans des réservoirs spéciaux, ce qui nécessite des équipements et des réservoirs à haute pression. Le stockage de l'hydrogène coûte environ 2 à 3 dollars par kilogramme d'hydrogène stocké dans des réservoirs à haute pression.

L'hydrogène peut être stocké sous forme liquide en étant refroidi cryogéniquement à -253°C et nécessite des réservoirs isolés thermiquement.

Utilisation de l'ammoniac comme moyen de stockage de l'hydrogène : L'hydrogène peut être converti en ammoniac (NH_3) et facilement stocké à température ambiante et pression atmosphérique. L'hydrogène peut ensuite être récupéré à partir de l'ammoniac.

Utilisation du méthanol comme moyen de stockage de l'hydrogène : l'hydrogène peut être converti et du dioxyde de carbone peut y être ajouté pour le convertir en méthanol (CH_3OH), qui peut être facilement stocké et transporté. L'hydrogène peut être extrait du méthanol par des réactions chimiques.[31]



Figure (II.21): Stockage d'hydrogène[33]

II.3. Données d'entrée pour la simulation

II.3.1. Données météorologiques

Paramètre	Unité	Valeurs moyennes
Température moyenne	°C	18-20°C
Température minimale/maximale	°C	5°C (hiver) / 35°C (été)
Vitesse du vent	m/s	3 à 15 m/s
Radiation solaire directe	W/m ²	100 - 400 W/m ²
Radiation solaire diffuse	W/m ²	50 - 150 W/m ²

Tableau (II.2) : Données météorologiques

Observations :

- Période estivale (juin-juillet-août) → Fort ensoleillement et températures élevées (besoin en climatisation).
- Période hivernale (décembre-janvier) → Températures basses (demande en chauffage).
- Le vent est plus fort en hiver et au printemps, ce qui peut être intéressant pour l'éolien.

II.3.2. Profil de charge (demande énergétique)

Heurs	Demande estimée (wh)
0-5	319
5-8	639
8-10	532
10-14	639
14-16	532
16-20	639
20-24	319

Tableau (II.3) : Profil de charge (demande énergétique)

Profil journalier typique :

- (8h-10h) et (14h-16h) : Augmentation de la demande (chauffage, électroménager).
- (0h-5h) et (20h-24h) : Baisse de la consommation.
- (5h-8h) et (16h-20h) : Pic de consommation (éclairage, cuisine, TV, climatisation/chauffage).

Conclusion

L'analyse du système étudié a facilité l'explication de son architecture et de ses composants principaux. Le mini réseau autonome fonctionne avec un hybride de sources d'énergie renouvelables ainsi que des technologies de stockage visant à garantir un approvisionnement électrique fiable et durable. L'interaction des éoliennes, des piles à hydrogène, des électrolyseurs et des systèmes de stockage contribue de manière significative à l'optimisation du fonctionnement du réseau.

De plus, l'analyse des données d'entrée a souligné la pertinence des conditions météorologiques et du profil de charge dans l'évaluation des performances du système. Ces paramètres ont un impact direct sur la gestion de l'énergie et la robustesse du réseau électrique.

L'étude va maintenant se concentrer sur la modélisation du mini réseau avec le logiciel TRNSYS pour examiner le comportement des systèmes et optimiser les performances sur la base de la description fournie.

Chapitre III : Modélisation et simulation sous TRNSYS

Introduction

Un système d'alimentation hybride est composé de divers composants. Lors de la conception d'un système électrique hybride, des facteurs tels que la taille des composants, les configurations du système, l'adéquation des diverses ressources d'énergie renouvelable, les aspects économiques du projet avec l'évolution des charges et des coûts des composants, le cycle de vie du système, le coût actuel net du système, le coût de l'énergie pour l'utilisateur final, les coûts de maintenance et les coûts de fonctionnement annuels du système hybride aideront le décideur à déterminer les solutions les plus rentables du système hybride pour répondre aux charges électriques pour lesquelles il est en cours de conception.

L'objectif de ce chapitre est de réaliser la modélisation et la simulation d'un mini-réseau autonome à base d'énergies renouvelables avec le logiciel TRNSYS. Son but est d'analyser la faisabilité technique du système en fonction de son comportement en différentes conditions de fonctionnement.

III.1 Présentation de TRNSYS

Le logiciel de simulation TRNSYS est un environnement complet et extensible, dédiée à la simulation dynamique des systèmes, développé par le CSTB (centre Scientifique et Technique du bâtiment) dans le cadre de collaborations internationales, TRNSYS est aujourd'hui la référence au niveau mondial de la simulation dynamique de bâtiments et de système. Plusieurs centaines de composants TRNSYS sont disponibles, couvrant un large spectre d'applications.(Energie solaire, Eoliennes ,Hydraulique ,Microcontrôleurs, Photovoltaïque, Piles à combustibles, Piscines ,Chaudière bois, Cogénération, comportements des usagés, analyse et optimisation tarifaire, Plafond et Plancher rayonnant ,Pompes à chaleur, Régulation, Stockage d'énergie intersaison, Système de climatisation, Thermique du bâtiments ,Tour de refroidissements, Turbines à gaz ,Matériaux à changement de phase ,Analyse économique...).

Ces bibliothèques peuvent être connectés pour effectuer des études pluridisciplinaires techniques et économique. Studio assure l'interface entre le schéma de principe du projet à modéliser et TRNSYS d'une manière intuitive .la conception modulaire est ouverte de TRNSYS permet aux utilisateurs un contrôle sur les organigrammes, une adaptation plus réaliste des composants au projet étudié et la possibilité de créer aisément le composant spécifique pour un problème posé.[34]

Le TRNSYS se caractérise par les trois principales fonctions :

- Les entrées (Inputs)
- Les Paramètres
- Les sorties (Outputs)

III.2. Les applications du TRNSYS

Cet appareil peut être utilisé dans les domaines suivants : [35]

- ❖ Systèmes d'énergie renouvelable
- ❖ Cogénération, piles à combustible
- ❖ Systèmes solaires (solaire thermique et photovoltaïque)
- ❖ Bâtiments basse consommation et systèmes CVC avec des fonctionnalités de conception avancées (ventilation naturelle, chauffage/refroidissement par dalle, double façade, etc.)
- ❖ Tout ce qui nécessite une simulation dynamique !

III.3. Avantages de TRNSYS pour ce projet

TRNSYS permet de simuler des systèmes complexes combinant différentes sources d'énergie (éolienne, photovoltaïque, piles à combustible, électrolyseurs, batteries, etc.).

Simulation avec un modèle dynamique à temps court, à partir de laquelle on peut discerner la variabilité temporelle du système.

Des données météorologiques réelles, Cela est important pour évaluer l'influence du climat sur la quantité d'énergie produite... et

Le logiciel permet l'utilisateur d'exécuter de multiples scénarios du mini-réseau en changeant les paramètres des composants pour s'assurer que les valeurs fonctionnelles sont les plus économiques et durables.

III.4. Description du Mini réseau autonome

Le système considéré est un mini-réseau autonome, modélisé sous TRNSYS, basé sur la production d'électricité par une éolienne de type 90 et le stockage de l'énergie sous forme d'hydrogène. L'électricité éolienne produite est consommée directement pour alimenter la charge ou utilisée pour déclencher un électrolyseur de type 160, qui convertit l'eau en

hydrogène. Ce dernier terme est ainsi compressé à l'aide d'un compresseur de type 167 et stocké sous pression dans un réservoir de type 164b. Lorsque la production éolienne est insuffisante, une pile à combustible (Type 173a) consomme l'hydrogène stocké pour produire de l'électricité, assurant ainsi la continuité de l'alimentation électrique. Un onduleur (Type 175a) permet la conversion entre courant continu et courant alternatif selon les besoins du système. L'ensemble est piloté par un contrôleur principal (Type 105a) qui gère le fonctionnement des composants selon les conditions de production et de demande, avec l'appui d'un contrôleur de sortie retardée (Type 150) permettant d'introduire des délais pour éviter les commutations trop fréquentes. Ce système permet ainsi d'assurer une autonomie énergétique fiable en combinant production renouvelable et stockage sous forme d'hydrogène.

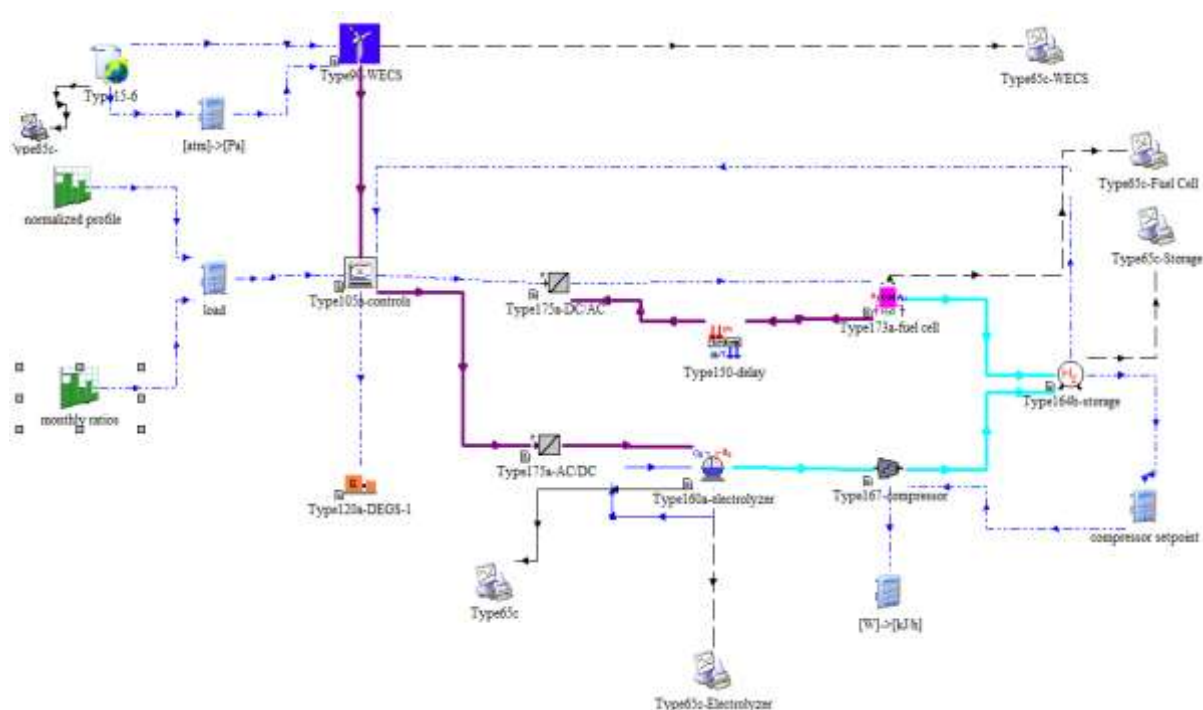


Figure (III.22) : Installation réalisée par TRNSYS

III.5. Description des composants de système sur TRNSYS :

Notre système se base sur 8 composants principaux :

1. Type 90- WECS-éolienne
2. Type 160- Electrolyseur
3. Type 167- Compresseur du H2
4. Type 164b- Stockage du H2
5. Type 173a- pile à combustible

6. **Type 175a- Onduleurs électriques (DC/AC ou AC/DC).**
7. **Type 105a- Contrôles principaux pour un système de mini-réseau éolien-hydrogène**
8. **Type 150- Contrôleur de sortie retardée**

Les composantes auxiliaires sont :

1. **Type 120a- Modèle générique de moteur diesel (DEGS).**
2. **Type 15-6- Processeur de données météorologiques ; combine la lecture des données, le traitement du rayonnement et les calculs de température du ciel.**
3. **Type 14h- Fonction de forçage dépendante du temps pour le profil de demande de puissance.**
4. **Type 65c- Traceur graphique en ligne avec fichier de sortie.**

III.5.1. Type 90- WECS-éolienne

Le type90 est modèle mathématique pour un système de conversion de l'énergie éolienne (WECS). Le modèle calcule la puissance produite par un WECS en fonction d'une caractéristique de puissances par rapport à la vitesse du vent (fournie sous forme de tableau dans un fichier externe). L'impact des changements de densité de l'air et de la vitesse du vent augmente avec la hauteur est également modélisé. Les principales équations utilisées dans ce modèle sont basées sur les travaux de (Quinlan 2000, Quinlan et coll. ; 1996).

