

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 Temouchent- 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

**Modélisation de mini-réseaux autonomes : Intégration des piles à combustible, des électrolyseurs et des panneaux photovoltaïques avec des systèmes de batteries de secours.**

Présenté Par :

- 1) Mr. KOURI Abdessamad
- 2) Mr. KEBAILI Oussama

Devant le jury composé de :

Dr. Sallah Hichem	MCB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr. HARCHOUCHE Zine el abidine	MCB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr. REMLAOUI Ahmed	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Dr. NEHARI Taieb	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Invite

*Année Universitaire 2024/2025*

## *Remerciement*

*Nous remercions Dieu, le Tout-Puissant, de nous avoir accordé la santé et la volonté nécessaires pour entreprendre et achever ce mémoire.*

*Ce travail n'aurait jamais pu atteindre ce niveau de qualité sans l'aide précieuse et l'encadrement rigoureux de notre professeur, Monsieur le **Dr. REMLAOUI Ahmed**. Nous le remercions sincèrement pour la richesse de son savoir, qu'il a su nous transmettre avec patience et disponibilité tout au long de la préparation de ce mémoire.*

*Nos remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont aidés, de près ou de loin, dans la réalisation de ce travail.*

*Enfin, nous adressons notre profonde gratitude aux enseignants qui nous ont fait l'honneur de participer au jury de ce mémoire.*

***Kouri Abdessamad***

***Kebaili Oussama***



## *Dédicace*

*On dédie ce modeste travail :*

*À nos chers parents, qui nous ont soutenus moralement et  
financièrement pour tracer notre voie.*

*À nos frères et sœurs, pour l'aide qu'ils nous ont apportée.*

*À nos amies, pour leurs conseils et leurs encouragements, qui ont été  
pour nous d'un grand soutien.*

*À tous nos amis, chacun en son nom.*

*À tous nos collègues de la promotion 2025.*

*À tous nos enseignants.*

*À tous ceux que nous aimons et qui nous aiment*



### **Résumé :**

Dans le contexte de l'évolution rapide des technologies liées aux énergies renouvelables et face à la demande croissante en électricité dans les zones isolées, les mini-réseaux autonomes apparaissent comme une solution viable et durable pour répondre à ces enjeux énergétiques. L'approche paramétrique appliquée à ces systèmes contribue à en améliorer les performances globales et à affiner leur dimensionnement.

Ce travail s'inscrit dans cette dynamique et porte sur la simulation d'un mini-réseau autonome intégrant des panneaux photovoltaïques, des électrolyseurs, des piles à combustible ainsi qu'un système de stockage d'hydrogène et batteries de secours. L'étude repose sur les conditions climatiques spécifiques de la région de Aïn Témouchent, analysées à travers deux journées représentatives : le 14 Décembre (saison hivernale) et le 14 Juin (saison estivale).

La modélisation du système a été effectuée à l'aide du logiciel TRNSYS, reconnu pour sa capacité à simuler avec précision des systèmes énergétiques complexes. Les résultats obtenus ont permis de mieux appréhender le comportement d'un mini-réseau solaire-hydrogène et d'identifier des leviers d'optimisation en vue de renforcer son autonomie énergétique.

Mots clés : Énergies renouvelables, mini-réseaux, système hybride, énergie solaire, pile à combustible, électrolyseur.

### **Abstract:**

With the rapid advancement of renewable energy technologies and the growing electricity demand in isolated regions, autonomous mini-grids have emerged as a sustainable and practical solution to current energy challenges. Parametric analysis applied to these systems contributes to enhancing overall performance and improving design accuracy.

This study aligns with that objective by simulating an autonomous mini-grid that integrates photovoltaic panels, electrolyzers, fuel cells, a hydrogen storage system, and backup batteries. The analysis is conducted under the specific climatic conditions of the Aïn Témouchent region, using two representative days: December 14th (winter) and June 14th (summer).

System modeling was performed using the TRNSYS software, known for its precision in simulating complex energy systems. The results provided a better understanding of the behavior of a solar-hydrogen mini-grid and helped identify potential optimization strategies to improve its energy autonomy.

**Keywords:** Renewable energy, mini-grids, hybrid system, solar energy, fuel cell, electrolyzes,

### الملخص:

بالنظر إلى التقدم السريع في تقنيات الطاقة المتجددة وارتفاع الطلب على الكهرباء في المناطق المعزولة، ظهرت الشبكات المصغرة المستقلة كحل مستدام وعملي لمواجهة التحديات الطاقوية الحالية. وتساهم التحليلات البارامترية المطبقة على هذه الأنظمة في تحسين أدائها العام وتعزيز دقة تصميمها.

يتماشى هذا البحث مع هذا الهدف من خلال محاكاة شبكة مصغرة مستقلة تدمج الألواح الشمسية الكهروضوئية، والمحطات الكهربائية، وخلايا الوقود، ونظام تخزين الهيدروجين، بالإضافة إلى بطاريات احتياطية. وقد أجري التحليل في ظل الظروف المناخية الخاصة بمنطقة عين تموشنت، بالاعتماد على يومين ممثلين: 14 ديسمبر (فصل الشتاء) و14 يونيو (فصل الصيف).

تمت نمذجة النظام باستخدام برنامج TRNSYS المعروف بدقته في محاكاة الأنظمة الطاقوية المعقدة. وقد مكّنت النتائج من فهم أفضل لسلوك شبكة شمسية-هيدروجينية مستقلة، وساعدت في تحديد استراتيجيات تحسين ممكنة لتعزيز استقلاليتها الطاقوية.

**الكلمات المفتاحية:** الطاقة المتجددة، الشبكات المصغرة، النظام الهجين، الطاقة الشمسية، خلية الوقود، المحلل الكهربائي.

### Sommaire

Remerciement.

Dédicaces.

Résumé.

Table des matières.

Liste des figures.

Liste des tableaux.

NOMENCLATURE

Introduction générale .....	1
Chapitre I: Revue de littérature	
Introduction .....	3
I.1 les mini-réseaux autonomes : .....	3
I.1.1 Applications des mini-réseaux autonomes : .....	3
I.2 Les énergies renouvelables dans les mini-réseaux: .....	4
I.2.1 Panneaux photovoltaïques : .....	4
I.2.2 Piles à combustible.....	5
I.3 Outils de simulation des systèmes énergétiques:.....	7
I.3.1 Présentation de TRNSYS : .....	7
I.3.2 Comparaison avec d'autres outils de simulation : HOMER, MATLAB/Simulink et autres logiciels spécialisés : .....	9
I.4 Études antérieures sur l'intégration des énergies renouvelables dans les mini- réseaux : .....	12
I.4.1 Intégration des énergies renouvelables dans les micro-réseaux – Université de Lorraine (France): .....	12
I.4.2 Optimisation de l'intégration des énergies renouvelables dans les micro-réseaux pour un développement durable – SpringerOpen .....	12
I.4.3 Intégration des ressources énergétiques renouvelables dans les micro-réseaux – Scientific Research Publishing .....	12
I.4.1 Intégration des énergies renouvelables dans les micro-réseaux et les réseaux intelligents dans les systèmes électriques déréglementés – Wiley Online Library .....	12
Conclusion: .....	13
Chapitre II: Description du système étudié	
Introduction: .....	15
II.1 Architecture du mini-réseau : .....	15
II.1.1 Schéma fonctionnel du système: .....	15

---

## Sommaire

---

II.1.2 Interactions entre les composants :	16
II.2 Composants du système :	18
II.2.1 Panneaux photovoltaïques:	18
II.2.2 Piles à combustible:	21
II.2.3 Électrolyseurs:	23
II.2.4 Systèmes de stockage	24
II.2.4.1 Les batteries	25
II.2.4.2 Le stockage par hydrogène	26
II.3 Profil de charge:	28
conclusion.....	29
<b>Chapitre III: Modélisation et simulation sous TRNSYS</b>	
introduction :	30
III.1 Présentation de TRNSYS :	29
III.2 Les applications du TRNSYS:	31
III.3 Fonctionnalités et modules utilisés :	30
III.4 Avantages de TRNSYS pour ce projet :	31
III.5 Description du Mini réseau autonome :	32
III.6 MODELISATION DU BILAN ENERGETIQUE DU SYSTÈME :	34
III.6.1 Hypothèses:	34
III.6.2 Description des composants de système sur TRNSYS :	34
III.6.3 Le panneau photovoltaïque Type 190C :	35
III.6.4 Type 160a – Électrolyseur :	39
III.6.5 Type 167- Compresseur du H2 :	42
III.6.6 Type 164b- Stockage du H2 :	43
III.6.7 Type 173a- Pile à combustible :	46
III.6.8 Type 175a- Onduleurs électriques (DC/AC ou AC):	47
III.6.9 T Type 105a- Contrôles principaux pour un système de mini-réseau PV- hydrogène :	50
III.6.10 Type 150- Contrôleur de sortie retardée :	51
III.6.11 Type 120a- Modèle générique de moteur diesel (DEGS) :	51
III.6.12 T Type 185a- batterie de secours :	52
III.6.13 Type 15-6- Processeur de données météorologiques :	54

---

## Sommaire

---

III.6.14 Type 14h- Fonction de forçage dépendante du temps pour le profil de demande de puissance: .....	54
III.6.15 Type 65c- Traceur graphique en ligne avec fichier de sortie :.....	57
conclusion.....	58
<b>Chapitre IV: Résultats, analyse et Discussion</b>	
introduction .....	59
IV.1 Données météorologique : .....	59
IV.2 Résultats de simulation de panneaux photovoltaïques :.....	59
IV.2.1 Variation de l'irradiation globale, vitesse de vent et température ambiante .....	61
IV.3 La puissance générée par Système panneaux photovoltaïques: :.....	61
IV.4 Variation de production de H2 :.....	62
IV.5 Variation de puissance de l'électrolyseur: .....	63
IV.6 Résultats de simulation de La pile à combustible:.....	65
IV.7 Résultats de simulation de stockage d'hydrogène : .....	66
IV.8 Batteries de secours : .....	68
Conclusion.....	70
Conclusion générale: .....	72
<b>Référence bibliographique</b>	

---

## Liste des figures

### Chapitre I:

Figure (I. 1) : Exemple de mini-réseaux autonomes .....	1
Figure (I.2) : Panneaux photovoltaïques .....	2
Figure (I.3) : Panneaux photovoltaïques couplés avec Piles à combustible.....	4
Figure (I.4) : Fonctionnement d'un Électrolyseur.....	5
Figure (I.5) : TRNSYS Logo .....	5

### Chapitre II:

Figure (II.1) : Exemple mini-réseau autonome.....	16
Figure (II.2) : Principe de la conversion photovoltaïque dans un semi-conducteur dopé .....	18
Figure (II.3) : Schéma d'un Panneaux photovoltaïques.....	18
Figure (II.4) : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible à hydrogène .....	22
Figure (II.5) : Schéma de fonctionnement d'une cellule d'un électrolyseur alcalin.....	23
Figure (II.6) : Le stockage et le transport.....	24
Figure (II.7) : Les batteries .....	26
Figure (II.8) : Le stockage et le transport.....	26

### Chapitre III:

Figure (III.1) : Installation réalisée par TRNSYS.....	34
Figure (III.2) : Organigramme de dimensionnement du système.....	38
Figure (III.3) : Profil journalier normalisé.....	55
Figure (III.4) : Ratios mensuels .....	56

### Chapitre IV:

Figure (IV.1) : L'irradiation globale et l'évolution de la vitesse de vent, la température ambiante .....	60
Figure (IV.2) : la puissance générée par panneaux photovoltaïques .....	61
Figure (IV.3) : Production de H2 .....	62
Figure (IV.4) : puissance de l'électrolyseur et la chaleur générée et de l'efficacité (globale, énergétique et faraday).....	63
Figure (IV.5) : la puissance de sortie et l'énergie généré par PAC et la consommation d'air et de H2.....	65

## Liste des figures

---

<b>Figure (IV.6) : stockage de gaz en volume et à débit volumétrique, et de stockage de gaz sous pression et sous niveau de pression .....</b>	<b>67</b>
<b>Figure (IV.7) : stockage de Battery de secours .....</b>	<b>69</b>