L'éolienne utilisé dans ce système dont les caractéristiques sont présentées sur le tableau suivant :

Nome	Valeur	Unité
Elévation de site	480	M
Hauteur de la collecte de données	30	M
Hauteur de moyen	46	M
Perte de puissance de la turbine	0	% (base 100)
Nombre d'éoliennes	1	-
Unité logique du fichier contenant les données de la courbe de puissance	206	-

Tableau (III.4) : les données de WECS (type90)

Les entrées et les sorties :

Les entres	Les sorties
Signal de commande	Puissance de sortie
Vitesse de vent	Heures de turbine
Température ambiante	Coefficient de puissance
Pression barométrique	

Tableau (III.5) : Les entrées et les sorties d'éolienne

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site. L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne.

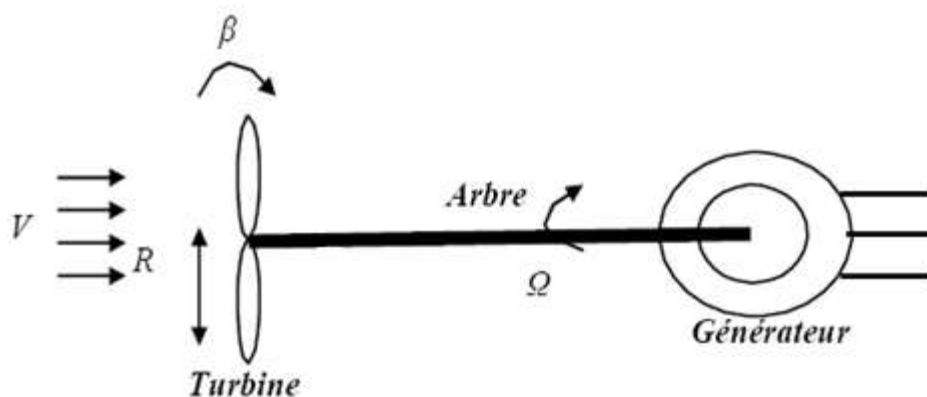


Figure (III.23) : Schéma de la turbine éolienne[36]

La puissance du vent est définie par :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (III.1)$$

Avec

ρ : densité de l'air (approxima. 1,22 kg /m³ à la pression atmosphérique normale et à 15°C).

S : surface circulaire balayée par la turbine (le rayon du cercle est déterminé par la longueur de pale).

v : vitesse du vent en m/s.

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine est donnée par :

$$P_{turbine} = C_p P_{vent} = C_p(\lambda, \beta) \rho S v^3 \quad (\text{III.2})$$

D'après la loi de Betz est le coefficient de puissance C_p ne peut être supérieur à 0.592 diffère pour chaque éolienne et aussi dépend de l'angle d'inclinaison des pales β et du rapport de vitesse λ :

C_p est donné par la relation suivante:

$$C_p = [(0.44 - 0.0167\beta) \sin\left(\frac{\pi(\lambda-1)}{15-0.3(\beta)}\right) - 0.00184\lambda\beta] \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turb} R}{V_{vent}} \quad (\text{III.4})$$

Ω_{turb} : vitesse angulaire de la turbine.

R : rayon des pales.

III.5.2. Type 160- Electrolyseur

TYPE160 est un modèle mathématique pour un électrolyseur d'eau alcaline haute pression. Ce modèle repose sur une combinaison de thermodynamique fondamentale, de théorie du transfert de chaleur et de relations électrochimiques empiriques. Un modèle thermique dynamique est également inclus. Une courbe courant-tension dépendant de la température pour une pression donnée et une relation de rendement Faraday indépendante de la température et de la pression constituent la base du modèle électrochimique. La température de l'électrolyseur peut être fournie en entrée ou calculée à partir d'un modèle thermique simple ou détaillé (Ulleberg, 1998 ; 2001). Dans cette instance de Type160, l'utilisateur est invité à fournir la température de l'électrolyseur en entrée (TMODE 1).

L'électrolyseur est utilisé pour produire de l'hydrogène lorsque l'énergie éolienne est produite suffisante. Pour notre système l'électrolyseur choisi porte les caractéristiques citées dans le tableau suivant :

Nome	Valeur	Unité
Mode température	1	-
Zone d'électrode	0.25	M ²

Le nombre de cellules est une série	70	-
Nombre de piles en parallèle	3	-
Densité de courant maximale admissible	680	MA/Cm ²
Température de fonctionnement maximale autorisée	85	C
Tension minimale autorisée des cellules	1.4	V
Résistance thermique	0.0563	KW
Constante de temps thermique	108	H
Type d'électrolyseur	2	-
Unité logique pour le fichier de données	205	-

Tableau (III.6) : les données de l'électrolyseur (type160)

Les entrées et les sorties :

Les entres	Les sorties
Signal de contrôle de l'électrolyseur	Rendement faradique
Courant de l'électrolyseur	Puissance de l'électrolyseur
Pression de l'électrolyseur	Efficacité énergétique
Température de fonctionnement de l'électrolyseur	Taux de production d'hydrogène
Débit d'eau de refroidissement	Taux de production d'oxygène

Tableau (III.7) : Les entrées et les sorties d'électrolyseur

Les équations mathématiques utilisées pour calculer la quantité d'hydrogène produite par l'électrolyseur utilisé dans la configuration proposée dans la problématique sont :

Caractéristique courant-tension (par cellule) :

$$U_{cell} = U_{rev} r^* \frac{I_{ely}}{Area} + s^* \log\left(\frac{I^* I_{ely}}{Area} + 1\right) \quad (\text{III.5})$$

Avec :

$$r^* = r1 + r2 T_{ely} \quad (\text{III.6})$$

$$s^* = s1 + s2 T_{ely} + s3 T_{ely}^2 \quad (\text{III.7})$$

$$t^* = t1 + \frac{t2}{T_{ely}} + \frac{t3}{T_{ely}^2} \quad (\text{III.8})$$

Le rendement Faraday est défini comme le rapport entre la quantité maximale réelle et théorique d'hydrogène produite dans l'électrolyseur. Ce rendement Faraday incluant les pertes de courant parasites le long des conduits de gaz, il est souvent appelé rendement de courant. Les courants parasites augmentent avec la diminution des densités de courant, en raison d'une part croissante d'électrolyte et donc d'une résistance électrique plus faible. De plus, le courant parasite dans une cellule est linéaire par rapport à son potentiel (erreur ! Source de référence non définie). Par conséquent, la proportion de courants parasites par rapport au courant total augmente avec la diminution des densités de courant. Une augmentation de la température entraîne une diminution de la résistance, des pertes de courant parasites plus importantes et des rendements Faraday plus faibles. Une expression empirique décrivant précisément ces phénomènes pour une température donnée est :

Rendement Faraday :

$$n_f = \left(\frac{I_{density}}{a1 + I_{density}} \right) a2 \quad (\text{III.9})$$

Selon la loi de Faraday, le taux de production d'hydrogène dans une cellule d'électrolyseur est directement proportionnel au taux de transfert d'électrons aux électrodes, lui-même équivalent au courant électrique dans le circuit externe. Par conséquent, le taux total de production d'hydrogène dans un électrolyseur, composé de plusieurs cellules connectées en série, peut s'exprimer comme suit :

Production d'hydrogène :

$$\dot{n}_{H2} = n_f N_{cells} \frac{I_{ely}}{n_f} \quad (\text{III.10})$$

Le taux de production d'oxygène est simplement trouvé à partir de la stœchiométrie qui, sur une base molaire, est :

Production d'oxygène :

$$n_{O_2} = \frac{1}{2} n_{H_2} \quad (\text{III.11})$$

La production de chaleur dans un électrolyseur est principalement due à des inefficacités électriques. L'efficacité énergétique peut être calculée à partir de la tension thermo neutre (U_{tn}) et de la tension de la cellule (U_{cell}) :

Efficacité énergétique :

$$n_e = \frac{U_{tn}}{U_{cell}} \quad (\text{III.12})$$

Afin de calculer les performances globales d'un système d'électrolyse, il est nécessaire de connaître le nombre de cellules en série et/ou en parallèle par pile et le nombre de piles par unité. La tension nominale d'une pile d'électrolyseur est déterminée à partir du nombre de cellules en série, tandis que le nombre de cellules en parallèle donne le courant nominal (et la production d'hydrogène). La puissance totale est simplement le produit du courant et de la tension.

Model thermodynamique

La thermodynamique fournit un cadre pour décrire l'équilibre réactionnel et les effets thermiques dans les réacteurs électrochimiques. Elle fournit également une base pour la définition des forces motrices des phénomènes de transport dans les électrolytes et conduit à la description des propriétés des solutions électrolytiques. Vous trouverez ci-dessous une description de la thermodynamique des réactions électrochimiques hydrogène-oxygène à basse température utilisées dans le modèle de l'électrolyseur.

La variation d'énergie de Gibbs s'exprime par :

Énergie libre de Gibbs :

$$\Delta G = \Delta H - \Delta ST_{ely} \quad (\text{III.13})$$

Ou tension de cellule réversible, s'exprime par :

Tension réversible (par cellule) :

$$U_{rev} = \frac{\Delta G}{n_f} \quad (\text{III.14})$$

La quantité totale d'énergie nécessaire à l'électrolyse de l'eau est équivalente à la variation d'enthalpie ΔH . D'après Erreur ! Source de référence introuvable, ΔG inclut l'irréversibilité thermique $T \Delta S$, qui, pour un processus réversible, est égale à la demande de chaleur. L'enthalpie standard pour la séparation de l'eau est $\Delta H_0 = 286 \text{ kJ mol}^{-1}$. La demande totale d'énergie ΔH est liée à la tension thermo neutre de la cellule :

Tension thermo neutre (par cellule) :

$$U_{tn} = \frac{\Delta H}{n_f} \quad (\text{III.15})$$

Dans les conditions standard, $U_{rev} = 1,229 \text{ V}$ et $U_{tn} = 1,482$, mais ces valeurs varient avec la température et la pression. Dans la plage de température applicable, U_{rev} diminue légèrement avec l'augmentation de la température (U_{rev} à 80 °C , $1 \text{ bar} = 1,184 \text{ V}$), tandis que U_{tn} reste quasiment constante (U_{tn} à 80 °C , $1 \text{ bar} = 1,473 \text{ V}$). Une augmentation de la pression augmente légèrement U_{rev} (U_{rev} à 25 °C , $30 \text{ bar} = 1,295 \text{ V}$), tandis que U_{tn} reste constante.

Bilan énergétique global :

$$C_T dT dt_{ely} = Q_{gen} - Q_{lcss} - Q_{cw} \quad (\text{III.16})$$

Énergie thermique générée :

$$Q_{gen} = N_{cell} I_{ely} (U_{cell} - U_{tn}) \quad (\text{III.17})$$

Pertes de chaleur dans l'air ambiant :

$$Q_{lcss} = \frac{1}{R_T} (T_{ely} - T_{amb}) \quad (\text{III.18})$$

Besoins en refroidissement auxiliaires :

$$Q_{cw} = C_{p.H2O} \quad (\text{III.19})$$

III.5.3. Type 167- Compresseur du H2

Le compresseur est modélisé comme un processus de compression polytropique à plusieurs étages comportant entre un et cinq étages intermédiaires.

Le compresseur utilisé dans ce système dont les caractéristiques sont présentées sur le tableau suivant :

Nome	Valeur	Unité
Nombre de compresseurs parallèles	1	-
Nombre d'étages du compresseur	3	-
Capacité thermique du gaz	28.86	[J/mol]

Tableau (III.8) : les données de Compresseur du H2

Les entrées et les sorties :

Les entres	Les sorties
Signal de contrôle	Puissance du compresseur
Pression d'entrée du gaz	Débit volumétrique de sortie
Pression de sortie souhaitée	Température de sortie maximale

Tableau (III.9) : Les entrées et les sorties de compresseur de H2

L'équation mathématiques utilisée pour calculer la puissance du compresseur qui sert pour comprimer l'hydrogène avant son stockage dans le réservoir est comme suit :

Ce modèle est basé sur un modèle de gaz parfait dans un processus de compression quasi-équilibre. Un processus quasi-équilibre est un processus dans lequel tous les états traversés par le système peuvent être considérés comme des états d'équilibre. Un processus polytropique est un processus quasi-équilibre qui décrit la relation entre pression et volume lors d'une compression. Il peut être exprimé ainsi :

$$(PV)^N = constant \quad \text{(III.20)}$$

Où P et V sont respectivement la pression et le volume du gaz idéal, et la valeur de N est une constante pour le processus particulier.

Travail polytropique (gaz parfait)

1er étage de compression :

$$W1 = \left(\frac{NRT_{low}}{N-1}\right)\left(1 - \left(\frac{P_x}{P_{in}}\right)^{\left(\frac{N-1}{N}\right)}\right) \quad (\text{III.21})$$

2ème étage de compression :

$$W2 = \left(\frac{NRT_{low}}{N-1}\right)\left(1 - \left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)^{\left(\frac{N-1}{N}\right)}\right) \quad (\text{III.22})$$

Puissance globale de compresseur :

$$P_{com} = \dot{m}_{in}(W1 + W2) \quad (\text{III.23})$$

Travail isotherme :

$$W_{iso} = -RT_{low} \ln\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) \quad (\text{III.24})$$

$$P_{iso} = \dot{m}_{in}W_{iso} \quad (\text{III.25})$$

Efficacité isentropique :

$$n_{isen} = \frac{P_{iso}}{P_{comp}} \quad (\text{III.26})$$

Le rendement isentropique implique une comparaison entre la performance réelle du compresseur et une performance idéalisée qui néglige la variation d'entropie.

Température de sortie d'un processus polytropique :

$$T_{high} = T_{low} R_f^{\frac{N-1}{N}} \quad (\text{III.27})$$

Chaleur produite par compression :

$$Q_{cool} = \dot{m}_{in} C_p (T_{high} - T_{low}) \quad (\text{III.28})$$

III.5.4. Type 164b- Stockage du H2

TYPE164 est un modèle de stockage de gaz comprimé. Cette instance du modèle calcule la pression dans le stockage à partir de l'équation d'état de van der Waals pour les gaz réels (Çengel et Boles, 1989 ; Ulleberg, 1998).

L'hydrogène stocké doit être suffisant pour subvenir aux besoins des piles à combustible. Les réservoirs doivent être suffisants pour stocker le gaz d'hydrogène en respectant les données citées dans le tableau suivant.

Nome	Valeur	Unité
Mode pression	2	-
Pression maximale	200	Bar
Volume du réservoir	50	M ³
Poids molaire du gaz	2.016	G/mol
Température critique du gaz	-240	C
Pression critique du gaz	12.9	-

Tableau (III.10) : les données de Stockage H2

Les entrées et les sorties :

Les entres	Les sorties
Débit volumétrique de gaz entrant dans le réservoir	Débit volumétrique auquel le gaz est déversé
Température du gaz	Volume de gaz
Niveau de pression initial	Pression de gaz

Tableau (III.11) : Les entrées et les sorties de stockage H2

Selon l'équation d'état de van der Waals, la pression p d'un gaz réel dans un réservoir de stockage peut être calculée à partir de :

$$P = \frac{nRT_{\text{gaz}}}{\text{Vol} - nb} - a \frac{n^2}{\text{Vol}^2} \quad (\text{III.29})$$

Où n désigne le nombre de moles de gaz, R la constante universelle des gaz, Vol le volume du réservoir et T_{gaz} la température du gaz. Le second terme (comprenant la constante a) représente les forces d'attraction intermoléculaires, tandis que b représente le volume occupé par les molécules de gaz.

Notez que la loi des gaz parfaits s'obtient en fixant a et b à 0 :

$$PVol = nRT_{gaz} \quad (III.30)$$

Dans l'équation de Van der Waals, a et b sont définis comme

$$a = \frac{27R^2T_{cr}^2}{64P_{cr}} \quad (III.31)$$

$$b = \frac{RT_{cr}}{8P_{cr}} \quad (III.32)$$

Où T_{cr} et P_{cr} sont respectivement la température et la pression critiques de la substance.

Le modèle effectue simplement un bilan massique (ou molaire) du gaz entrant et sortant du réservoir et calcule la pression correspondant à la masse d'hydrogène résultante dans le réservoir.

III.5.5. Type 173a- Pile à combustible

TYPE173 est un modèle mathématique simple pour une pile à combustible alcaline (PAC). Le modèle électrochimique repose sur une relation empirique pour la caractéristique courant-tension à température de fonctionnement normale. La chaleur générée par la pile PAC est calculée, mais aucun modèle thermique dynamique détaillé n'est inclus.

TYPE173 a été modélisé à partir d'une PAC spécifique de ZeTek (Brown, 2001 ; ZeTek, 2001). Cet exemple de Type173 suppose la présence d'air (par opposition à de l'oxygène pur) côté cathode.

La PAC choisi pour notre étude, présente les données suivantes :

Nome	Valeur	Unité
Type d'oxydant cathodique	1	-
Nombre de modules en série	64	-
Nombre de modules en parallèle	12	-
Zone d'électrode	100	Cm2
Efficacité de Faraday	0.987	Sans dimension
Tension en circuit ouvert	5.6	V
Pente de Tafel	0.21727222	V/dec

Résistance ohmique	0.01168209	Ohm
Tension minimale autorisée des cellules	0.4	V

Tableau (III.12) : Les données de PAC

Les entrées et les sorties :

Les entres	Les sorties
Signal de contrôle	Efficacité énergétique
Température de fonctionnement de la pile	Puissance de sortie de la pile à combustible
Pression d'entrée de H2	Taux de consommation H2
Courant de la pile	Energie généré

Tableau (III.13) : Les entrées et les sorties de PAC

Les équations mathématiques utilisées pour calculer la production de l'électricité produite suite au fonctionnement de la pile à combustible :

Tension de la cellule, du module et de l'empilement :

$$U_{cell} = \frac{U_{mod}}{n_{c.ser}} \quad (III.33)$$

$$U_{mod} = U_0 - b \log(I_{stack}) - R_{ohm} I_{stack} \quad (III.34)$$

$$U_{stack} = n_{m.ser} U_{mod} \quad (III.35)$$

Courant de cellule et de pile :

$$I_{cell} = \frac{I_{FC}}{n_{c.par} n_{s.par}} \quad (III.36)$$

$$I_{stack} = \frac{I_{FC}}{n_{s.par}} \quad (III.37)$$

La puissance de la pile à combustible : est fonction du courant et de la tension :

$$P_{stack} = U_{stack} I_{stack} \quad (III.38)$$

Efficacité énergétique :

$$n_e = \frac{U_{cell}}{U_{tn}} \quad (III.39)$$

Débit molaire stœchiométrique d'hydrogène :

$$n_{H2} = \frac{n_{c.ser} n_{m.ser} I_{FC}}{zF} \quad (III.40)$$

Consommation totale d'hydrogène :

$$V_{H2} = \frac{n_{H2}}{\rho_{gas}} S_{H2} \quad (III.41)$$

Chaleur totale générée par la pile à combustible :

$$Q_{gen} = P_{stack} \left(\frac{1-n_e}{n_e} \right) \quad (III.42)$$

III.5.6. Type 175a- Onduleurs électriques (DC/AC ou AC/DC)

TYPE175 est un modèle mathématique pour une unité de conditionnement d'énergie. Ce modèle est basé sur des courbes de rendement empiriques pour des convertisseurs électriques (DC/DC) ou des onduleurs (DC/AC ou AC/DC). La relation empirique utilisée dans TYPE175 a été initialement proposée par (Laukamp, 1988) et améliorée par (Ulleberg, 1998). Dans ce cas, on suppose que la puissance d'entrée disponible est connue. La puissance de sortie correspondante est calculée.

L'onduleur électrique choisi pour notre étude, présente les données suivantes :

Nome	Valeur	Unité
Mode	1	-
Puissance nominal	350000	W
Constant de ralenti	5.836E-3	-
Tension de consigne	2.06	V
Constant ohmique	138.42	V^2
Nombre d'unité en parallèle	1	-
Puissance parasite	0	W

Tableau (III.14) : Les données d'onduleur électrique (DC/AC ou AC/DC)

Les entrées et les sorties :

Les entres	Les sorties
Puissance d'entrée	Puissance de sortie
Tension d'entrée	Tension de sortie

Tension de sortie	Courant de sortie
	Efficacité

Tableau (III.15) : Les entrées et les sorties d'onduleur

Les conditionneurs de puissance sont des dispositifs capables d'inverser le courant continu en courant alternatif, et/ou inversement, ou fonctionnent comme des convertisseurs CC/CC. Dans un système d'alimentation autonome (SAPS) composé de composants producteurs et consommateurs de courant continu, des convertisseurs CC/CC sont parfois nécessaires pour transférer le courant continu d'une tension à une autre. Cela est particulièrement vrai en cas de forte discordance entre les caractéristiques I-U des différents composants.

Dans un SAPS utilisant une source d'énergie naturelle, comme l'énergie éolienne, la puissance d'entrée du système varie continuellement dans le temps. Les caractéristiques de sortie d'une éolienne présentent des points de puissance de crête qui dépendent respectivement de la vitesse du vent. Il peut être avantageux d'utiliser un dispositif de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour exploiter pleinement la puissance d'entrée. La perte de puissance (P_{loss}) d'un conditionneur d'énergie dépend principalement du courant électrique qui le traverse. Laukamp a proposé une expression à trois paramètres pour décrire la perte de puissance d'un conditionneur d'énergie :

$$P_{loss} = P_{In} - P_{out} \quad (III.43)$$

$$P_{in} - P_{out} = P_0 + \frac{U_s}{U_{out}} P_{out} + \frac{R_{in}}{U_{out}^2} P_{out}^2 \quad (III.44)$$

Une relation pratique entre la puissance d'entrée P_{in} et la puissance de sortie P_{out} peut être obtenue en normalisant l'équation 4.2.8-1 par rapport à la puissance nominale (maximale) P_n du conditionneur d'énergie :

$$\frac{P_{in}}{P_{nom}} = \frac{P_0}{P_{nom}} + \left(1 + \frac{U_s}{U_{out}}\right) \frac{P_{out}}{P_{nom}} + \frac{R_{in}}{U_{out}} P_{nom} \left(\frac{P_{out}}{P_{nom}}\right) \quad (III.45)$$

Dans le type 175, la puissance d'entrée P_{in} ou la puissance de sortie P_{out} peuvent être spécifiées comme entrées. Si P_{out} est une entrée, l'équation (III.45) est utilisée directement. Cependant, si la broche est l'entrée, une expression dérivée analytiquement de l'équation 3 est utilisée. Cela rend le modèle numériquement très robuste. Le rendement du conditionneur de puissance est simple :

Rendement électrique :

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (III.46)$$

Courant de sortie :

$$I_{out} = \frac{P_{out}}{U_{out}} \quad (III.47)$$

III.5.7. Type 105a- Contrôles principaux pour un système de mini-réseau éolien-hydrogène

Le Type 105 est un contrôleur maître pour un système électrique autonome composé d'éoliennes (ou d'une autre source d'énergie renouvelable), d'un électrolyseur, d'une pile à combustible, d'un dispositif de stockage d'hydrogène et de groupes électrogènes diesel (ou d'une autre source d'énergie auxiliaire composée de plusieurs unités).

Nome	Valeur	Unité
Nombre minimum de DEGS en fonctionnement	0	-
Nombre maximal de DEGS en fonctionnement	5	W
Puissance nominale DEGS	300000	W
Puissance de ralenti de la pile à combustible	60000	W
Puissance nominale de la pile à combustible	300000	W
Puissance de ralenti de l'électrolyseur	120000	W
Puissance nominale de l'électrolyseur	500000	W
Limite extérieure de stockage de H2 (électrolyseur)	90	% (base 100)
Limite inférieure de stockage de H2 (électrolyseur)	80	% (base 100)
Limite supérieure de	20	% (base 100)

stockage de H2 (pile à combustible)		
Limite inférieure de stockage de H2 (pile à combustible)	10	% (base 100)

Tableau (III.16) : les données de Type 105a- Contrôles principaux pour un système de mini-réseau éolien-hydrogène

Les entrées et les sorties :

Les entres	Les sorties
Puissance de charge	Puissance de l'électrolyseur
Puissance d'entrée	Puissance la pile à combustible
Stockage d'hydrogène SOC	Signal de commande de l'électrolyseur
	Signal de commande de la pile à combustible

Tableau (III.17) : Les entrées et les sorties de Contrôles principaux pour un système de mini-réseau éolien-hydrogène

III.5.8. Type 150- Contrôleur de sortie retardée

Ce composant modélise un contrôleur « collant » dont les sorties sont définies sur les valeurs d'entrée d'un pas de temps précédent défini par l'utilisateur. Par exemple, l'utilisateur peut décider que les sorties d'un autre composant soient basées sur les températures de zone de l'heure précédente, voire de la veille.