# Liste des tableaux

## Chapitre I : Revue de littérature

<b>Table (III.1) :</b> Comparaison des outils de simulation des systèmes énergétiques selon des critères technico-économiques .....	19
---	----

## Chapitre II : Description du système étudié

<b>Tableau (II.1) :</b> Données météorologiques .....	27
---	----

<b>Tableau (II.2) :</b> Profil de charge (demande énergétique).....	28
---	----

## Chapitre III : Modélisation et simulation sous TRNSYS

<b>Tableau (III.1) :</b> caractéristiques du panneau photovoltaïque Type 190C .....	36
---	----

<b>Tableau (III.2) :</b> Les données de panneau photovoltaïque Type 190C.....	37
---	----

<b>Tableau (III.3) :</b> Les entrées (Inputs) de panneau photovoltaïque Type 190C.....	38
--	----

<b>Tableau (III.4) :</b> Les Sorties (Outputs) de panneau photovoltaïque Type 190C .....	40
--	----

<b>Tableau (III.5) :</b> les caractéristiques de l'électrolyseur (type160a).....	40
--	----

<b>Tableau (III.6) :</b> Les entrées et les sorties d'électrolyseur.....	40
--	----

<b>Tableau (III.7) :</b> les données de Compresseur du H2 .....	42
---	----

<b>Tableau (III.8) :</b> Les entrées et les sorties de compresseur de H2 .....	42
--	----

<b>Tableau (III.9) :</b> les données de Compresseur du H2 .....	44
---	----

<b>Tableau (III.10) :</b> Les entrées et les sorties de compresseur de H2 .....	45
---	----

<b>Tableau (III.11) :</b> Les données de AFC (PAC) (type173a) .....	46
---	----

<b>Tableau (III.12) :</b> Les entrées et les sorties de PAC .....	47
---	----

<b>Tableau (III.13) :</b> Les données d'onduleur électrique (DC/AC ou AC/DC). .....	48
---	----

<b>Tableau (III.14) :</b> Les entrées et les sorties d'onduleur .....	48
---	----

<b>Tableau (III.15) :</b> les données de Type 105a- Contrôles principaux pour un système de mini réseau PV-hydrogène.....	50
---	----

<b>Tableau (III.16) :</b> Les entrées et les sorties de Contrôles principaux pour un système de miniréseau PV-hydrogène.....	51
--	----

<b>Tableau (III.17) :</b> Les données de Type 150- Contrôleur de sortie retardée .....	51
--	----

<b>Tableau (III.18) :</b> Les données de Type 150- Contrôleur de sortie retardée .....	51
--	----

<b>Tableau (III.19) :</b> Les données de moteur diesel (DEGS).....	52
--	----

## NOMENCLATURE

### NOMENCLATURE

PV	Photovoltaïque
PAC	Pile à Combustible
GPV	Générateur photovoltaïque
PEMFC	Pile à combustible du type PEMFC ; Proton Exchange Membrane
DC/DC	Convertisseur à courant continu
DC/AC	Onduleur
$V_{pac}$	Tension de sortie de la pile à combustible
$P_{pac}$	Puissance de sortie de la pile à combustible
$P_{ch}$	Puissance de la charge
$H_2$	Molécule d'hydrogène
$O_2$	Molécule d'Oxygène
$H_2O$	Molécule d'eau
$V_{cell}$	Tension de sortie de la cellule
$I_{ph}$	Photo-courant
$I_s$	Courant de saturation inverse de la diode
$q$	Constante de charge élémentaire ( $1.602 \cdot 10^{-19}$ C)
$K$	Constante de Boltzmann ( $1.380 \cdot 10^{-23}$ J.K)
$\emptyset$	Flux incident
NOCT	Température de fonctionnement nominale de la cellule
$K_I$	Coefficient de variation du courant en fonction de la température.
$K_V$	Coefficient de variation de la tension en fonction de la température.
MPPT	Algorithme de poursuite de point de puissance maximale
INC	Méthode conductance incrémentale
P&O	Méthode de perturbation et observation
STC	Les conditions standard de test (Standard Test Conditions)

## NOMENCLATURE

$R_{ohm}$	Résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons
$\dot{q}_{net}$	Énergie nette
$\dot{q}_{chem}$	Énergie calorifique ou chimique
$\dot{q}_{sens+latent}$	Énergie calorifique latente et sensible
$\dot{q}_{perdue}$	Pertes de chaleur
$\dot{q}_{elec}$	Énergies électrique
$P_b$	Pression du réservoir
$P_{bi}$	Pression initiale du réservoir
$Z$	Facteur de compressibilité en fonction de la pression
LPSp	La probabilité de perte de charge pendant une période de temps considérée
$M_{PAC}$	Masse totale de la pile à combustible
$C_{PAC}$	Capacité thermique de la pile à combustible
$h_{cond}$	Paramètre de transfert de chaleur par conduction
$h_{conv}$	Paramètre de transfert de chaleur par convection
$F$	Constante de Faraday (96487 C/mol)
$z$	Nombre d'électrons participants à la réaction
$R$	Constante de gaz universelle (8.314 JK-1mol-1)
$U$	Facteur d'Utilisation
$N_c$	Nombre de cellule dans la pile à combustible
$q_{H_2}$	Débit d'hydrogène
$\Delta G$	La variation de l'énergie libre de Gibbs
$C_t$	La capacité thermique globale de l'électrolyseur
$VA_{HX}$	Le coefficient de transfert de chaleur global
$n_{H_2}$	La quantité d'hydrogène stocker dans le réservoir (mol)



---

## *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.

L'objectif principal est d'évaluer la performance technique du système, sa capacité à répondre à une demande énergétique prédéfinie, et d'analyser le comportement dynamique des différents composants dans diverses conditions de fonctionnement.

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 revue de la littérature 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 TRANSYS.

## **Introduction générale**

---

- 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 : Revue de littérature*

---



**Introduction :**

Les mini-réseaux autonomes constituent une solution innovante pour l'approvisionnement en énergie des zones isolées. Ils permettent de fournir de l'électricité de manière fiable et durable aux communautés éloignées des réseaux électriques traditionnels. La conception efficace de ces mini-réseaux repose sur l'utilisation d'outils de simulation adaptés, qui permettent de modéliser et d'optimiser les systèmes énergétiques. Parmi ces outils, HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) est largement utilisé pour la planification et l'analyse des systèmes énergétiques hybrides, facilitant ainsi la conception de mini-réseaux autonomes performants.

**I.1. les mini-réseaux autonomes**

Les mini-réseaux autonomes sont des systèmes énergétiques de petite taille conçus pour fonctionner indépendamment des réseaux électriques traditionnels. Ces réseaux s'appuient sur des sources d'énergie renouvelable telles que les panneaux solaires, les éoliennes ou les générateurs à biomasse, et sont souvent couplés à des systèmes de stockage d'énergie comme les batteries ou l'hydrogène afin d'assurer un approvisionnement électrique continu.

Ils sont principalement utilisés dans les zones isolées ou difficiles d'accès où le raccordement au réseau électrique est complexe, ainsi que pour des applications nécessitant une haute fiabilité énergétique, comme les installations industrielles, les communautés durables et les sites militaires. Les mini-réseaux autonomes offrent une solution efficace et durable pour la production d'électricité, contribuant ainsi à la réduction des émissions de carbone et à la promotion de l'utilisation des énergies propres [1].



Figure (I.1): Exemple de mini-réseaux autonomes

**I.1.1. Applications des mini-réseaux autonomes :**

Les mini-réseaux autonomes trouvent de nombreuses applications dans divers contextes où l'accès au réseau électrique principal est limité ou inexistant. Leur capacité à fonctionner de

manière indépendante en fait une solution privilégiée pour répondre aux besoins énergétiques des communautés isolées, des infrastructures stratégiques et des sites industriels éloignés.

Dans les zones rurales, en particulier dans les pays en développement, ces réseaux jouent un rôle essentiel dans l'amélioration des conditions de vie. Par exemple, en Afrique subsaharienne, de nombreux villages bénéficient désormais d'une alimentation électrique stable grâce à l'installation de mini-réseaux solaires. Cette électricité permet non seulement d'éclairer les habitations, mais aussi d'alimenter des infrastructures essentielles telles que les écoles, les centres de santé et les installations de pompage d'eau potable [2].

Dans le domaine industriel, les mini-réseaux sont souvent utilisés pour alimenter les sites miniers, les exploitations agricoles et les plateformes offshore, où la fiabilité énergétique est cruciale pour garantir la continuité des opérations. Grâce à l'intégration de sources d'énergie renouvelables et de systèmes de stockage, ces réseaux permettent aux industries de réduire leur dépendance aux combustibles fossiles et d'optimiser leurs coûts énergétiques. Par ailleurs, les bases militaires et les zones stratégiques tirent également parti des mini-réseaux autonomes pour assurer une alimentation énergétique sécurisée et résiliente. Dans ces contextes, la fiabilité du système est primordiale, notamment en cas de conflits ou de catastrophes naturelles, où l'accès à l'énergie peut être compromis. Enfin, les mini-réseaux autonomes jouent un rôle clé dans la gestion des situations d'urgence et des crises humanitaires. Ils peuvent être rapidement déployés pour fournir de l'électricité aux camps de réfugiés, aux hôpitaux mobiles et aux opérations de secours, garantissant ainsi un approvisionnement énergétique stable dans des environnements critiques.

Ainsi, grâce à leur flexibilité et à leur capacité à intégrer des technologies propres, les mini-réseaux autonomes offrent une solution innovante et durable pour répondre aux défis énergétiques actuels, tout en contribuant à l'électrification des zones les plus isolées du monde [3].

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

### **I.2.1. Panneaux photovoltaïques :**

**Principes et défis** Les panneaux photovoltaïques constituent une technologie clé dans la transition énergétique, permettant de convertir l'énergie solaire en électricité grâce à l'effet photoélectrique. Ce phénomène repose sur l'absorption des photons par les cellules photovoltaïques, entraînant l'excitation des électrons et la génération d'un courant électrique continu, qui est ensuite transformé en courant alternatif via un onduleur pour être utilisé dans les réseaux électriques. Toutefois, l'un des principaux défis liés à l'utilisation des panneaux photovoltaïques est leur intermittence, qui complique leur intégration dans un mini-réseau. Cette variabilité résulte principalement des conditions météorologiques, telles que la couverture nuageuse, les variations saisonnières et l'angle d'incidence du rayonnement solaire. Ces facteurs influencent directement la production d'électricité, rendant difficile une alimentation stable et prévisible. Pour pallier ces fluctuations, diverses solutions sont étudiées. L'une des approches les plus efficaces est l'intégration de systèmes de stockage d'énergie, tels que les batteries lithium-ion. Une étude réalisée par Perez et al. (2019) a démontré que ces batteries permettent d'atténuer

les variations de production en stockant l'énergie excédentaire produite pendant les périodes ensoleillées et en la restituant lorsque la production diminue.

De plus, d'autres stratégies comme l'optimisation des systèmes de gestion de l'énergie, le couplage avec d'autres sources renouvelables (éolien, hydraulique) et l'amélioration des prévisions météorologiques contribuent à une meilleure stabilité du réseau. Ainsi, bien que les panneaux photovoltaïques offrent une alternative énergétique propre et durable, leur intégration efficace dans un mini-réseau nécessite des solutions adaptées pour surmonter les défis liés à leur production intermittente [4].



Figure (I.2): Panneaux photovoltaïques

### **I.2.2. Piles à combustible :**

**Fonctionnement et avantages** Les piles à combustible constituent une technologie prometteuse pour la production d'électricité propre et efficace. Elles fonctionnent en utilisant l'hydrogène comme combustible, qui réagit avec l'oxygène dans une cellule électrochimique pour produire de l'électricité, de la chaleur et de l'eau comme sous-produit. Contrairement aux moteurs thermiques traditionnels, les piles à combustible n'émettent pas de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) lorsqu'elles utilisent de l'hydrogène pur, ce qui en fait une solution respectueuse de l'environnement.

L'un des principaux avantages des piles à combustible est leur rendement énergétique élevé. Elles offrent une conversion directe de l'énergie chimique en énergie électrique avec un faible niveau de pertes, ce qui les rend plus efficaces que les moteurs à combustion interne. De plus, elles fonctionnent de manière silencieuse et nécessitent peu d'entretien, ce qui en fait une solution idéale pour de nombreuses applications énergétiques.

Dans le cadre des mini-réseaux, l'intégration des piles à combustible permet de garantir une alimentation stable et fiable en électricité, même en cas de fluctuations de la production des énergies renouvelables. L'hydrogène peut être produit localement à partir de sources renouvelables, telles que l'électrolyse de l'eau alimentée par l'énergie solaire ou éolienne, puis

stocké et utilisé selon les besoins. Cette flexibilité énergétique renforce la résilience des mini-réseaux en leur offrant une source d'énergie de secours propre et durable.

Des projets pilotes ont déjà démontré la viabilité de cette technologie. Par exemple, le projet GRHYD en France a testé l'utilisation de l'hydrogène issu des énergies renouvelables pour alimenter des logements résidentiels, prouvant ainsi son efficacité dans un cadre réel. De telles initiatives ouvrent la voie à une adoption plus large des piles à combustible dans les infrastructures énergétiques locales. En plus des applications résidentielles, les piles à combustible sont également utilisées pour alimenter des véhicules, des systèmes de secours pour les hôpitaux et les centres de données, ainsi que des installations industrielles. Leur développement continu et la réduction des coûts de production de l'hydrogène vert pourraient accélérer leur déploiement et contribuer à la transition vers un modèle énergétique plus durable. Ainsi, grâce à leur efficacité, leur propreté et leur adaptabilité, les piles à combustible représentent une solution énergétique innovante qui pourrait jouer un rôle clé dans l'avenir des mini-réseaux et du secteur énergétique en général. [5].

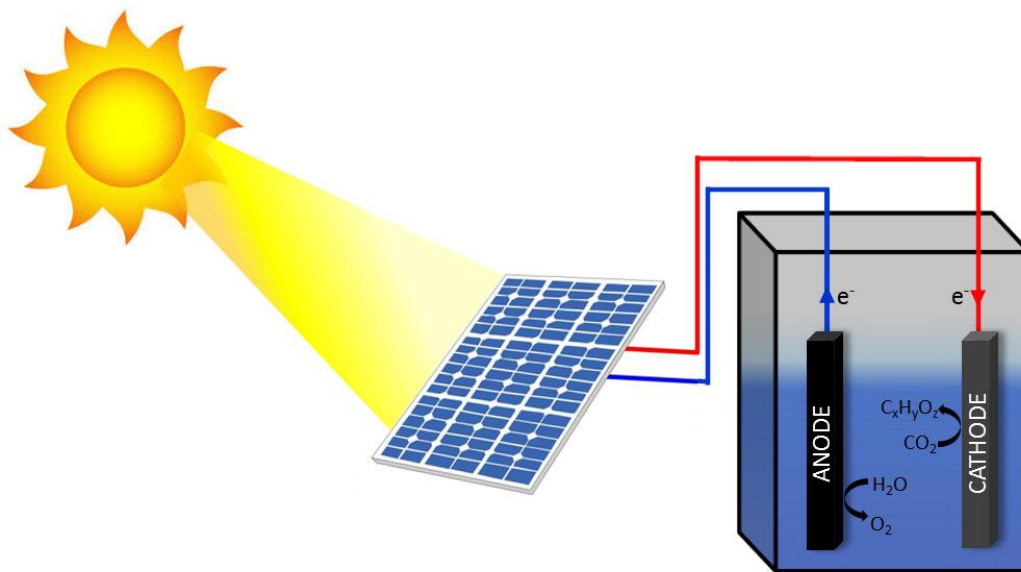


Figure (I.3): Panneaux photovoltaïques couplés avec Piles à combustible[20].

### I.2.3. Électrolyseurs :

Production et stockage d'hydrogène Les électrolyseurs jouent un rôle clé dans la transition énergétique en permettant la production d'hydrogène à partir de l'électricité excédentaire, notamment issue des sources renouvelables comme le solaire et l'éolien. Leur fonctionnement repose sur le processus d'électrolyse de l'eau, qui consiste à décomposer l'eau ( $H_2O$ ) en hydrogène ( $H_2$ ) et en oxygène ( $O_2$ ) à l'aide d'un courant électrique. Lorsque cette électricité

provient de sources renouvelables, l'hydrogène produit est qualifié d'hydrogène vert, une alternative propre aux combustibles fossiles.

L'un des principaux avantages des électrolyseurs est leur capacité à stocker l'énergie sous forme d'hydrogène, ce qui permet de pallier l'intermittence des énergies renouvelables. Contrairement aux batteries, qui sont limitées en capacité et en durée de stockage, l'hydrogène peut être conservé sur de longues périodes et utilisé ultérieurement pour produire de l'électricité via des piles à combustible ou pour d'autres applications industrielles et domestiques. Dans le cadre des mini-réseaux, l'intégration des électrolyseurs améliore considérablement la gestion de l'énergie en permettant de stocker l'excédent de production et de l'utiliser lors des périodes de faible production solaire ou éolienne. Une étude a démontré que la combinaison de l'hydrogène avec des batteries réduit les coûts d'exploitation des mini-réseaux de 30 %, grâce à une meilleure optimisation des ressources énergétiques et une diminution de la dépendance aux générateurs diesel polluants.

L'hydrogène ainsi produit peut être utilisé dans divers secteurs, allant de la production d'électricité à l'alimentation en carburant des véhicules à hydrogène, en passant par les processus industriels nécessitant une grande quantité d'énergie propre. Plusieurs projets à travers le monde explorent déjà cette voie, notamment en Europe et en Asie, où des infrastructures à hydrogène sont mises en place pour soutenir la décarbonation du secteur énergétique. Enfin, avec l'amélioration des technologies d'électrolyse et la baisse progressive des coûts de production, l'hydrogène vert devient une solution de plus en plus compétitive pour assurer la stabilité énergétique des réseaux et favoriser l'intégration massive des énergies renouvelables. Son potentiel en tant que vecteur énergétique du futur en fait un élément clé de la transition vers une économie bas-carbone et une indépendance énergétique accrue [6].

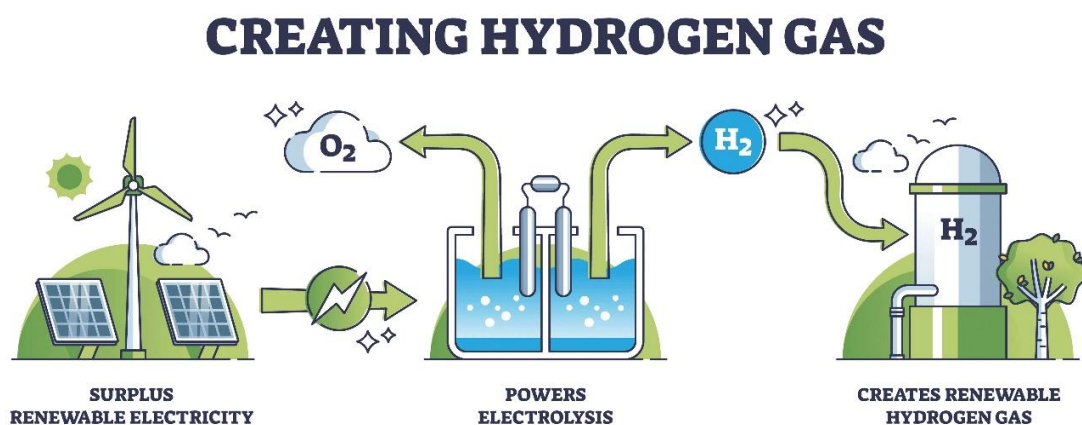


Figure (I.4): Fonctionnement d'un Électrolyseur[21].

### I.3. Outils de simulation des systèmes énergétiques

#### I.3.1. Présentation de TRNSYS :

Un outil avancé de simulation pour les systèmes énergétiques TRNSYS (Transient System Simulation Tool) est un logiciel de simulation dynamique conçu pour modéliser des systèmes énergétiques complexes en prenant en compte les variations temporelles et les interactions entre les différentes composantes du système. Grâce à son architecture modulaire et flexible, il permet une analyse détaillée du comportement des systèmes thermiques et électriques, facilitant ainsi leur optimisation en fonction des besoins spécifiques des utilisateurs.

Dans le domaine des mini-réseaux, TRNSYS joue un rôle central dans la conception, l'évaluation et l'optimisation des infrastructures énergétiques hybrides intégrant des sources d'énergie renouvelable (photovoltaïque, éolien, biomasse) et des systèmes de stockage (batteries lithium-ion, stockage thermique, hydrogène). Il permet notamment d'élaborer des stratégies de gestion énergétique afin de maximiser l'autoconsommation, réduire les pertes et améliorer la fiabilité des systèmes en conditions réelles d'exploitation.

L'un des atouts majeurs de TRNSYS réside dans sa capacité à coupler plusieurs technologies énergétiques au sein d'un même modèle. Il est particulièrement utilisé pour simuler l'intégration de solutions de stockage avancées, comme les batteries et les électrolyseurs, permettant d'évaluer leur impact sur la stabilité du réseau, l'efficacité énergétique et la réduction des coûts d'exploitation. De plus, il offre la possibilité d'analyser l'influence des facteurs environnementaux (température, ensoleillement, vent) sur la performance des installations, rendant ainsi la simulation plus réaliste et pertinente. Grâce à son interface graphique intuitive et à son approche modulaire, TRNSYS est largement adopté par les ingénieurs, chercheurs et concepteurs pour le dimensionnement et l'optimisation des réseaux énergétiques intelligents. Il est également utilisé dans le domaine du bâtiment performant, où il permet d'évaluer l'efficacité énergétique des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (HVAC), ainsi que la gestion thermique des infrastructures [7].

En outre, TRNSYS peut être intégré avec d'autres outils de simulation, tels que MATLAB/Simulink, EnergyPlus et Modelica, renforçant ainsi ses capacités d'analyse et permettant des études plus approfondies sur la transition énergétique et la résilience des réseaux décentralisés.

TRNSYS représente un instrument essentiel pour la modélisation et l'optimisation des systèmes énergétiques. Son utilisation dans la conception des mini-réseaux contribue significativement à l'amélioration de la durabilité, de l'efficacité et de la fiabilité des infrastructures énergétiques, favorisant ainsi l'intégration des énergies renouvelables et l'émergence de solutions énergétiques innovantes adaptées aux défis contemporains [7].



Figure (I.5): TRNSYS-18 [7].

### I.3.2. Comparaison avec d'autres outils de simulation : HOMER, MATLAB/Simulink et autres logiciels spécialisés

Dans le domaine de la modélisation et de l'optimisation des systèmes énergétiques, plusieurs outils de simulation sont utilisés, chacun ayant des caractéristiques et des applications spécifiques. Parmi les logiciels les plus couramment employés, on retrouve TRNSYS, HOMER et MATLAB/Simulink, qui se distinguent par leurs approches méthodologiques et leurs domaines d'application.

#### ➤ HOMER : un outil dédié à l'optimisation des systèmes hybrides

HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) est un logiciel spécifiquement conçu pour l'analyse techno-économique des systèmes énergétiques hybrides. Il excelle dans l'évaluation des coûts de production, l'optimisation des configurations énergétiques et l'analyse de la rentabilité des investissements. Il est particulièrement utilisé pour les études de viabilité économique des mini-réseaux, intégrant diverses sources d'énergie (solaire, éolien, diesel, batteries, hydrogène, etc.) [22].

HOMER permet de simuler différents scénarios d'exploitation, en prenant en compte des facteurs tels que les coûts d'investissement et d'exploitation, les fluctuations des prix de l'énergie, les contraintes de charge et la fiabilité du système. Cependant, il présente certaines limites en termes de modélisation physique détaillée, car il repose principalement sur une approche basée sur des bilans énergétiques et des optimisations économiques, sans inclure des analyses dynamiques approfondies.

➤ **MATLAB/Simulink : une plateforme avancée pour la modélisation et le contrôle des systèmes énergétiques**

MATLAB/Simulink est une plateforme de calcul numérique et de simulation utilisée pour la modélisation dynamique des systèmes énergétiques. Contrairement à HOMER, MATLAB/Simulink offre une grande flexibilité dans la conception et le contrôle des composants énergétiques, permettant une analyse approfondie du comportement transitoire des systèmes.