La persistance est définie par le nombre de pas de temps et non par le nombre d'heures.

Nome	Valeur	Unité
Nombre d'entrées	1	-
Nombre de pas de temps pour conserver la valeur	1	-
Valeur initiale de la fonction	250	-

Tableau (III.18) : Les données de Type 150- Contrôleur de sortie retardée

III.5.9. Type 120a- Modèle générique de moteur diesel (DEGS)

TYPE120 est un modèle mathématique pour un groupe électrogène diesel (GED). Ce modèle repose sur une relation empirique (polynôme du premier ordre) pour la consommation de carburant exprimée en fonction de la puissance électrique (normalisée). Les rendements électrique et énergétique sont calculés. Dans ce cas, Type120 est utilisé pour prédire les performances d'un GED générique dans la plage de puissance de 5 à 500 kW. Le modèle générique extrapole à partir d'une courbe de rendement énergétique de référence (moyenne de 5 GED différents).

Il intègre un facteur de correction dérivé de mesures réelles sur les GED de 20 systèmes d'alimentation électrique en zone isolée (RAPS) avec des puissances moyennes de fonctionnement comprises entre 5 et 186 kW (Lloyd, 1999).

Le carburant par défaut est le diesel (liquide), mais une base de données avec les propriétés du carburant (Adler et al., 1986 ; McCarthy, 1982) incluse dans TYPE120 permet de calculer les débits de carburant équivalents (liquide ou gaz) pour 5 carburants alternatifs : gaz liquéfié (GPL), propane (C₃H₈), méthane (CH₄), gaz naturel ou hydrogène (H₂).

Nom	Valeur	Unité
DEGS mode	1	-
DEGS Type	1	-
Puissance maximal DEGS	360	KW
Puissance minimal DEGS	0	KW
Puissance nominale	300	KW

Tableau (III.19) : Les données de moteur diesel (DEGS)

III.5.10. Type 15-6- Processeur de données météorologiques

Ce composant permet de lire les données à intervalles réguliers à partir d'un fichier de données météorologiques externe, d'interpoler les données (y compris le rayonnement solaire pour les surfaces inclinées) à des pas de temps inférieurs à une heure et de les mettre à

disposition des autres composants TRNSYS. Le modèle calcule également plusieurs termes utiles, notamment la température de l'eau du réseau, la température effective du ciel et les fonctions de forçage des saisons de chauffage et de refroidissement.

Cette version de Type15 lit les données au format de fichier météo Energy Plus (EPW). Pour notre simulation on a choisi la météo d'Ain Témouchent.

III.5.11. Type 14h- Fonction de forçage dépendante du temps pour le profil de demande de puissance

III.5.11.1. Profil journalier normalisé

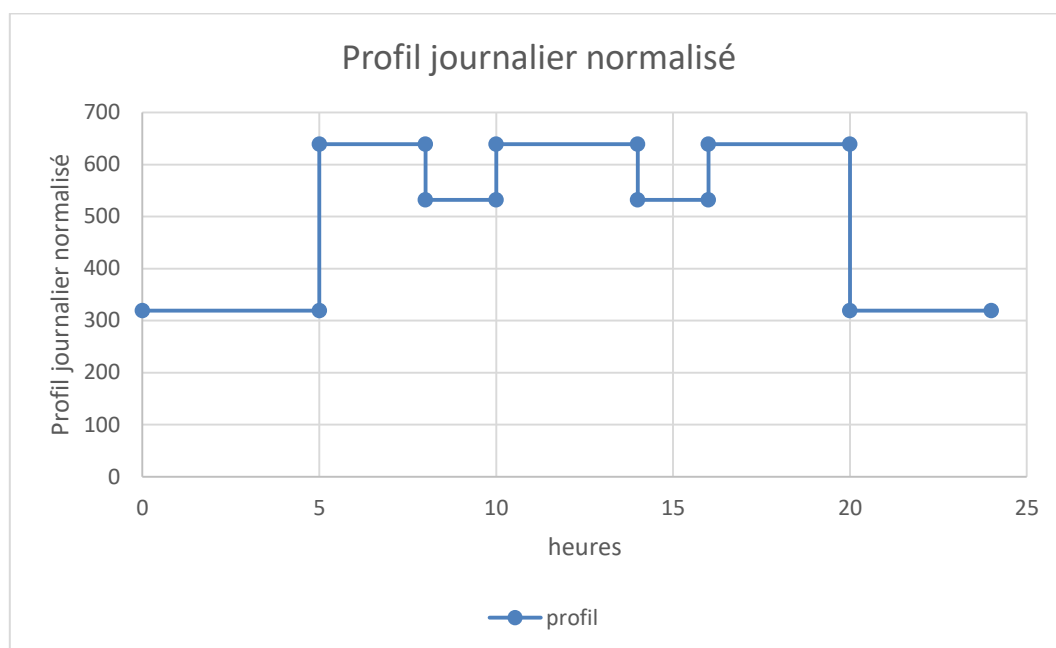


Figure (III.24) : Profil journalier normalisé

La figure (III.3) représente l'évolution horaire de la demande énergétique sur une journée type, sous forme normalisée. L'axe des abscisses (x) indique les heures de la journée (0 à 24 h), tandis que l'axe des ordonnées (y) illustre un profil de consommation énergétique normalisé, sans unité explicite (probablement en W ou kW après normalisation).

Structure de la courbe

- **De 0h à 5h :**

Valeur stable autour de 319. Activité minimale, typique des heures de sommeil.

- **De 5h à 8h :**

Forte augmentation à environ 639. Correspond probablement à la montée de l'activité matinale (réveil, préparation, déplacements).

- **De 8h à 10h :**

Légère baisse à environ 532. Activité stabilisée après le pic du matin, peut-être liée au début des heures de travail.

- **De 10h à 14h :**

Nouvelle hausse stable à 639. Reflète une forte activité pendant la journée (heures pleines de travail).

- **De 14h à 16h :**

Rechute à 532. Pause ou réduction de l'intensité d'activité, typique de l'après-midi.

- **De 16h à 20h :**

Retour à une valeur élevée (~639). Deuxième pic journalier, probablement dû à l'activité domestique du soir.

- **De 20h à 24h :**

Nouvelle chute à 319. Retour à une faible activité, phase de repos nocturne.

III.5.11.2. Ratios mensuels

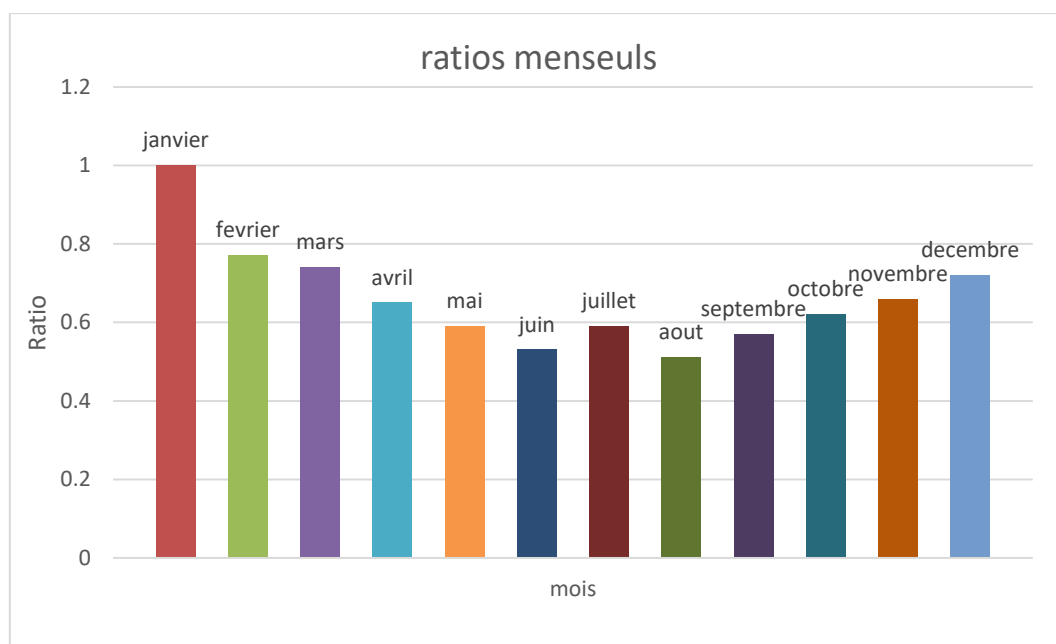


Figure (III.25) : Ratios mensuels

La figure (III.4) à barres intitulé "ratios mensuels" présente le ratio sur l'axe vertical (y) et les mois de l'année sur l'axe horizontal (x). Chaque barre représente un mois différent et sa hauteur indique la valeur du ratio pour ce mois.

Structure et tendances générales

- Janvier affiche le ratio le plus élevé, atteignant environ 1. Cela indique une performance ou une activité significativement supérieure par rapport aux autres mois.
- Les mois février, mars, et avril montrent une diminution progressive du ratio, avec des valeurs proches de 0,8 pour février et autour de 0,6 pour mars et avril.
- De mai à août, les ratios restent relativement stables, oscillant autour de 0,5 à 0,6, sans variations majeures.
- Une légère augmentation est observée en septembre, suivie d'une stabilité relative en octobre et novembre, avec des ratios proches de 0,7.
- Décembre montre une hausse notable du ratio, atteignant environ 0,8.

III.5.11.3. Équation de la Puissance de Charge

Une fois qu'on a les deux graphes, la puissance de charge réelle peut être exprimée par :

$$P(t) = P_{max}R_m(t)100$$

Où :

- $P(t)$ = Puissance de charge à l'instant t .
- P_{max} = Puissance maximale de la charge (en kW).
- $R_m(t)$ = Ratio du mois correspondant.

III.5.12. Type 65c- Traceur graphique en ligne avec fichier de sortie.

Le composant graphique en ligne permet d'afficher les variables système sélectionnées pendant la simulation. Ce composant est fortement recommandé et largement utilisé, car il fournit des informations précieuses sur les variables et permet aux utilisateurs de visualiser immédiatement si le système ne fonctionne pas comme prévu. Les variables sélectionnées s'affichent dans une fenêtre de tracé distincte à l'écran. Dans ce cas, le traceur en ligne Type65 affiche automatiquement les données envoyées, une fois par pas de temps, dans un fichier

externe défini par l'utilisateur. Les descripteurs d'unités (kJ/h, kg/s, °C, etc.) ne sont pas imprimés dans le fichier de sortie.

Conclusion

À l'issue de ce chapitre, il ressort clairement que la modélisation et la simulation à l'aide de TRNSYS représentent une étape cruciale dans l'étude du fonctionnement et de la performance d'un mini-réseau hybride basé sur les énergies renouvelables, notamment l'énergie éolienne, ainsi qu'un système de conversion hydrogène composé d'un électrolyseur, d'un réservoir d'hydrogène et d'une pile à combustible. Cette simulation a permis de traduire les concepts théoriques et les considérations techniques présentés dans les chapitres précédents en un modèle dynamique capable de simuler l'interaction des composants en temps réel, et ce, sous des conditions climatiques et des profils de demande électrique variables.

Le logiciel TRNSYS a été choisi pour sa grande flexibilité et sa capacité à représenter avec précision des systèmes complexes. Il a permis l'intégration cohérente des différents composants (types), tels que les éoliennes (Type 90), le convertisseur électrique (Type 175), l'électrolyseur (Type 160), le réservoir d'hydrogène (Type 164) et la pile à combustible (Type 173). Pour chaque composant, les caractéristiques physiques, les équations de fonctionnement et les paramètres techniques ont été soigneusement définis, de manière à refléter fidèlement les contraintes d'un environnement réel, en particulier dans un contexte local comme celui de Ain Témouchent.

Par ailleurs, une attention particulière a été accordée à la logique de contrôle et à l'enchaînement fonctionnel des unités à l'intérieur de l'environnement TRNSYS, en utilisant les connexions de données appropriées. Cette structuration rigoureuse a permis de construire une plateforme numérique cohérente, modulaire et évolutive, offrant la possibilité de simuler différents scénarios d'exploitation et d'adapter le système à d'autres configurations énergétiques futures.

Cette partie de modélisation met également en évidence l'importance d'une démarche méthodique, allant du choix des paramètres de simulation à l'organisation des flux énergétiques et d'information entre les composants. L'intégration de données climatiques réelles (par exemple via un fichier tm2) constitue un atout essentiel pour garantir la pertinence et la représentativité des simulations.