Cet outil est particulièrement adapté aux études de régulation et de commande des systèmes électriques et thermiques, notamment pour :

- La modélisation des convertisseurs d'énergie (onduleurs, redresseurs, régulateurs MPPT pour les panneaux photovoltaïques)
- L'étude des stratégies de gestion de l'énergie dans les mini-réseaux
- L'analyse des performances des algorithmes de contrôle pour les batteries et les systèmes de stockage
- L'évaluation de la stabilité et de la réponse dynamique des réseaux électriques

Toutefois, MATLAB/Simulink requiert une expertise avancée en programmation et en modélisation mathématique, ce qui peut constituer un frein pour certains utilisateurs recherchant des outils plus intuitifs[22].

➤ **TRNSYS : une approche modulaire pour la simulation énergétique intégrée**

Contrairement à HOMER, qui est centré sur l'analyse économique, et à MATLAB/Simulink, qui se focalise sur la dynamique des systèmes, TRNSYS adopte une approche modulaire et multi-physique, ce qui lui confère une grande polyvalence. Il permet notamment de :

- Simuler des systèmes énergétiques complexes en prenant en compte les interactions entre composants thermiques et électriques
- Optimiser la gestion du stockage énergétique (batteries, stockage thermique, hydrogène)
- Analyser l'impact des conditions météorologiques sur la performance des installations
- Intégrer des modèles de bâtiments et de réseaux thermiques, ce qui le rend particulièrement adapté aux études de performance énergétique des bâtiments et des réseaux de chaleur

L'un des atouts majeurs de TRNSYS est sa capacité à combiner des analyses énergétiques, thermiques et environnementales, ce qui le rend idéal pour les études systémiques impliquant plusieurs sources d'énergie et technologies de stockage. Toutefois, il est moins adapté aux analyses économiques poussées que HOMER et aux simulations de contrôle en temps réel que MATLAB/Simulink.

➤ **Autres outils de simulation : EnergyPlus, PVSyst et DIgSILENT PowerFactory**

- ❖ EnergyPlus : utilisé pour la simulation thermique des bâtiments, il est souvent couplé avec TRNSYS pour évaluer la performance des systèmes HVAC et des enveloppes thermiques.
- ❖ PVSyst : spécialisé dans l'analyse des systèmes photovoltaïques, il permet de dimensionner des centrales solaires en prenant en compte les pertes et les rendements des équipements.
- ❖ DIgSILENT PowerFactory : un logiciel dédié à l'analyse des réseaux électriques, notamment pour l'étude de la stabilité transitoire, du flux de charge et de la protection des systèmes électriques.

### Comparaison globale et choix de l'outil le plus adapté

Critères	HOMER	MATLAB/Simulink	TRNSYS	EnergyPlus	PVSyst	DIgSILENT
Type d'analyse	Techno-économique	Dynamique et contrôle	Simulation multi-physique	Thermique du bâtiment	Photovoltaïque	Réseaux électriques
Facilité d'utilisation	Élevée	Modérée à complexe	Modérée	Complexe	Élevée	Complexe
Approche de modélisation	Basée sur l'optimisation	Basée sur des équations différentielles	Modulaire et flexible	Modèle thermique détaillé	Modèle PV détaillé	Modèle électrique détaillé
Domaine d'application	Mini-réseaux, hybridation énergétique	Contrôle, électronique de puissance, dynamique des systèmes	Bâtiments, mini-réseaux, gestion thermique	Conception thermique des bâtiments	Systèmes photovoltaïques	Réseaux électriques
Prise en compte des coûts	Oui	Non	Partielle	Non	Non	Non
Gestion du stockage énergétique	Oui	Oui	Oui	Non	Partielle	Partielle

Table (I.1): Comparaison des outils de simulation des systèmes énergétiques selon des critères technico-économiques[22].

Résumé du choix de l'outil idéal :

- ❖ HOMER : Meilleur choix pour les analyses économiques et l'optimisation des mini-réseaux hybrides.
- ❖ MATLAB/Simulink : Idéal pour les simulations dynamiques et le contrôle des composants énergétiques.
- ❖ TRNSYS : Parfait pour les études intégrant plusieurs sources d'énergie et la gestion thermique des bâtiments.
- ❖ EnergyPlus : Spécifique aux bâtiments et aux systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (HVAC).
- ❖ PVSyst : Utilisé principalement pour le dimensionnement et l'analyse des systèmes photovoltaïques.
- ❖ DIgSILENT PowerFactory : Outil avancé pour l'analyse des réseaux électriques et leur stabilité.

Le choix de l'outil dépend fortement des objectifs de l'étude. Ainsi, le choix du logiciel dépend du niveau de détail requis, du domaine d'application et des compétences de l'utilisateur. Dans certains cas, une approche hybride combinant plusieurs outils permet d'obtenir une analyse plus complète et précise des systèmes énergétiques étudiés.

#### **1.4 Études antérieures sur l'intégration des énergies renouvelables dans les mini-réseaux :**

L'intégration des énergies renouvelables dans les mini-réseaux a fait l'objet de nombreuses recherches au cours des dernières décennies. Ces études visent à analyser les performances, la fiabilité et la rentabilité des systèmes hybrides combinant diverses sources d'énergie renouvelable, telles que le solaire, l'éolien ou l'hydrogène, avec des systèmes de stockage. Elles permettent de mieux comprendre les défis techniques et économiques liés à la planification, à la modélisation et à l'optimisation de ces réseaux dans des contextes variés, notamment pour l'électrification des zones isolées.

##### **1.4.1 Intégration des énergies renouvelables dans les micro-réseaux – Université de Lorraine (France)**

Cette recherche explore l'intégration de sources d'énergie renouvelable distribuées, de systèmes de stockage d'énergie et de charges interconnectées dans les micro-réseaux. Le projet, soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), met l'accent sur la gestion de l'énergie et l'optimisation des performances des micro-réseaux. Une thèse en cours approfondit ces aspects, notamment en ce qui concerne les éléments de stockage et la gestion énergétique [10].

#### **I.4.2. Optimisation de l'intégration des énergies renouvelables dans les micro-réseaux pour un développement durable – SpringerOpen**

Cette étude propose la conception d'un micro-réseau hybride solaire-éolien-batterie pour alimenter une charge médicale à Ain Al-Sokhna, en Égypte. Elle met en évidence la demande croissante pour des solutions décentralisées intégrant des sources d'énergie renouvelable et des micro-réseaux intelligents, en réponse à l'augmentation des coûts énergétiques et aux impacts du changement climatique [11].

#### **I.4.3. Intégration des ressources énergétiques renouvelables dans les micro-réseaux – Scientific Research Publishing**

Cette recherche examine l'intégration de diverses sources d'énergie renouvelable dans les micro-réseaux, en mettant l'accent sur les systèmes en courant continu (DC) et les options de stockage. Elle propose un schéma de système intégrant des éléments tels que les panneaux photovoltaïques, les véhicules électriques, les batteries, les piles à combustible et l'énergie éolienne pour répondre aux profils de charge [12].

#### **I.4.4. Intégration des énergies renouvelables dans les micro-réseaux et les réseaux intelligents dans les systèmes électriques déréglementés – Wiley Online Library**

Cette étude examine le potentiel d'expansion durable des systèmes électriques déréglementés, y compris les micro-réseaux et les réseaux intelligents, ainsi que leurs implications économiques et environnementales. Elle souligne les avantages de l'établissement de tels systèmes, notamment l'amélioration de la stabilité et de la fiabilité du réseau, ainsi qu'une utilisation accrue des sources d'énergie renouvelable [13].

### **Conclusion**

Les recherches antérieures ont mis en évidence le potentiel significatif de l'intégration des énergies renouvelables dans les mini-réseaux pour améliorer l'autonomie énergétique et réduire la dépendance aux combustibles fossiles. Toutefois, cette intégration soulève des défis technico-économiques majeurs, notamment en raison de l'intermittence des sources renouvelables, de la gestion du stockage et de la stabilité du réseau.

Des études ont démontré que les stratégies hybrides combinant plusieurs sources d'énergie renouvelable, des systèmes de stockage avancés (batteries lithium-ion, hydrogène, volants d'inertie) et des algorithmes de gestion intelligents permettent d'optimiser la stabilité et la rentabilité des mini-réseaux. L'évolution des outils de simulation et d'optimisation, tels que HOMER, MATLAB/Simulink et TRNSYS, a également joué un rôle clé dans l'amélioration du dimensionnement et de l'exploitation de ces systèmes. Ainsi, les perspectives de recherche futures devraient se concentrer sur le développement de stratégies avancées de gestion

énergétique, l'optimisation des modèles de stockage à long terme et l'évaluation de la viabilité économique des mini-réseaux sur des périodes prolongées. L'objectif est d'assurer une transition énergétique durable et résiliente, tout en répondant aux besoins croissants en électricité des zones isolées et des infrastructures critiques.



---

*CHAPTRE II: Description du système étudié*

---



**Introduction**

Ce chapitre présente une description détaillée du mini-réseau autonome étudié dans le cadre de ce travail. L'objectif est de comprendre la structure, les composants principaux et le fonctionnement global du système afin de faciliter sa modélisation et sa simulation. Le mini-réseau est conçu pour intégrer différentes sources d'énergies renouvelables (notamment le solaire photovoltaïque), des dispositifs de stockage (batteries, hydrogène) ainsi que des unités de conversion (électrolyseur, pile à combustible).

La présentation de l'architecture générale du système, accompagnée d'un schéma fonctionnel, permettra de visualiser les flux d'énergie entre les différents éléments. Par ailleurs, les caractéristiques techniques des composants et les hypothèses de fonctionnement seront détaillées, en tenant compte des conditions climatiques et des profils de consommation énergétique. Cette étape est essentielle pour garantir la cohérence et la précision des simulations réalisées par la suite sous TRNSYS.

**II.1. Architecture du mini-réseau****II.1.1. Schéma fonctionnel du système**

Le fonctionnement d'un système mini-réseau autonome repose sur une architecture énergétique intégrant des sources renouvelables, des systèmes de stockage et une gestion intelligente de l'énergie. La production d'électricité est assurée principalement par des panneaux photovoltaïques, qui convertissent l'énergie solaire en électricité en courant continu. Cette énergie est prioritairement utilisée pour alimenter la charge locale (habitations, infrastructures publiques, etc.). En cas de surplus de production, l'énergie excédentaire est stockée soit dans des batteries, soit sous forme d'hydrogène via un électrolyseur. Lorsque la production solaire est insuffisante pour satisfaire la demande, une stratégie de gestion hiérarchisée s'active : la pile à combustible est sollicitée en premier pour reconvertir l'hydrogène stocké en électricité, puis les batteries prennent le relais si nécessaire. Ce fonctionnement en boucle permet d'assurer une alimentation continue, fiable et optimisée, tout en réduisant la dépendance aux sources fossiles. L'ensemble du système est régulé par un contrôleur énergétique centralisé qui gère la distribution, la conversion et le stockage de l'énergie en fonction de la disponibilité des ressources et des besoins en temps réel [30]

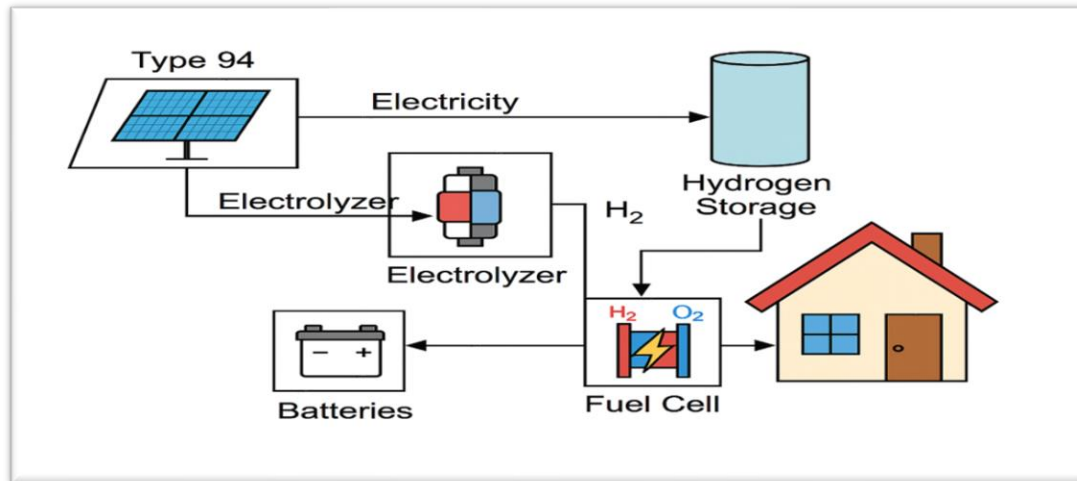


Figure (II.1): Exemple mini-réseau autonome [30]

### II.1.2. Interactions entre les composants

Dans un système de mini réseau autonome, les différents composants interagissent de façon dynamique pour maintenir la stabilité de l'ensemble du réseau énergétique. L'objectif principal est d'assurer un équilibre constant entre la production d'énergie renouvelable, le stockage intermédiaire (comme l'hydrogène ou les batteries), et la consommation finale [30].

La production d'électricité est assurée notamment par les panneaux photovoltaïques (PV), qui convertissent l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique. Ce processus passe d'abord par la transformation de l'énergie lumineuse en énergie électronique au sein des cellules PV, grâce à l'effet photovoltaïque, puis en courant continu, lequel est ensuite converti en courant alternatif via un onduleur [30].

L'électricité ainsi produite est d'abord acheminée vers les charges électriques. Si la production dépasse la demande, le surplus est dirigé vers un électrolyseur, qui utilise cette énergie pour décomposer l'eau et produire de l'hydrogène. Cet hydrogène est ensuite stocké dans des réservoirs.

Lorsque la production renouvelable (par exemple, celle d'une éolienne) devient insuffisante pour couvrir la demande — en raison d'un vent faible ou d'une consommation plus élevée — une pile à combustible entre en jeu. Elle utilise l'hydrogène stocké pour générer de l'électricité et ainsi compenser le déficit [30].

**a) Panneaux Photovoltaïques (PV):**

Les Panneaux Photovoltaïques (PV) qui transforme Énergie lumineuse (du soleil) en Énergie électronique (dans les cellules PV par effet photovoltaïque) puis en énergie électrique (courant continu → converti en courant alternatif via un onduleur). [27]

✓ **Interaction principale :**

- **Fournissent directement l'énergie électrique** aux charges si la production est suffisante.
- **Chargent les batteries** en cas de surplus de production.
- **Alimentent l'électrolyseur** pour produire de l'hydrogène en cas de surplus énergétique.

**b) Batteries (stockage électrique)**

- ❖ **Stockent l'électricité excédentaire** produite par les panneaux solaires.
  - ❖ **Restituent l'énergie** en cas d'insuffisance de la production PV (ex. : la nuit ou en hiver).
  - ❖ Le système de gestion de l'énergie **préfère utiliser les batteries** avant de faire appel à la pile à combustible (moins de pertes, réponse rapide).
- ✓ Interaction:
- **Charge** via les PV (ou, dans certains cas, via la pile à combustible si excès d'hydrogène).
  - **Décharge** pour alimenter les charges.

**c) Electrolyseur**

Utilise l'électricité (idéalement celle excédentaire des PV) pour **scinder l'eau (H<sub>2</sub>O)** en :

- **Hydrogène (H<sub>2</sub>)** : stocké pour une utilisation ultérieure.
- **Oxygène (O<sub>2</sub>)** : souvent rejeté dans l'atmosphère.

Fonctionne uniquement **quand il y a surplus d'énergie**, après que la batterie soit pleine.

## ✓ Interaction :

- **Reçoit l'électricité** des PV.
- **Envoie l'hydrogène** vers le réservoir de stockage.

**d) Stockage d'hydrogène (réservoirs)**

**Fonction** : Stocker l'hydrogène produit par l'électrolyseur.

✓ **Interaction principale :**

- Sert de **réserve d'énergie à long terme**.

- **Alimente la pile à combustible** lorsque la production PV est insuffisante et que les batteries sont déchargées.

#### e) Piles à combustible (PAC)

**Fonction** : Convertir l'hydrogène en électricité et chaleur.

✓ **Interaction principale** :

- **S'active lorsque ni les PV ni les batteries ne peuvent répondre à la demande.**
- Utilise l'hydrogène stocké pour **produire de l'électricité** de manière fiable.
- Fonctionne comme **source d'énergie de secours** (backup).

## II.2. Composants du système

L'architecture d'un mini-réseau autonome repose sur l'intégration cohérente de plusieurs composants essentiels, chacun jouant un rôle déterminant dans la production, la conversion, le stockage et la gestion de l'énergie. Cette section présente les principaux éléments techniques du système étudié, à savoir les panneaux photovoltaïques, les piles à combustible, les électrolyseurs, et les systèmes de stockage d'énergie (batteries et hydrogène). [16]

### II.2.1. Panneaux photovoltaïques :

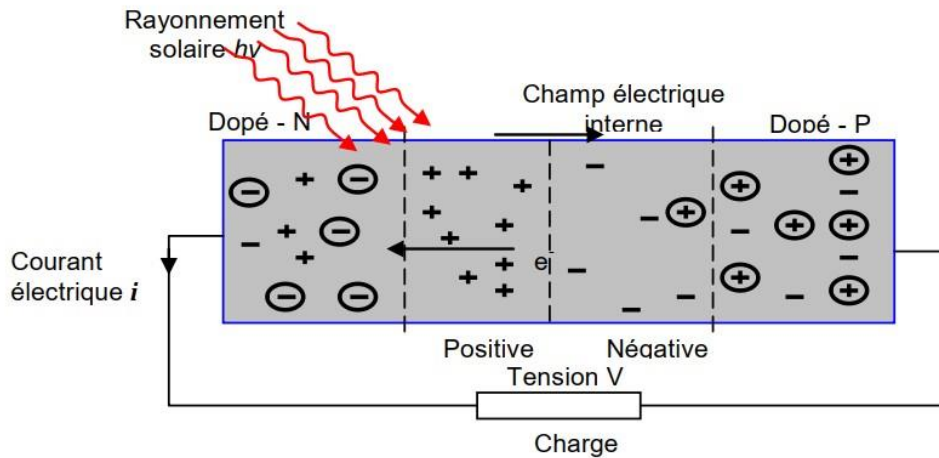
Les panneaux photovoltaïques (PV) constituent la source principale d'énergie renouvelable dans un mini-réseau autonome alimenté par le soleil. Leur rôle est de convertir le rayonnement solaire en électricité à courant continu (DC) à travers l'effet photovoltaïque. Le rendement de cette conversion dépend de plusieurs facteurs, notamment l'irradiation solaire, la température ambiante, l'angle d'incidence, ainsi que les propriétés intrinsèques du module PV. [27]

#### **Principe de la conversion photovoltaïque en énergie électrique :**

Le rayonnement solaire est constitué d'un flux de photons, chaque photon possède une quantité d'énergie. Les photons absorbés par un matériau semi-conducteur libèrent des électrons à partir des bandes covalentes qui représentent la liaison chimique des atomes dans un semi-conducteur.

Ce processus d'ionisation produit une séparation des charges négatives et des charges positives sur les deux côtés du bloc semi-conducteur en produisant une différence de tension, la tension électrique résultante crée un champ électrique interne, le courant électrique  $I$  est parcouru dans un circuit, la puissance électrique délivrée à une charge électrique  $RL$  est donc  $P = VI$  (voir figure 2.2). Ce processus de photo-ionisation n'a lieu que si l'énergie de

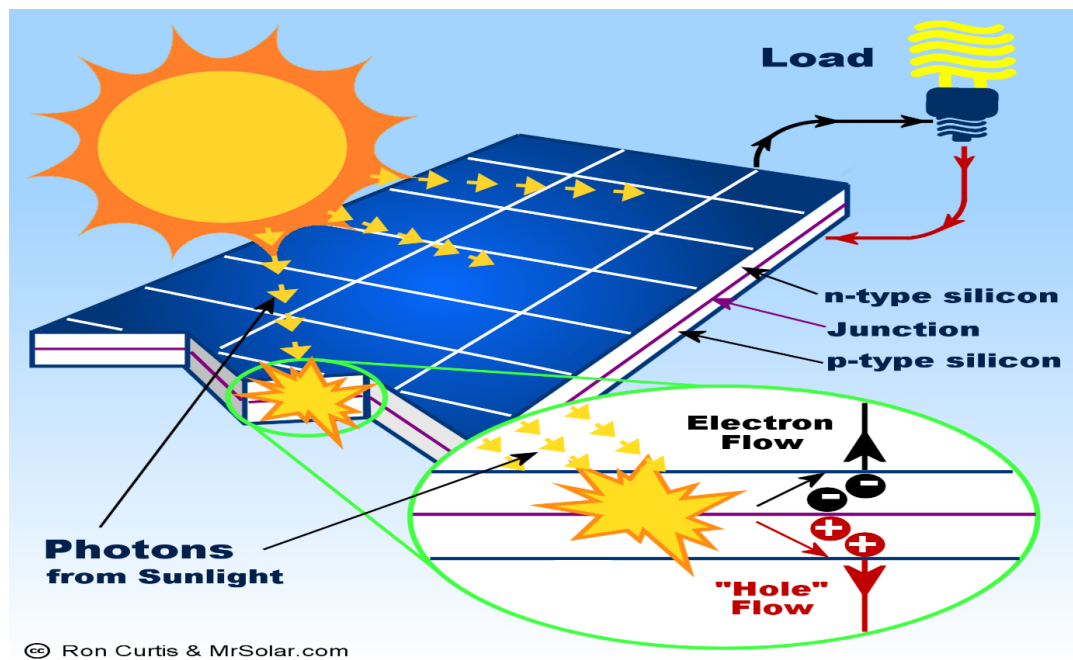
chaque photon du rayonnement incident sur la surface du semi-conducteur soit plus grande que l'énergie d'ionisation du semi-conducteur  $E_g$  (en eV).



**Figure (II.2) :** Principe de la conversion photovoltaïque (PV) dans un semi-conducteur dopé N-P, [Winter, 1991].

Modélisation :

Dans le cadre de la simulation, les panneaux sont souvent modélisés à l'aide de modèles mathématiques représentant la courbe courant-tension (I-V) d'une cellule photovoltaïque. Le modèle à une diode, basé sur l'équation de Shockley, est le plus utilisé. Il permet de simuler le comportement électrique en fonction des conditions climatiques. Les logiciels comme TRNSYS utilisent le Type 94 pour la modélisation des générateurs PV, avec des entrées telles que l'irradiation globale, la température des cellules, et la tension de fonctionnement. [27]



**Figure (II.3) :** Schéma d'un Panneaux photovoltaïques [23]

**Paramètres clés d'une cellule photovoltaïque :**❖ **Tension à circuit ouvert ( $V_{oc}$ ):**

C'est la tension maximale générée par la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge (circuit ouvert).

Elle dépend des caractéristiques de la jonction p-n de la cellule et des conditions d'éclairage [31].

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right)$$

❖ **Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ):**

C'est le courant maximal produit par la cellule lorsqu'elle est court-circuitée (ses bornes sont reliées entre elles) [31].

Il dépend de l'intensité lumineuse et des propriétés du matériau semi-conducteur.

$$I_{ph} = [I_{sc,ref} + \alpha_I \cdot (T - T_{ref})] \cdot \frac{G}{G_{ref}}$$

❖ **Puissance maximale ( $P_m$ ):**

C'est la puissance électrique maximale que la cellule peut fournir sous des conditions d'éclairage et de charge spécifiques (généralement *STC* - Standard Test Conditions).

Elle est généralement exprimée en watts (W) et dépend de l'efficacité de conversion de la cellule [32].

$$P_m = \eta \cdot G \cdot A$$

❖ **Rendement de conversion ( $\eta$ ):**

- C'est le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance lumineuse incidente reçue.
- Il s'exprime en pourcentage (%) et représente l'efficacité de la cellule à convertir l'énergie solaire en électricité.

$$\eta = \frac{P_m}{G \cdot A}$$

❖ **Facteur de remplissage (ou facteur de forme - fill factor (FF) en anglais) (FF):**

- C'est un indicateur de la forme de la courbe I-V (courant-tension) de la cellule.
- Il représente le rapport entre la puissance maximale réelle et la puissance maximale théorique que la cellule pourrait délivrer.