Ce chapitre constitue une base solide pour l'analyse à venir. Le modèle ainsi élaboré servira de socle pour l'étude des performances énergétiques du système hybride, dans le chapitre suivant, où seront analysées les résultats de la simulation de ce système.

Chapitre IV : Résultats de simulation

Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'analyser les résultats et de discuter du système d'alimentation autonome éolien – stockage d'hydrogène étudié. Nous analysons les performances des systèmes dans les conditions particulières de région d'Ain Témouchent en utilisant les données météorologiques collectées et les simulations effectuées. Par la suite, les résultats obtenus sont analysés pour mettre en lumière les éléments qui influencent ces performances et repérer les moyens d'améliorer cette technologie dans le contexte local.

IV.1. Données météorologiques

Après avoir identifié la localisation géographique de la wilaya d'Ain Témouchent. Les informations affichées incluent la vitesse du vent, l'irradiation globale ainsi que la température ambiante, toutes mesurées par heure. Pour la région d'Ain Témouchent, ces données permettent une analyse détaillée des conditions climatiques locales, essentielles pour des applications telles que la planification de projets d'énergie éolienne ou d'autres études environnementales.

La figure (IV.1) présente les variations annuelles de la vitesse du vent, l'irradiation globale et la température ambiante sur deux jours de 15 février (l'hiver) et de 15 juillet (été) dans la wilaya d'Ain Témouchent.

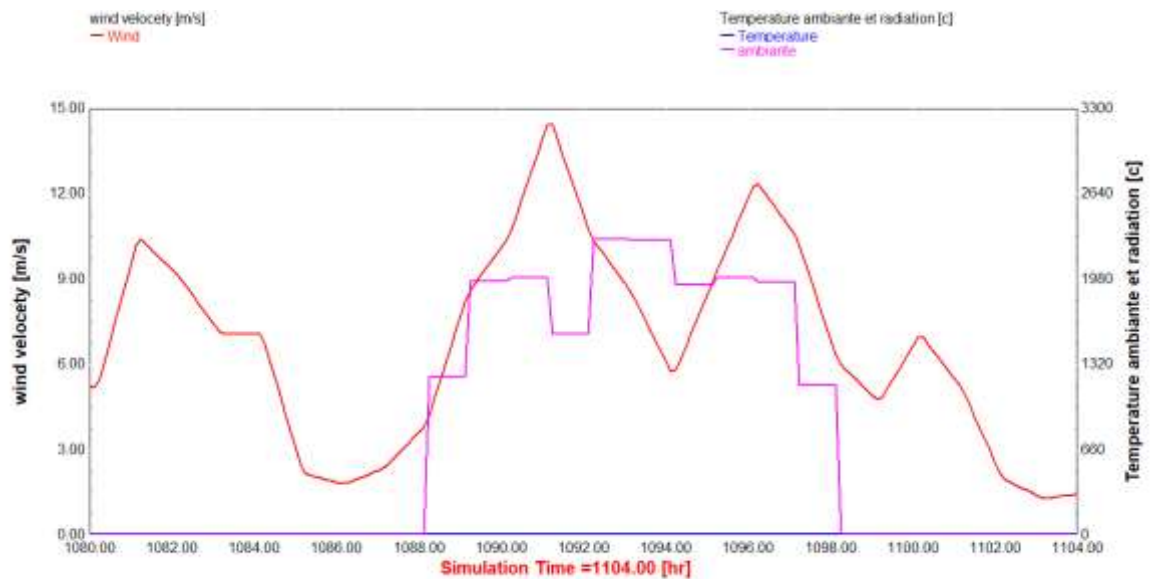
a) Pour le 15 février (l'hiver)

la vitesse de vent (courbe rouge) connaît des variations importantes, atteignant jusqu'à 14 m/s, ce qui indique un potentiel éolien élevé, tandis que l'irradiation diffuse (courbe rose) est estimée à environ 2300 (kJ/hr.m²) et la température ambiante (courbe bleu) reste constante dans certaines limites 12,04 °C.

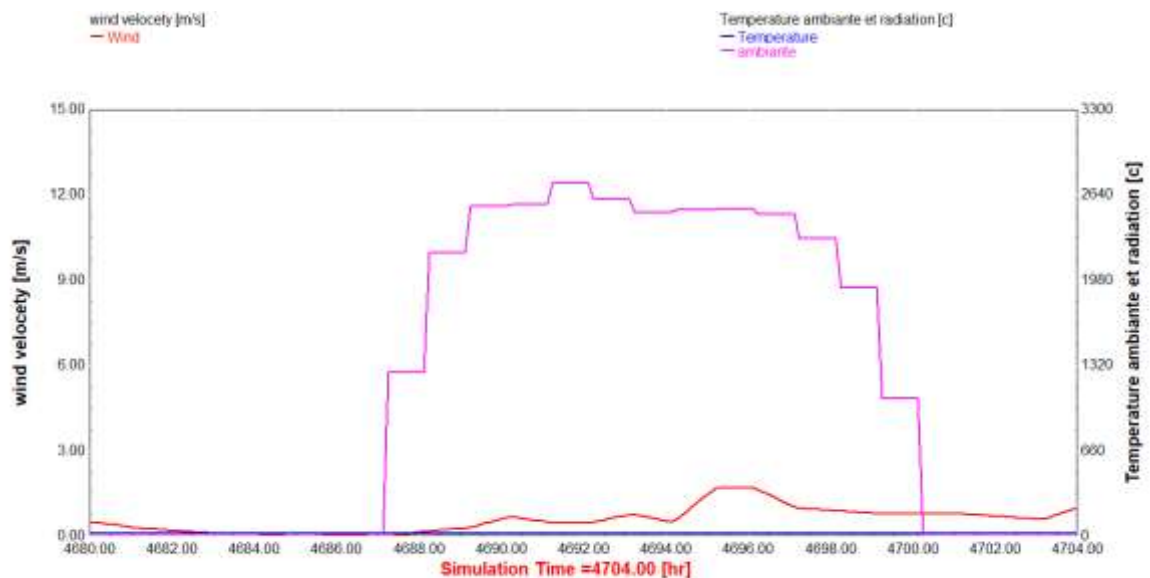
b) Pour le 15 juillet (été)

la vitesse du vent est très faible (inférieure à 2 m/s la majorité du temps), ce qui limite fortement la production éolienne., l'irradiation diffuse élevée et stable pendant la journée (atteignant jusqu'à 2600 W/m²), mais ne contribue pas à la production, car le système ne dispose pas de panneaux photovoltaïques. et la température ambiante (courbe bleu) est très élevée dans certaines limites 27 °C.

Ces données sont cruciales pour évaluer le potentiel éolienne de la région et optimiser la conception de systèmes d'énergie renouvelable, en tenant compte des variations saisonnières et des conditions météorologiques locales.



(a)



(b)

Figure (IV.26) : la variation de la vitesse de vent, la température ambiante, l'irradiation globale durant les jours (15 février) et de (15 juillet).

Ces résultats concernent particulièrement l'éolienne, l'électrolyseur, la pile à combustible et le stockage d'énergie.

Dans cette simulation nous avons choisi deux différents jours

- ❖ 15 février (l'hiver).
- ❖ 15 juillet (été).

IV.2. Résultats de simulation de l'éolienne

IV.2.1. Variation de la puissance générée par l'éolienne et le Cp

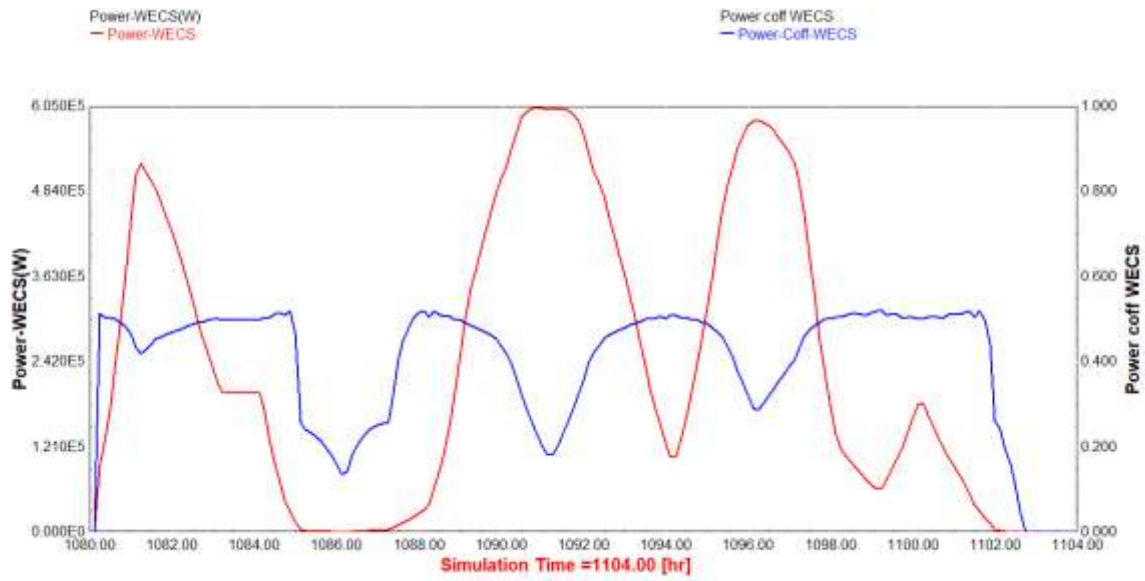
La figure (IV.2) présente l'évolution de la puissance générée par l'éolienne (courbe rouge) ainsi que celle du coefficient de puissance Cp (courbe bleue) sur deux jours différents 15 février, et 15 juillet).

a) Pour le 15 février (l'hiver)

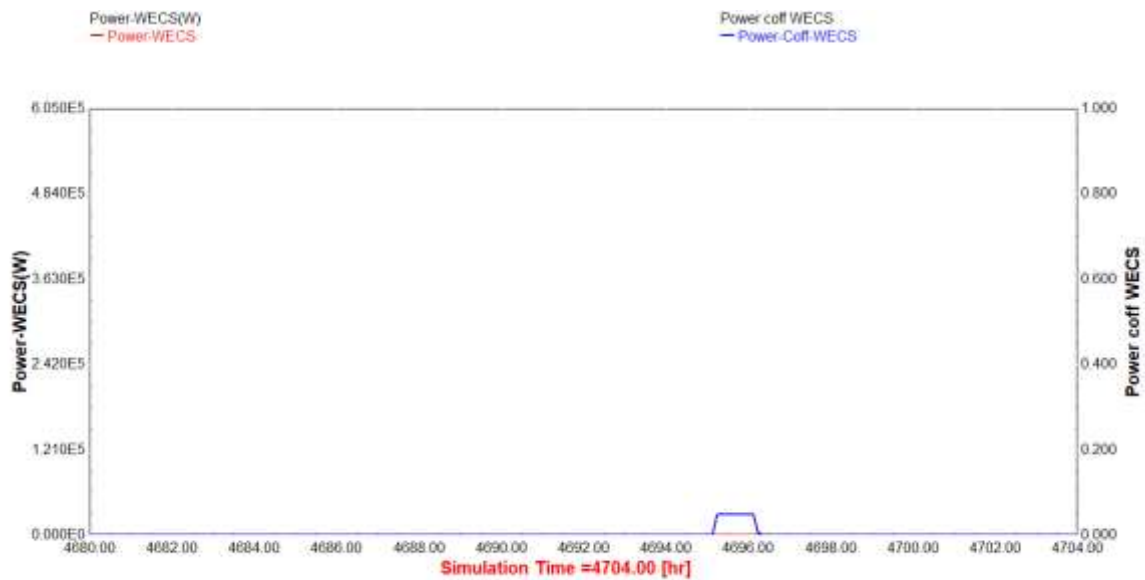
la puissance produite par l'éolienne (courbe rouge) atteint un pic d'environ 600 kW durant les périodes où la vitesse du vent est la plus élevée (1080 h, 1090h, 1096h), Le coefficient de puissance Cp (courbe bleu), on remarque que les pics de puissance correspondent aux pics du coefficient de puissance. Cela confirme que le rendement aérodynamique élevé du rotor éolien permet d'extraire davantage d'énergie du vent lorsque celui-ci est disponible.

b) Pour le 15 juillet (été)

la puissance produite par l'éolienne est totalement nulle. et le coefficient est égal à zéro. Cela est dû au manque de vent. Cela confirme que sur le long terme, le système éolien reste efficace, mais son fonctionnement dépend fortement des conditions climatiques. Pour un mini-réseau autonome, cela souligne la nécessité d'un couplage avec des systèmes de stockage d'hydrogène pour pallier les périodes de faible production.