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{V_{mpp} \cdot I_{mpp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$$

**❖ Température de fonctionnement:**

- La performance des cellules photovoltaïques est affectée par la température. L'efficacité de conversion diminue généralement avec l'augmentation de la température.
- Les températures élevées peuvent également raccourcir la durée de vie des cellules. [27]

$$T_{\text{cell}} = T_{\text{amb}} + \left( \frac{\text{NOCT} - 20}{800} \right) \cdot G$$

**II.2.2. Piles à combustible :**

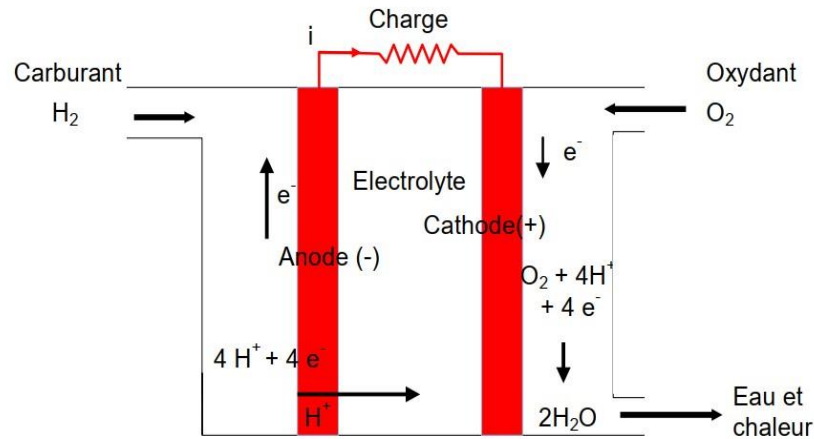
Les piles à combustible (PAC) jouent un rôle de générateur secondaire dans le système, en convertissant l'hydrogène stocké en électricité et en chaleur, via une réaction électrochimique avec l'oxygène de l'air. Elles sont particulièrement utiles pour assurer l'approvisionnement énergétique durant les périodes de faible ensoleillement ou de forte demande. [17]

Le fonctionnement d'une pile à combustible repose sur une réaction chimique appelée **oxydoréduction**. Au cœur de la pile se trouvent trois composants principaux : deux électrodes — l'**anode**, où se produit l'oxydation (perte d'électrons), et la **cathode**, où a lieu la réduction (gain d'électrons) — ainsi qu'un **électrolyte** qui les sépare [17].

L'électrolyte joue un rôle essentiel en permettant le passage sélectif des ions entre les électrodes, tout en forçant les électrons à emprunter un **circuit externe**, ce qui génère un **courant électrique** utilisable [17].

Dans une pile à hydrogène, un réservoir alimente l'anode en **hydrogène** et la cathode en **oxygène**. L'hydrogène, en réagissant à l'anode, libère des électrons (réaction d'oxydation), lesquels circulent dans le circuit externe. En parallèle, à la cathode, l'oxygène capte ces électrons (réduction), formant ainsi de l'**eau** et dégageant de la **chaleur**[17].

Pour faciliter ces réactions, un **catalyseur**, souvent constitué de **platine**, est déposé en fines couches sur les électrodes (surtout sur la cathode). Cependant, en raison du coût et de la rareté de ce métal, des recherches sont actuellement en cours pour développer des **nanomatériaux** alternatifs plus économiques et tout aussi efficaces [17].



**Figure (II.4):** Principe de fonctionnement d'une pile à combustible à hydrogène, [Ulleberg, 1998].

Caractéristiques techniques :

### Énergie propre et décarbonée

Lorsqu'elles sont alimentées par de l'hydrogène issu de sources renouvelables (comme le solaire, l'éolien ou l'hydroélectricité), les piles à combustible ne génèrent aucune émission polluante à l'échappement [17].

### Absence d'émissions de NOx

Contrairement aux moteurs à combustion interne, qui émettent du protoxyde d'azote (NOx) lors de la combustion, les piles à hydrogène ne brûlent pas de carburant, éliminant ainsi toute production de NOx.

### Haute efficacité énergétique

En transformant directement l'énergie chimique de l'hydrogène en électricité, les piles à combustible évitent les pertes thermiques et les étapes intermédiaires, offrant ainsi un rendement supérieur aux systèmes classiques.

### Ravitaillement simple et rapide

Le remplissage d'un véhicule à pile à combustible s'effectue de façon similaire à un véhicule diesel, mais via une pompe à hydrogène. Le processus est rapide et familier pour les utilisateurs.

### Impact environnemental réduit

Les seules émissions produites par une pile à combustible PEM (à membrane échangeuse de protons) sont de l'eau et de la vapeur, ce qui en fait une solution respectueuse de l'environnement.

### Entretien limité

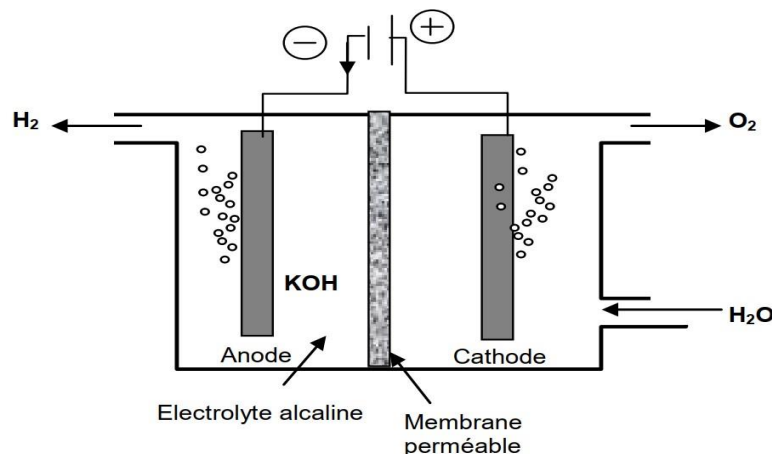
Les piles à combustible contiennent peu de pièces mobiles, ce qui réduit considérablement les besoins en maintenance par rapport aux moteurs thermiques traditionnels.

### II.2.3. Électrolyseurs :

Les électrolyseurs constituent l'élément central de la chaîne de production d'hydrogène. Ils utilisent l'électricité excédentaire produite par les panneaux photovoltaïques pour dissocier l'eau ( $H_2O$ ) en hydrogène ( $H_2$ ) et en oxygène ( $O_2$ ) grâce à un procédé d'électrolyse. [18]

#### Principe de fonctionnement :

Le type d'électrolyseur le plus couramment utilisé dans les applications de mini-réseaux est l'électrolyseur alcalin ou l'électrolyseur PEM. L'électricité alimente deux électrodes immergées dans une solution conductrice, entraînant la libération d'hydrogène au niveau de la cathode. [18]



**Figure (II.5) :** Schéma de fonctionnement d'une cellule d'un électrolyseur alcalin, [Ulleberg, 1998]

#### Types des électrolyseurs:

Il existe trois technologies d'électrolyseurs schématisées sur la figure. } Les électrolyseurs alcalins, qui sont les plus développés et les plus matures, } Les électrolyseurs à membrane polymérique, équivalents aux PEMFC, et } Les électrolyseurs à vapeur d'eau à haute température HTE, équivalents aux SOFC [Went et Rohland, 1991]

#### Intégration au système :

L'électrolyseur fonctionne principalement pendant les périodes de surplus de production solaire. L'hydrogène produit est ensuite stocké pour être utilisé par la pile à combustible en période de déficit. La modélisation de l'électrolyseur dans TRNSYS est souvent réalisée avec

### Caractéristique électrique des électrolyseurs

Les électrolyseurs alcalins actuels, utilisant, une nouvelle géométrie des cellules appelée *Zero Gap*, ont des performances comparables aux électrolyseurs à membrane. Les électrolyseurs à haute température ont une tension par cellule plus faible que les autres types (l'énergie de dissociation de la vapeur d'eau est plus faible que celle de l'eau) mais la densité de courant maximale atteinte est faible. La tension de vide est environ 1,23 V. lorsque l'intensité augmente, les pertes augmentent alors la tension augmente. La tension d'une cellule est limitée à 2 V, [Went et Rohland, 1991].

Les pertes dans les électrolyseurs dues exactement aux mêmes raisons que les piles à combustible. Les valeurs réelles de la tension opératoire sont comprises entre 1.6 à 2.0 V, en fonction de la densité du courant. Puisque les problèmes de refroidissement et la gestion de l'eau sont résolus facilement, alors la performance des électrolyseurs est meilleure que les piles à combustible, où ses densités de courant sont environ 1.0 A/cm<sup>2</sup>

Un électrolyseur peut donner un rendement élevé à un voltage de 1.6 V si la densité e courant est maintenue basse mais avec un taux de production d'hydrogène amorti et des coûts élevés. Typiquement, les rendements opératoires donnés par des fabricants commerciaux des unités en tenant compte de l'énergie nécessaire pour la compression d'hydrogène sont compris entre 60 à 70 %, [Went et Rohland, 1991].

### II.2.4. Systèmes de stockage

Dans un mini-réseau autonome hybride combinant panneaux photovoltaïques (PV) et hydrogène, les systèmes de stockage jouent un rôle central pour garantir un approvisionnement énergétique stable et continu. Les **batteries** sont utilisées pour absorber les fluctuations rapides de la production solaire et assurer une alimentation immédiate et à court terme. Elles permettent de lisser les variations journalières et répondent efficacement aux pics de consommation [28].

Lorsque la production excède la capacité de stockage des batteries, l'énergie excédentaire est dirigée vers un **électrolyseur**, qui transforme l'eau en **hydrogène** à l'aide de l'électricité solaire. Cet hydrogène est ensuite **stocké** dans des réservoirs sous pression et utilisé ultérieurement par une **pile à combustible**, qui génère de l'électricité lorsque la production solaire est insuffisante (nuit, mauvais temps, etc.) [28].

Cette complémentarité entre stockage à court terme (batteries) et à long terme (hydrogène) améliore la **résilience énergétique** du mini-réseau et permet une **autonomie prolongée**, même en l'absence prolongée de soleil. Le système optimise ainsi l'utilisation des énergies renouvelables tout en réduisant la dépendance aux sources fossiles. [28]

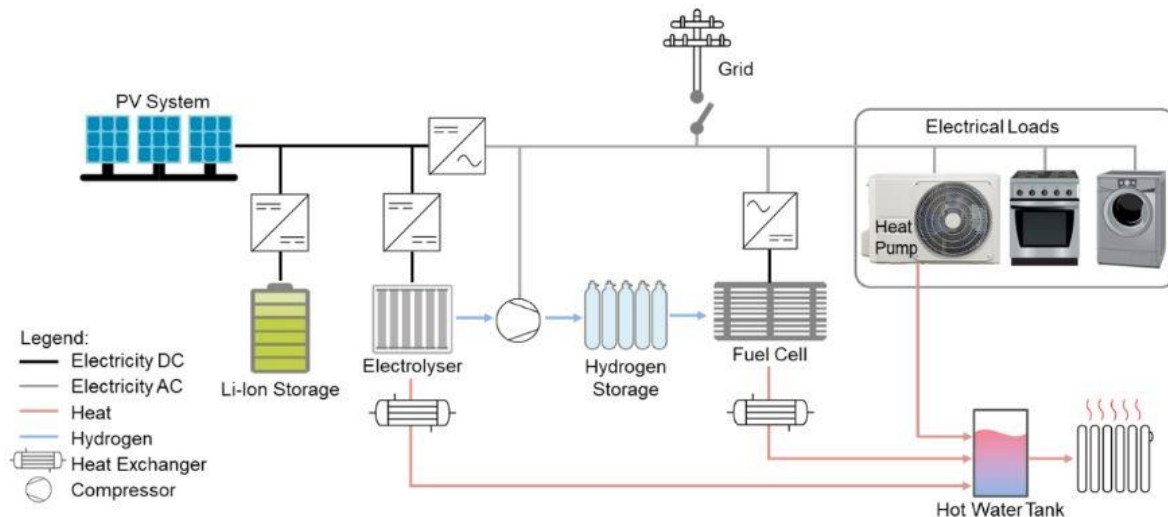


Figure (II.6) : Le stockage et le transport [28]

### II.2.4.1 Les batteries

Dans le mini-réseau autonome étudié, les batteries constituent un élément clé du système de stockage d'énergie. Elles sont chargées de stocker l'électricité produite par les panneaux photovoltaïques lorsque cette production est supérieure à la consommation. Leur fonctionnement repose sur des réactions électrochimiques réversibles permettant d'accumuler de l'énergie électrique sous forme chimique, puis de la restituer lorsque cela est nécessaire [29].