(a)



(b)

Figure (IV.27) : Variation du puissance généré par l'éolienne et Cp durant les jours (15 février) et de (15 juillet).

IV.3. Résultats de simulation de l'électrolyseur

IV.3.1. Variation de la température de l'électrolyseur et de refroidissement et le taux d'hydrogène et d'oxygène

La figure (IV.3) représente la Variation de température de l'électrolyseur et de refroidissement et le taux de transfert de chaleur durant les jours (15 février) et de (15 juillet).

a) Pour le 15 février (l'hiver)

la température de fonctionnement (courbe rouge) atteint régulièrement la valeur critique de 80 °C, indiquée par une ligne constante. La température de refroidissement (courbe bleu) est augmentée pendant les périodes de forte activité de l'électrolyseur °C, ce qui montre que le système de refroidissement fonctionne efficacement pour limiter la montée en température de l'électrolyseur.

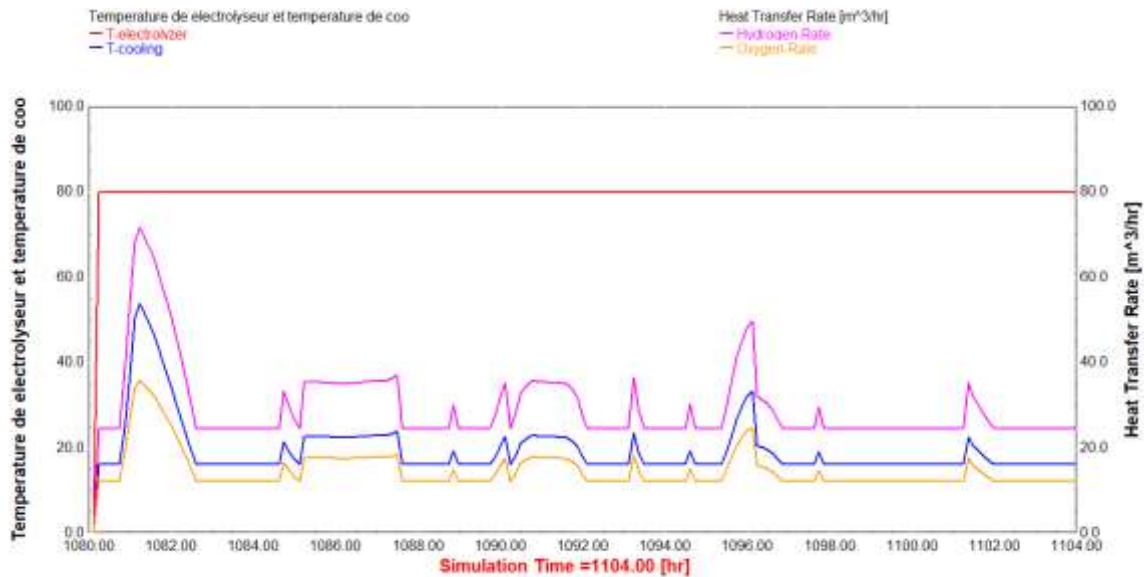
Le taux de l'hydrogène (courbe rose) atteint un pic maximal d'environ 70 m³/hr, vers 10h15, ce qui est cohérent avec la stœchiométrie de l'électrolyse de l'eau (2 H₂ pour 1 O₂). Le taux de l'oxygène suit la même tendance que celui de l'hydrogène, avec une valeur stable environ de 33 m³/hr dans les mêmes périodes de fonctionnement actif de l'électrolyseur.

b) Pour le 15 juillet (été)

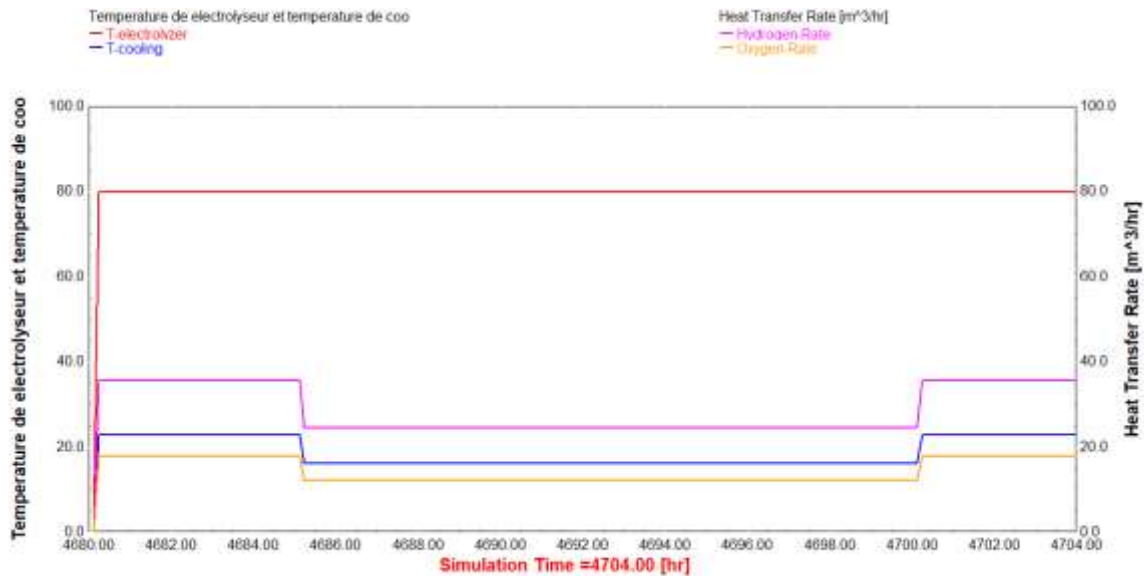
la température de l'électrolyseur (courbe rouge) est constante à environ 80 °C. Le système de régulation thermique reste actif, mais cela ne reflète pas forcément un fonctionnement intense. La température de refroidissement (courbe bleu) est d'environ 16 et 22 °C, cette

oscillation indique que le système fonctionne à puissance réduite ou avec des interruptions longues car moins de production.

Le taux de l'hydrogène (courbe rose) est estimé à environ 24,57 et 35,8 m³/hr, la majorité du journée cette baisse de la production d'hydrogène est due à une baisse de la production d'électricité par l'éolien. Le taux d'oxygène (courbe orange) suit une tendance parallèle à celui de l'hydrogène, avec des valeurs autour de 12,29 et 17 m³/hr, ce qui est cohérent avec la stœchiométrie de la réaction d'électrolyse de l'eau.



(a)



(b)

Figure (IV.28) : Variation de température de l'électrolyseur et de refroidissement et le taux de transfert de chaleur durant les jours (15 février) et de (15 juillet).

IV.3.2. Variation de la puissance de (électrolyseur, chaleur générée et stockage) et de l'efficacité (globale, énergétique et faraday)

La Figure (IV.4) représente la variation de puissance (électrolyseur, chaleur générée et stockage) et de l'efficacité (globale, énergétique et faraday) durant les jours (15 février) et de (15 juillet).

a) Pour le 15 février (l'hiver)

la puissance consommée par l'électrolyseur (courbe rouge) varie par cycles, en lien probable avec la disponibilité énergétique (énergie éolienne). La puissance atteint environ 100 kW et 300 kW, indiquant une consommation significative lors des phases actives. La chaleur générée (courbe bleu) est plus faible que la puissance électrique absorbée environ de 4,5 kW et 37 kW.

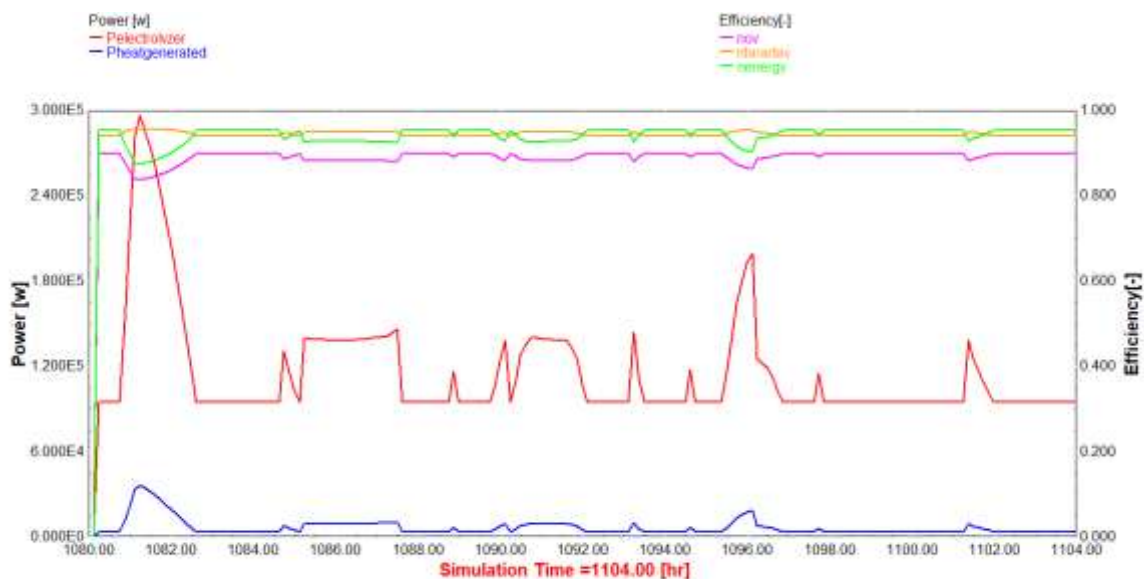
Le rendement global (courbe rose) observé du système. Il reste relativement stable autour de 0,84 et 0,89. Le rendement faradique (courbe orange) proche de 0,96 tout au long de la simulation, indiquant que presque toute l'électricité consommée sert à produire de l'hydrogène sans pertes faradiques majeures. Le rendement énergétique global (courbe vert) est élevé et proche de 0,89, suggérant une bonne efficacité de conversion, même si certaines pertes apparaissent à intervalles réguliers.

b) Pour le 15 juillet (été)

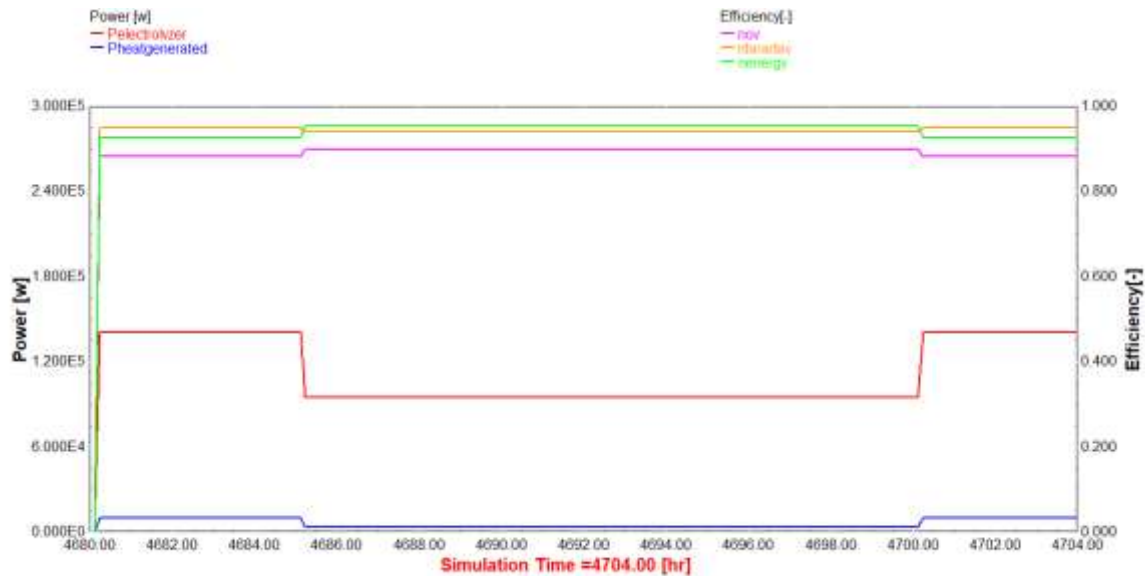
la puissance consommée par l'électrolyseur (courbe rouge) est estimée à environ 95 kW sur une longue période, passage bref à 140 kW, indiquant une consommation plus faible en raison d'une pénurie d'électricité éolienne. La chaleur générée (courbe bleu) stable à 4,3 kW, indiquant un fonctionnement plus faible de l'électrolyseur.