Les batteries utilisées sont généralement de type lithium-ion, en raison de leur rendement élevé, de leur durée de vie relativement longue et de leur compacité. [29] Elles contribuent à stabiliser l'alimentation électrique, en fournissant de l'énergie en cas de baisse de la production solaire ou de hausse de la demande. Leur intégration dans le système améliore la flexibilité opérationnelle et la qualité de service énergétique [29].



Figure (II.7) : Les batteries

#### II.2.4.2 Le stockage par hydrogène

Le stockage par hydrogène intervient en complément dans le mini-réseau hybride. Lorsque la production d'énergie photovoltaïque dépasse à la fois la consommation et la capacité des batteries, le surplus est utilisé pour alimenter un électrolyseur. Cet appareil utilise l'électricité pour décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène. **L'hydrogène produit est ensuite comprimé et stocké dans des réservoirs spécialisés.** Lorsqu'une demande en énergie survient et que la production photovoltaïque est insuffisante, l'hydrogène est converti à nouveau en électricité grâce à une **pile à combustible**. Ce processus ne rejette que de la vapeur d'eau, ce qui en fait une solution propre et respectueuse de l'environnement [29].

Ce système permet de valoriser les excédents d'énergie renouvelable et d'assurer l'autonomie énergétique du mini-réseau dans la durée. [29]



Figure (II.8) : Stockage d'hydrogène

### Données d'entrée pour la simulation

Dans cette section, nous présentons les différentes données d'entrée utilisées pour la modélisation et la simulation du système photovoltaïque. Ces données incluent les caractéristiques techniques des composants (cellules PV, batteries, convertisseurs, etc.), ainsi que les conditions environnementales telles que l'irradiance solaire et la température ambiante. Une définition précise de ces paramètres est essentielle pour garantir la fiabilité et la représentativité des résultats obtenus.

### 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 <sup>2</sup>	100 - 400 W/m <sup>2</sup>
Radiation solaire diffuse	W/m <sup>2</sup>	50 - 150 W/m <sup>2</sup>

*Table (II.1) : Données météorologiques [30]*

### 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.
- ✓ Le rayonnement solaire est maximal durant les mois d'été et reste relativement favorable au printemps et en automne. En revanche, il est nettement plus faible pendant la saison hivernale. [30]

### II.3 Profil de charge (demande énergétique)

Le profil de charge représente l'évolution de la demande énergétique au cours du temps et constitue un élément clé dans la conception d'un système énergétique autonome. Il permet d'identifier les périodes de forte consommation, d'ajuster la taille des composants, et d'assurer un dimensionnement optimal. Cette section décrit la nature, la répartition horaire et les caractéristiques du profil de charge utilisé dans la simulation.

<b>Mois</b>	<b>Consommation estimée (Wh)</b>	<b>Facteurs influents</b>
<b>Janvier</b>	<b>14 000</b>	<b>Chauffage électrique (températures basses)</b>
<b>Février</b>	<b>18 000 – 23 000</b>	<b>Fin de l'hiver, légère baisse de consommation</b>
<b>Mars</b>	<b>17 000 – 22 000</b>	<b>Températures plus douces</b>
<b>Avril</b>	<b>16 000 – 21 000</b>	<b>Moins de chauffage, pas encore de climatisation</b>
<b>Mai</b>	<b>15 000 – 20 000</b>	<b>Consommation minimale annuelle</b>
<b>Juin</b>	<b>18 000 – 24 000</b>	<b>Début de l'utilisation des climatiseurs</b>
<b>Juillet</b>	<b>22 000 – 28 000</b>	<b>Forte demande en climatisation</b>
<b>Août</b>	<b>25 000 – 30 000</b>	<b>Pic de consommation (chaleur extrême)</b>
<b>Septembre</b>	<b>20 000 – 26 000</b>	<b>Baisse progressive de la climatisation</b>
<b>Octobre</b>	<b>18 000 – 23 000</b>	<b>Consommation modérée</b>
<b>Novembre</b>	<b>17 000 – 22 000</b>	<b>Début de la demande en chauffage</b>
<b>Décembre</b>	<b>19 000 – 24 000</b>	<b>Hausse de la consommation pour le chauffage</b>

*Tableau (II.2) : Profil de charge (demande énergétique) [30]*

**Profil journalier typique :**

- Matin (6h-9h) : Augmentation de la demande (chauffage, électroménager).
- Journée (10h-16h) : Baisse relative de la consommation.
- Soir (18h-22h) : Pic de consommation (éclairage, cuisine, TV, climatisation /chauffage). [30]

**Conclusion**

Ce chapitre a présenté les fondements techniques du mini-réseau autonome étudié, en détaillant son architecture, ses composants principaux et les données d'entrée nécessaires à la simulation. L'analyse du schéma fonctionnel et des interactions entre les sous-systèmes – panneaux photovoltaïques, pile à combustible, électrolyseur, batteries et stockage d'hydrogène – a permis de comprendre comment ces éléments coopèrent pour assurer une alimentation énergétique fiable et continue.

Chaque composant a été étudié selon ses caractéristiques techniques et son rôle dans l'équilibre production-demande, avec une attention particulière portée à la complémentarité entre production solaire et stockage hybride. De plus, les données climatiques et le profil de charge électrique ont été identifiés comme des variables essentielles à intégrer dans la modélisation.

Cette description détaillée constitue la base pour la suite du travail, notamment la modélisation sous TRNSYS, l'analyse des performances énergétiques et l'évaluation globale du système.



---

***CHAPTRE III: Modélisation et simulation sous  
TRNSYS***

---



**Introduction :**

Après avoir défini l'architecture et les composants du mini-réseau autonome, ce chapitre se consacre à la modélisation et à la simulation du système énergétique à l'aide du logiciel TRNSYS (Transient System Simulation Tool). Cet outil de simulation dynamique est largement utilisé dans le domaine de l'énergie pour l'analyse de systèmes thermiques et électriques complexes, notamment les installations intégrant des sources renouvelables.

L'objectif principal de ce chapitre est de reproduire le comportement simulé du système étudié en s'appuyant sur des modèles numériques précis des différents composants (panneaux photovoltaïques, piles à combustible, électrolyseurs, systèmes de stockage, onduleurs, contrôleurs, etc.), et de simuler leur interaction au fil du temps selon les données climatiques et le profil de charge définis précédemment.

La première section présente les fonctionnalités clés de TRNSYS, ses modules pertinents pour notre étude, ainsi que les raisons justifiant son choix par rapport à d'autres outils de simulation. Ensuite, les étapes de modélisation, la configuration des composants et les scénarios simulés seront développés afin de permettre une analyse complète des performances du système.

Ce chapitre constitue une étape centrale dans notre démarche méthodologique, en fournissant les résultats nécessaires pour évaluer la viabilité technique et énergétique du mini-réseau dans un contexte d'électrification rurale durable.

**III.1. Présentation de TRNSYS**

Le logiciel TRNSYS est un outil de simulation dynamique complet et modulable, conçu pour modéliser des systèmes énergétiques complexes. Développé par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) en collaboration avec des partenaires internationaux, TRNSYS s'est imposé comme une référence mondiale dans la simulation thermique des bâtiments et des systèmes énergétiques.

Il dispose d'une large bibliothèque de composants couvrant de nombreuses applications telles que l'énergie solaire, les éoliennes, les systèmes hydrauliques, les microcontrôleurs, les panneaux photovoltaïques, les piles à combustible, les chaudières biomasse, la cogénération, la climatisation, le stockage énergétique, les systèmes de régulation, les pompes à chaleur, et bien d'autres encore, y compris des outils d'analyse économique et tarifaire.

Ces composants peuvent être interconnectés pour permettre des études multidisciplinaires alliant technique et économie. L'interface TRNSYS Studio facilite la création de schémas de simulation de manière intuitive, en reliant les éléments du projet à modéliser.

La conception modulaire et ouverte du logiciel offre aux utilisateurs une grande flexibilité, permettant l'adaptation précise des composants aux spécificités du système étudié, ainsi que la création de modules personnalisés pour répondre à des besoins spécifiques.[31]

Le TRNSYS se caractérise par les trois principales fonctions :

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

### III.2. Les applications du TRNSYS :

Le logiciel TRNSYS peut être exploité dans divers domaines, notamment :

- La modélisation de systèmes à énergies renouvelables
- L'étude de systèmes de cogénération et de piles à combustible
- La simulation de systèmes solaires, qu'ils soient thermiques ou photovoltaïques
- La conception de bâtiments à faible consommation énergétique ainsi que de leurs systèmes CVC (chauffage, ventilation, climatisation), intégrant des fonctions avancées comme la ventilation naturelle, les planchers chauffants/refroidissants, ou les façades doubles
- Plus largement, toute application nécessitant une modélisation dynamique de systèmes énergétiques [31]

### III.3. Fonctionnalités et modules utilisés :

**TRNSYS (Transient System Simulation Tool)** est un environnement de simulation dynamique conçu pour analyser le comportement temporel de systèmes énergétiques complexes. Grâce à son architecture modulaire, il permet de modéliser avec précision des systèmes hybrides incluant des sources d'énergie renouvelables, des équipements de conversion, des dispositifs de stockage et des stratégies de gestion de l'énergie.

Le logiciel repose sur une interface graphique intuitive (TRNSYS Studio) qui permet d'assembler différents composants prédéfinis, tels que des générateurs photovoltaïques, des piles à combustible, des électrolyseurs, des batteries, des contrôleurs logiques, ou encore des profils de charge. Chaque composant peut être configuré selon des paramètres techniques

---

spécifiques (rendement, capacité, puissance nominale, seuils de fonctionnement, etc.) afin de représenter fidèlement les caractéristiques du système réel.

Pour ce projet, les modules utilisés permettent notamment de :

- Importer et exploiter des données météorologiques horaires (irradiation, température, etc.).
- Simuler la production d'électricité photovoltaïque selon les conditions climatiques locales.
- Modéliser un électrolyseur permettant la conversion de l'excès d'énergie en hydrogène.
- Intégrer une pile à combustible, utilisée pour produire de l'électricité à partir de l'hydrogène stocké.
- Représenter un système de batteries avec gestion du niveau de charge et des pertes énergétiques.
- Définir un profil de consommation énergétique basé sur des données de charge journalières ou saisonnières.
- Mettre en œuvre des règles de commande et des stratégies de priorisation énergétique.

TRNSYS permet également l'analyse des résultats sous forme de graphiques, tableaux et bilans énergétiques, facilitant ainsi l'interprétation des performances du système simulé. [15]

#### **III.4. Avantages de TRNSYS pour ce projet**

Le recours à TRNSYS présente de nombreux avantages pour l'étude d'un mini-réseau autonome :

- Il offre une modularité importante, permettant d'adapter le système selon divers scénarios (ajout ou suppression de composants, variations de taille ou de configuration).
- Il simule de manière dynamique les flux d'énergie sur une base horaire ou infra-horaire, ce qui est essentiel pour comprendre le fonctionnement réel d'un système hybride soumis à des variations climatiques et de charge.
- Il permet d'implémenter des stratégies de gestion énergétique personnalisées, en tenant compte des priorités de fonctionnement (par exemple : utiliser l'hydrogène avant la batterie, ou inversement).
- Il est reconnu dans la communauté scientifique et utilisé dans de nombreux travaux de recherche pour l'évaluation de systèmes renouvelables, garantissant ainsi la fiabilité des modèles utilisés.
- Enfin, son interface graphique conviviale facilite la compréhension des interactions entre les composants et l'ajustement des paramètres selon les besoins de l'étude.