Le rendement global (courbe rose) observé du système. Il reste relativement autour de 0,9. Le rendement faradique (courbe orange) proche de 0,94 tout au long de la simulation. Le rendement énergétique global (courbe vert) est élevé et proche de 0,95.

La capacité de production de chaleur et la capacité de stockage sont restées presque inexistantes, ce qui indique que le système a été conçu pour une consommation immédiate de l'énergie produite sans recourir au stockage.



(a)



(b)

Figure (IV.29) : Variation de puissance de l'électrolyseur et la chaleur générée et de l'efficacité (globale, énergétique et faraday) durant les jours (15 février) et de (15 juillet).

IV.4. Résultats de simulation de La pile à combustible

IV.4.1. Variation de la puissance de sortie et l'énergie généré par PAC et la consommation d'air et de H₂

La figure (IV.5) représente la variation de la puissance de sortie et l'énergie généré par PAC et la consommation d'air et de H₂ durant les jours (21 janvier) et de (15 juillet).

a) Pour le 15 février (l'hiver)

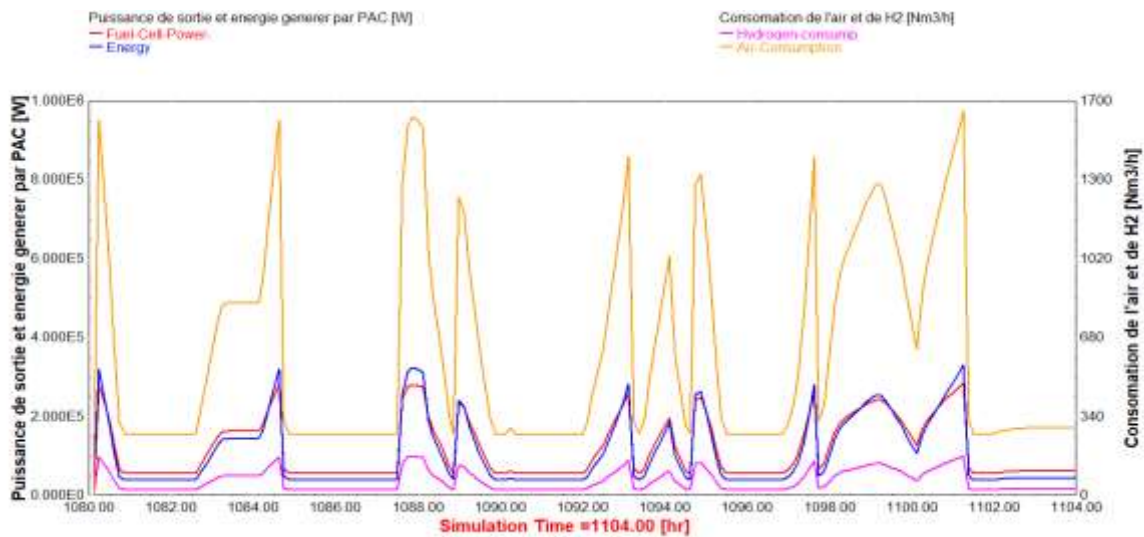
la puissance de la pile (courbe rouge) varie entre 58 kW et 285 kW. L'énergie générée (courbe bleue) est environ de 41 kW et de 320 kW.

La consommation d'hydrogène (courbe rose) augmente avec l'augmentation de l'énergie, sa valeur varie entre 175 m³/hr à 27 m³/hr. Ainsi que la consommation d'air (courbe orange) chute de 1600 m³/hr à 265 m³/hr.

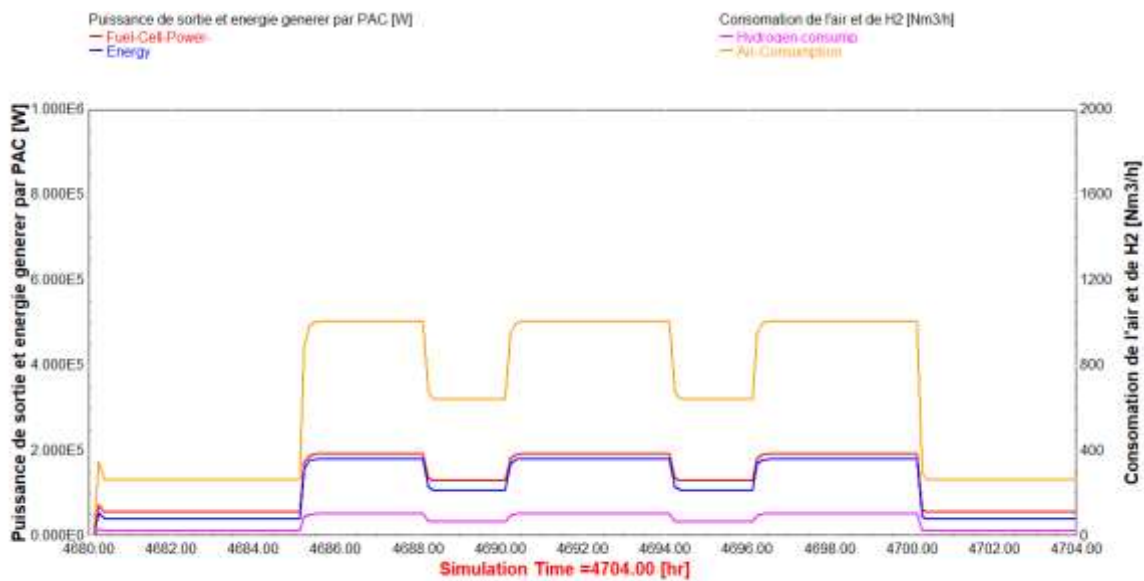
b) Pour le 15 juillet (été)

la puissance de la pile (courbe rouge) est environ de 57 kW et 284 kW. l'énergie générée (courbe bleue) est environ de 42 kW et de 182 kW.

La consommation d'hydrogène (courbe rose) varie entre 67 m³/hr et 107 m³/hr, la consommation d'air (courbe orange) est dans les limites de 645 m³/hr à 1009 m³/hr.



(a)



(b)

Figure (IV.30) : Variation de la puissance de sortie et l'énergie générée par PAC et la consommation d'air et de H2 durant les jours (15 février) et de (15 juillet).

IV.5. Résultats de simulation de stockage d'hydrogène

IV.5.1. Variation de stockage de gaz en volume et à débit volumétrique, et de stockage de gaz sous pression et sous niveau de pression

La figure (IV.6) représente la Variation de stockage de gaz en volume et à débit volumétrique, et de stockage de gaz sous pression et sous niveau de pression durant les jours (15 février) et de (15 juillet) dans la ville d'Ain Témouchent, Où nous remarquons.

a) Pour le 15 février (l'hiver)

le volume de gaz (courbe rouge) diminue de 8000 à 7100 m³/hr, tandis que le débit volumétrique de stockage (courbe bleue) est égal à zéro.

La pression du gaz (courbe rose), sa valeur diminue de 200 et 175 bar, tandis que le niveau de pression (courbe orange) sa valeur reste faible et proche de zéro, autour de 0,47.

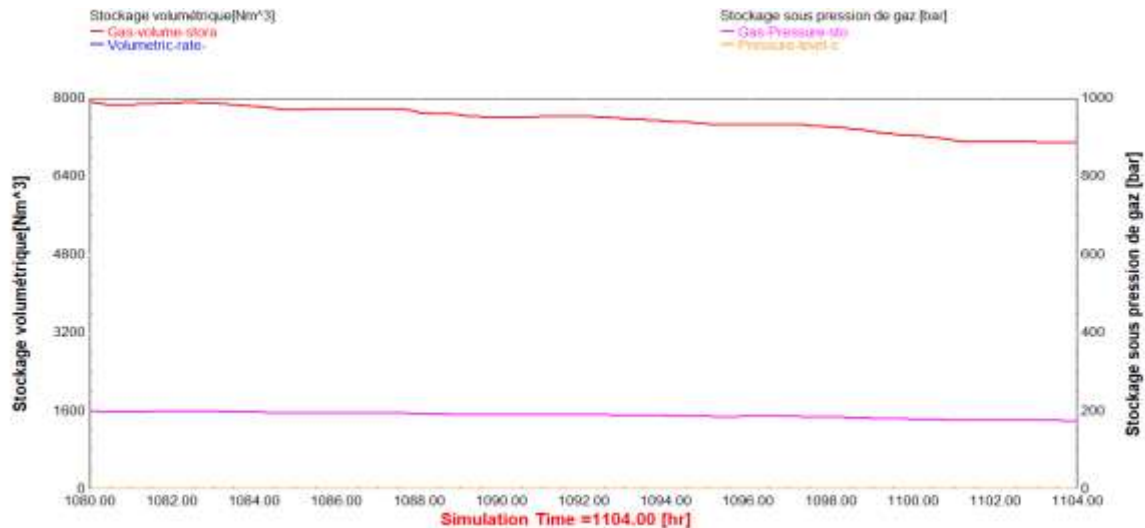
La raison de l'augmentation du gaz stocké est la présence d'un excédent et d'une production importante.

b) Pour le 15 juillet (été)

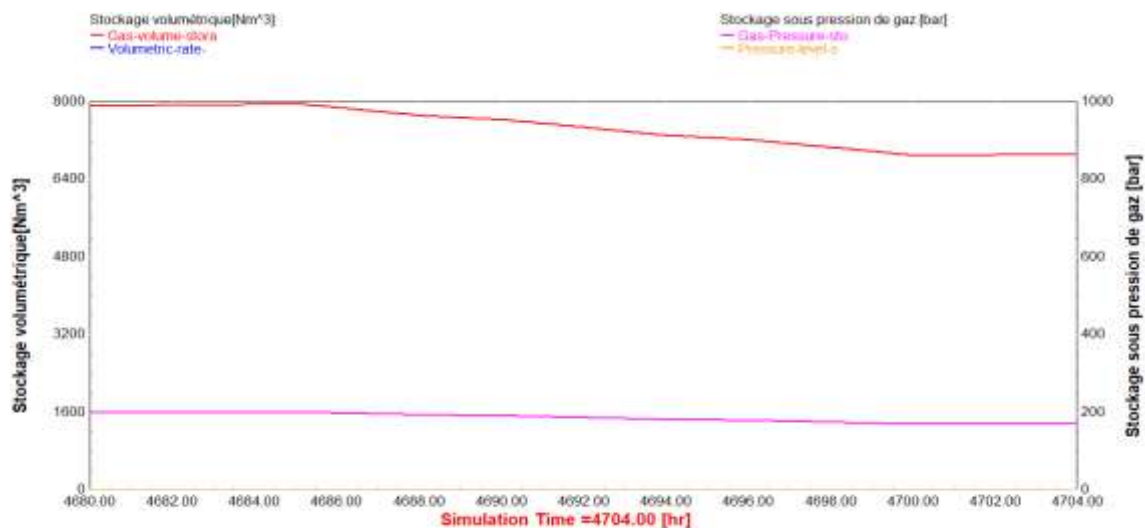
le volume de gaz (courbe rouge) diminue de valeur 8000 à 6900 m³/hr, de l'autre côté le débit volumétrique de stockage (courbe bleue) est égal à zéro.

La pression du gaz (courbe rose) diminue de 200 bar à 170 bar, tandis que le niveau de pression (courbe orange) sa valeur reste faible et proche de zéro, autour de 0,45.

La raison de la diminution du volume de gaz est son utilisation dans la production d'électricité par piles à combustible en raison de la pénurie d'énergie éolienne.



(a)



(b)

Figure (IV.31) : Variation de stockage de gaz en volume et à débit volumétrique, et de stockage de gaz sous pression et sous niveau de pression durant les jours (15 février) et de (15 juillet).

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons observé puis interpréter la simulation de notre système durant deux jours (15 février et 15 juillet) totalement différent climatiquement. La simulation a donné les résultats suivants :

En hiver, grâce à des vitesses de vent élevées (jusqu'à 14,5 m/s),

- la puissance extraite par l'éolienne a permis de produire environ 5700 kWh sur 24 heures. avec un coefficient de performance (C_p) moyen de 0,5, indiquant un bon rendement aérodynamique. Cette production alimente en grande partie l'électrolyseur en énergie électrique.
- Au niveau de l'électrolyseur, les conditions de fonctionnement ont montré une température de cellule stable autour de 80 °C, tandis que la température du circuit de refroidissement a été maintenue entre 17 et 55 °C, assurant ainsi un bon équilibre thermique. Le taux d'hydrogène et a été estimé à 35 et 70 m³/hr, et d'oxygène avec des valeurs autour de 12,29 et 17 m³/hr.
- La puissance électrique consommée par l'électrolyseur était de l'ordre de 290 et 95 kW, produisant à la fois de l'hydrogène et de la chaleur. La puissance générée environ de 4,5 kW et 37 kW., ce qui a permis de calculer les efficacités suivantes :
 - Efficacité énergétique : 95 %
 - Efficacité globale : 90 %
 - Efficacité de Faraday : 94 %
- la puissance de la pile varie entre 58 kW et 285 kW avec une énergie générée est de 42 et 320 kW. Les consommations spécifiques étaient d'entre 175 et 27 m³/hr d'H₂ et environ 1600 et 265 m³/hr d'air.
- Pour le stockage du gaz, un volume de gaz stocké de 7800 et une pression de stockage variant entre 200 et 175 bars, selon les phases de charge et de décharge

La production d'hydrogène est significativement plus stable et élevée durant l'hiver. Cette performance est principalement due à la contribution importante de l'énergie éolienne durant cette saison, avec des vitesses de vent plus constantes et plus élevées, permettant un fonctionnement dynamique de l'électrolyseur. Une augmentation significative de la capacité de l'électrolyseur, atteignant des valeurs élevées d'environ 300 kW. La pile à combustible a joué un rôle important dans la conversion de cet hydrogène stocké en électricité, pendant les périodes de faible vitesse du vent ou de forte demande, comme les nuits froides, contribuant ainsi à l'équilibre énergétique et à la continuité de la satisfaction des besoins.

En été, avec des vents très faibles (moins de 2 m/s),

- l'énergie produite est quasi inexistante, du fait du non fonctionnement des éoliennes. Bien que le rayonnement solaire soit plus intense, la faiblesse relative du

vent se traduit par un fonctionnement plus limité et instable de l'électrolyseur, d'où une faible production d'hydrogène.

- Au niveau de l'électrolyseur, les conditions thermiques ont révélé une température de cellule stable à 80 °C, tandis que la température du circuit de refroidissement a été contrôlée entre 16 et 23 °C, assurant le maintien des performances. Le débit de production d'hydrogène et d'oxygène a été respectivement estimé à 23 et 70 m³/hr et de 12 et 35 m³/hr.
- La puissance électrique consommée par l'électrolyseur variait entre 270 et 85 kW, générant à la fois de l'hydrogène et une quantité importante de chaleur. La puissance thermique générée était de l'ordre de 4,1 kW pour l'électrolyseur et 32 kW pour le circuit de récupération thermique.
- Les efficacités calculées dans ces conditions sont les suivantes :
 - Efficacité énergétique : 92 %
 - Efficacité globale : 88 %
 - Efficacité de Faraday : 94 %
- Pour la pile à combustible, la puissance de sortie enregistrée variait entre 57 et 280 kW, avec une énergie produite de 42 à 183 kW. Les consommations spécifiques étaient comprises entre 67 et 107 m³/hr pour l'hydrogène, et entre 645 et 1009 m³/hr pour l'air.
- Concernant le stockage de l'hydrogène, un volume stocké d'environ 7900 m³ a été observé, avec une pression de stockage oscillant entre 170 et 200 bars, suivant les cycles de charge et de décharge

Nos résultats de la simulation montrent que notre système est valable car les résultats confirment les résultats du dimensionnement.

Notre système est fiable grâce à l'hybridation de deux systèmes éolien et hydrogène, le vent est l'élément clé de bon fonctionnement et pour un bon rendement de ce système.

En conclusion, cette étude a montré que le système proposé peut assurer une autonomie énergétique satisfaisante à condition d'adapter les capacités de stockage et les puissances des composants en fonction des variations saisonnières. L'intégration d'algorithmes de gestion intelligente et de prévision météorologique serait également un levier important pour améliorer la performance et la résilience du système face aux fluctuations climatiques.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'énergie renouvelable largement utilisée à travers le monde est différents domaines et l'énergie éolienne est particulièrement importante dans divers domaines notamment dans la production de l'hydrogène.

L'objectif de ce travail était de proposer un système hybride combine une éolienne pour convertir l'énergie du vent, un électrolyseur pour produire de l'hydrogène, une pile à combustible pour reconverter l'hydrogène en électricité, et un système de stockage sous pression pour gérer la production et la consommation dans le temps.

L'objectif de ce système est de produire l'électricité pour satisfaire à tout instant la demande d'un consommateur dans un site isolée.

Le travail qu'on a présenté porte sur l'étude de simulation d'un système hybride éolienne-hydrogène et l'influence des paramètres des composants de notre système sur l'énergie produite exposé aux conditions climatique prévalant à Ain Témouchent à l'aide de logiciel Transient System Simulation (TRNSYS) a été bien traité et validé avec des résultats expérimentaux et les performances d'u système éolienne–hydrogène qui ont bien simulées.

Cette simulation a donné les résultats suivants :

- Le taux de production d'énergie par l'éolienne est d'environ 5700kW à 11 h.
- Le taux de production d'hydrogène par l'électrolyseur est estimé à environ 70 m³/hr à 1 h.
- Le système fonctionne avec des grandes efficacité.
- L'énergie produite par la pile à combustible est avec une valeur maximal à 21 h avec dépassant 320 kW.
- La consommation journalière d'électricité est estimée 12 kW.

En conclusion, les résultats obtenus sont prometteurs et soulignent l'intérêt de poursuivre le développement de ce type de mini-réseaux hybrides dans les régions isolées du pays. Des perspectives futures pourraient inclure l'optimisation technico-économique du système, l'intégration d'autres sources renouvelables comme le solaire photovoltaïque, et la mise en œuvre d'une commande intelligente pour améliorer l'efficacité globale

bibliographiques

Bibliographie

- [1] « Introduction aux mini-réseaux », Energy For Impact. Consulté le: 8 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://greenminigrd.afdb.org/fr/comment-marche/assistance-developpeurs-operateurs/introduction-mini-reseaux>
- [2] V. de Rillieux-la-Pape, « Énergies renouvelables, donnez votre avis ! », Ville de Rillieux-la-Pape : Site Internet. Consulté le: 22 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.rillieuxlapape.fr/information/actualites/energies-renouvelables-donnez-votre-avis>
- [3] « micro-réseaux: Définition & Technologie | StudySmarter », StudySmarter FR. Consulté le: 7 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.studysmarter.fr/resumes/ingenierie/genie-electrique/micro-reseaux/>
- [4] « Le marché des mini-réseaux », Energy For Impact. Consulté le: 8 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://greenminigrd.afdb.org/fr/comment-marche/assistance-organes-politiques-reglementaires/marche-mini-reseaux>
- [5] « Éolienne », *Wikipédia*. 25 février 2025. Consulté le: 8 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%89olienne&oldid=223340787>
- [6] Z. S. Eddine, « Domaine: Sciences et Technologie Filière: Electromécanique Spécialité: Electromécanique ».
- [7] « Fonctionnement d'une éolienne - Les Énergies Renouvelables », ECOinfos. Consulté le: 28 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/eolienne/principe-fonctionnement-eolienne/>
- [8] « 5 défis pour l'éolien - Timera Energy ». Consulté le: 11 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://timera-energy.com/blog/5-challenges-facing-wind/>, <https://timera-energy.com/blog/5-challenges-facing-wind/>
- [9] « Electrolyseurs - Energy System », IEA. Consulté le: 11 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/electrolyseurs>
- [10] « Comparaison de différents types d'électrolyseurs pour la production d'hydrogène ». Consulté le: 11 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.enectiva.cz/fr/blog/2023/08/comparaison-de-diff%C3%A9rents-types-d%C3%A9lectrolyseurs-pour-la-production-dhydrog%C3%A8ne/>
- [11] « chapitre-3_piles_combistbles.pdf ». Consulté le: 11 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/azzoui_boubaker/files/chapitre-3_piles_combistbles.pdf?m=1609320080
- [12] « Pile à combustible », *Wikipédia*. 9 février 2025. Consulté le: 15 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Pile_%C3%A0_combustible&oldid=222861568#G%C3%A9n%C3%A9ralit%C3%A9s
- [13] « Le CEA passe à la pré-industrialisation de la pile à combustible ». Consulté le: 22 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.usinenouvelle.com/article/le-cea-passe-a-la-pre-industrialisation-de-la-pile-a-combustible.N175105>
- [14] « memoir M2En(2) (1) ».

- [15] « Avantages des piles à combustible – Plug Power ». Consulté le: 11 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.plugpower.com/fuel-cell-power/fuel-cell-benefits/>
- [16] « 01-GettingStarted ».
- [17] « Trnsys代做、培... » Consulté le: 22 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.taobao.com/list/item/750924971345.htm>
- [18] « Logiciels de simulation ». Consulté le: 14 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.mathworks.com/discovery/simulation-software.html>
- [19] A. Asrari, A. Ghasemi, et M. H. Javidi, « Economic evaluation of hybrid renewable energy systems for rural electrification in Iran—A case study », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, n° 5, p. 3123-3130, 2012.
- [20] M. M. Rana *et al.*, « Applications of energy storage systems in power grids with and without renewable energy integration — A comprehensive review », *J. Energy Storage*, vol. 68, p. 107811, sept. 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.107811.
- [21] « Stockage d'énergies renouvelables sous forme d'hydrogène pour sites isolés - Encyclopédie de l'énergie ». Consulté le: 22 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.encyclopedie-energie.org/stockage-denergies-renouvelables-sous-forme-dhydrogene-pour-sites-isoles/>
- [22] S. BOUALEM, « Optimisation d'un micro réseau intelligent vert EOLIENNE/PV/BATTERIES/GROUPE ELECTROGENE connecté au réseau », doctoral, Université Mohamed Khider Biskra, 2023. Consulté le: 28 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <http://thesis.univ-biskra.dz/6186/>
- [23] « Gestion Efficace de l'Énergie Renouvelable dans les Microgrids | Arrow.com ». Consulté le: 22 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.arrow.com/fr-fr/research-and-events/articles/effective-renewable-energy-management-in-microgrids>
- [24] « Hydrogène vert », *Wikipédia*. 16 juin 2025. Consulté le: 22 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Hydrog%C3%A8ne_vert&oldid=226543333
- [25] « Etude des différents types de convertisseurs utilisés dans la production des énergies renouvelables. Application dans l'éolienne à base de GSAP ».
- [26] A. Budleigh, « 7 Factors That Impact Wind Turbine Efficiency ». Consulté le: 15 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://baba-blog.com/7-factors-that-impact-wind-turbine-efficiency/>
- [27] « Pile à combustible : fonctionnement, avantages et inconvénients ». Consulté le: 25 avril 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.h2-mobile.fr/dossiers/pile-combustible-fonctionnement-avantages-inconvenients/>
- [28] « « تكنولوجيا خلايا الوقود الهيدروجينية | أكسيليرا » ». Consulté le: 15 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.accelerazero.com/ar/fuel-cells>
- [29] « HORIZEO-DMO-FT-Le-fonctionnement-d-un-électrolyseur (1) ».
- [30] « Les mini-réseaux électriques en plein développement • Les Horizons », Les Horizons. Consulté le: 15 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://leshorizons.net/mini-reseaux-electrique-developpement/>
- [31] د. ع. ع. التركي, « مقارنة بين تخزين الطاقة باستخدام الهيدروجين والبطاريات: التحديات والفرص », هندسة كهربائية. Consulté le: 15 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://electricengg.com/h2vsbattery/>

- [32] « “Energy Observer”, primer barco propulsado por energías renovables e hidrógeno | Fotos | Ciencia | EL PAÍS ». Consulté le: 23 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://elpais.com/elpais/2018/08/22/album/1534975125_471338.html
- [33] « Développement international de l’hydrogène vert : Quel intérêt économique et quel avantage climatique ? (1re partie) - El watan.dz ». Consulté le: 23 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://elwatan-dz.com/developpement-international-de-lhydrogene-vert-quel-interet-economique-et-quel-avantage-climatique-1re-partie>
- [34] M. R. Mostafa et M. D. Walid, « Modélisation et simulation d’un système d’alimentation autonome avec éoliennes moteur diesel ».
- [35] « 01-GettingStarted ».
- [36] « Figure 1.3. Schéma équivalent d’une éolienne. », ResearchGate. Consulté le: 23 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/figure/Schema-equivalent-dune-eolienne_fig2_365842358