TRNSYS constitue un outil adapté, fiable et puissant pour modéliser, simuler et optimiser des systèmes énergétiques hybrides intégrant les énergies renouvelables, dans le but de concevoir des solutions durables pour l'électrification hors réseau. [15]

### III.5. Description du Mini réseau autonome

Le système étudié constitue un mini-réseau autonome hybride, modélisé à l'aide du logiciel TRNSYS, intégrant la production d'électricité à partir de panneaux photovoltaïques (Type 190c) et un stockage énergétique sous forme d'hydrogène. L'énergie produite est utilisée en priorité pour alimenter directement les charges électriques. En cas de surplus, l'excédent active un électrolyseur (Type 160), qui transforme l'eau en hydrogène.

L'hydrogène généré est comprimé à l'aide d'un compresseur (Type 167), puis stocké dans un réservoir sous pression (Type 164b). Lorsqu'une insuffisance de production photovoltaïque est détectée, une pile à combustible (Type 173a) utilise l'hydrogène stocké pour produire l'électricité nécessaire, garantissant ainsi la continuité de l'alimentation.

Un onduleur (Type 175a) assure la conversion du courant continu en courant alternatif, tandis qu'un régulateur/inverseur (Type 48c) est intégré au système pour stabiliser la tension et réguler la distribution électrique en fonction des besoins du réseau. Par ailleurs, une batterie (Type 185a) contrôlée par (Type 102a-DEGS controller) est ajoutée en tant que solution de secours, capable de fournir de l'énergie rapidement lors des périodes de transition ou de forte demande, renforçant ainsi la fiabilité du système.

L'ensemble est géré par un contrôleur principal (Type 105a) qui pilote les différentes unités en fonction des conditions de production et de consommation. Un contrôleur de sortie temporisée (Type 150) permet d'introduire des délais dans les actions de commutation afin de limiter les sollicitations excessives des composants.

En combinant la production photovoltaïque, le stockage hydrogène et une unité de secours basée sur batterie, ce système assure une alimentation électrique autonome, stable et optimisée, particulièrement adaptée aux zones isolées ou aux contextes à forte variabilité énergétique.

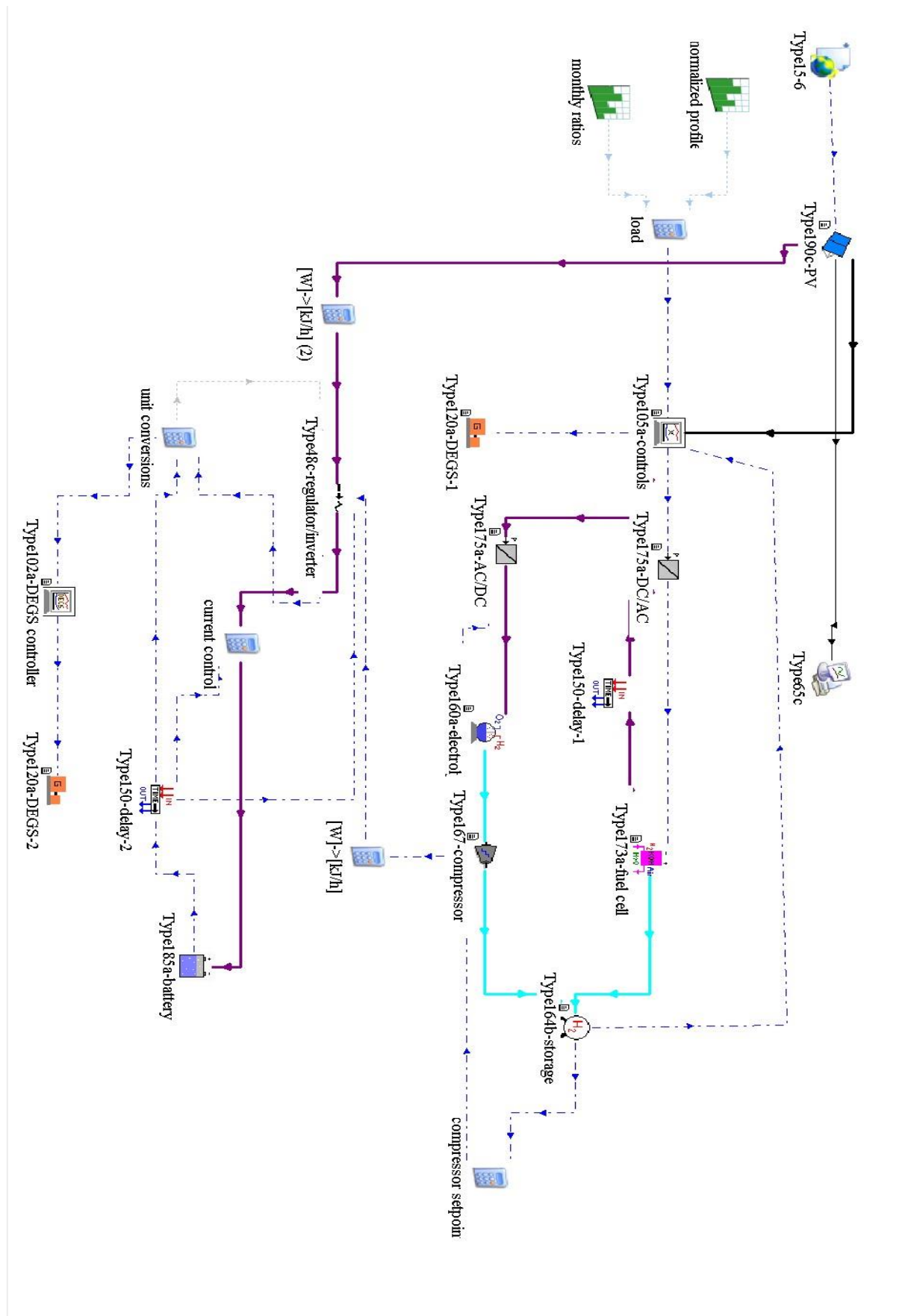


Figure (III.1) : Installation réalisée par TRNSYS

### III.6. MODELISATION DU BILAN ENERGETIQUE DU SYSTEME :

La figure (III.2) montre un diagramme en block de la configuration possible du système à étudier.

Soit  $E_{PVj}$ , la puissance journalière générée par les PV, Durant les jours de stockage d'énergie  $j$ , une partie de l'énergie PV ; dénotée par  $E_{Lj}$  est transmise directement à la charge (via l'inverseur du courant continu en courant alternatif DC/AC), tandis que la partie restante ; dénotée par  $E_{Sj}$  va être stockée sous forme d'énergie chimique dans les batteries rechargeables  $E_{Bj}$ , et sous forme d'hydrogène  $E_{H2j}$ .

#### III.6.1. Hypothèses

Pour des raisons de simplification, on doit prendre les hypothèses suivantes :

- 1) Les panneaux PV sont supposés fixes, orientés vers le sud et inclinés avec un angle égal à la latitude des panneaux par rapport au plan horizontal,
- 2) La contribution de l'albédo est considérée,
- 3) L'irradiation solaire atteint sa valeur maximale à midi de chaque jour lorsque l'angle horaire est nul,
- 4) La consommation électrique est supposée constante durant chaque mois.
- 5) Les rendements énergétiques de tous les composants du système sont supposés constants,
- 6) La capacité de stockage des batteries rechargeables à long terme est supposée constante.

#### III.6.2. Description des composants de système sur TRNSYS :

Le fonctionnement de notre système s'articule autour de huit composants majeurs.:

1. Type 190c- panneaux photovoltaïques.
2. Type 160a- Électrolyseur.
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 PV-hydrogène.
8. Type 150- Contrôleur de sortie retardée

Système de secours:

1. **Type 185a- batterie de secours**
2. **Type 150- Contrôleur de sortie retardée**
3. **Type 120a- DEGS (Système de production d'énergie distribuée)**
4. **Type 102a- DEGS controller**

Les composantes auxiliaires sont :

1. **Type 120a- DEGS-1 Système de production d'énergie distribuée**
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.6.3. Le panneau photovoltaïque Type 190C

**Type 190C-PV** est un module solaire standard d'une puissance nominale de 190 watts, souvent utilisé dans les systèmes solaires autonomes ou connectés au réseau. Il est généralement composé de 36 cellules en silicium monocristallin ou polycristallin, encapsulées sous verre trempé avec un cadre en aluminium pour une meilleure durabilité. Ce type de panneau présente une tension en circuit ouvert d'environ 22 à 24 V et un courant de court-circuit proche de 9 A. Il fonctionne de manière optimale sous des conditions standard (STC), avec un rendement moyen de 14 à 16 %. Sa performance diminue légèrement avec l'augmentation de la température, en raison d'un coefficient thermique d'environ  $-0,45 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ . Les dimensions typiques sont de 1,58 m x 0,8 m, pour un poids de 15 à 18 kg. Le Type 190C est adapté à une variété d'applications, y compris les installations résidentielles, rurales ou dans des mini-réseaux hybrides. Sa durée de vie dépasse généralement les 25 ans.

Catégorie	Données
Technologie	Silicium monocristallin ou polycristallin, 36 cellules en série
Puissance nominale (Pmax)	Environ 190 W
Tension en circuit ouvert (Voc)	~22 à 24 V
Courant de court-circuit (Isc)	~8,5 à 9 A
Tension au PPM (Vmp)	~18 à 20 V
Courant au PPM (Imp)	~9,5 à 10,5 A

Dimensions	1,58 m x 0,8 m, épaisseur : 35 à 45 mm
Poids	15 à 18 kg
Rendement	Environ 14 % à 16 %
Coeff. température (Pmax)	~-0,45 % / °C
Applications	Systèmes résidentiels, hors réseau (off-grid), mini-réseaux autonomes
Durabilité	Plus de 25 ans

*Table (III.1) : caractéristiques du panneau photovoltaïque Type 190C*

## PROCEDURE DE DIMENSIONNEMENT

La méthode de dimensionnement proposée est basée sur les équations de bilan énergétique du système. Le système considéré comprend des panneaux PV, des batteries rechargeables et un système de stockage d'hydrogène, des adaptateurs de charge DC/DC et DC/AC.

Le système hybride peut avoir simplement un système de stockage à hydrogène. Dans ce cas, l'autonomie du système peut être assurée, mais le stack pile à combustible va subir un fonctionnement permanent, ce qui peut affecter sa durée de vie. Par conséquent, l'utilisation des batteries rechargeables comme système de stockage journalier d'énergie PV va augmenter la durée de vie des piles à combustible en réduisant le nombre de cycles de fonctionnement.

Dans ce cas, l'hydrogène stocké va être considéré comme un stockage saisonnier d'énergie, et doit être utilisé uniquement pendant les jours défavorables en rayonnement solaire.

Par le couplage des batteries avec le système à hydrogène, on peut obtenir un système de stockage d'énergie photovoltaïque ayant un rendement acceptable et une longue durée de vie.

L'énergie journalière stockée dans les batteries rechargeables va être reconvertie en énergie électrique pendant les jours favorables en rayonnement solaire quand la puissance des PV est inférieure à la puissance de la charge ou nulle.

Pour le dimensionnement du système, on a suivi la procédure suivante :

1. La connaissance de la consommation journalière de l'énergie électrique d'un site (en kWh),
2. L'estimation du rayonnement solaire global, incidents sur les panneaux PV horizontaux en utilisant le modèle d'Angstrom de premier ordre et la corrélation d'Orgil et Hollands pour la détermination des rayonnements direct et diffus (en kWh/m<sup>2</sup>),

3. L'estimation du rayonnement solaire global, direct et diffus incidents sur les panneaux PV inclinés en utilisant le modèle isotrope (en kWh/m<sup>2</sup>),
4. Le calcul de la surface optimale totale des panneaux PV ;
5. L'estimation de l'énergie saisonnière d'hydrogène à stocker (en kWh), et l'énergie journalière à stocker dans les batteries électrochimiques (en kWh),
6. La capacité du système de stockage saisonnier d'hydrogène (en m<sup>3</sup>
7. La taille des stack électrolyseur et piles à combustible.
8. L'organigramme de la méthode de dimensionnement est montré sur la figure III.2

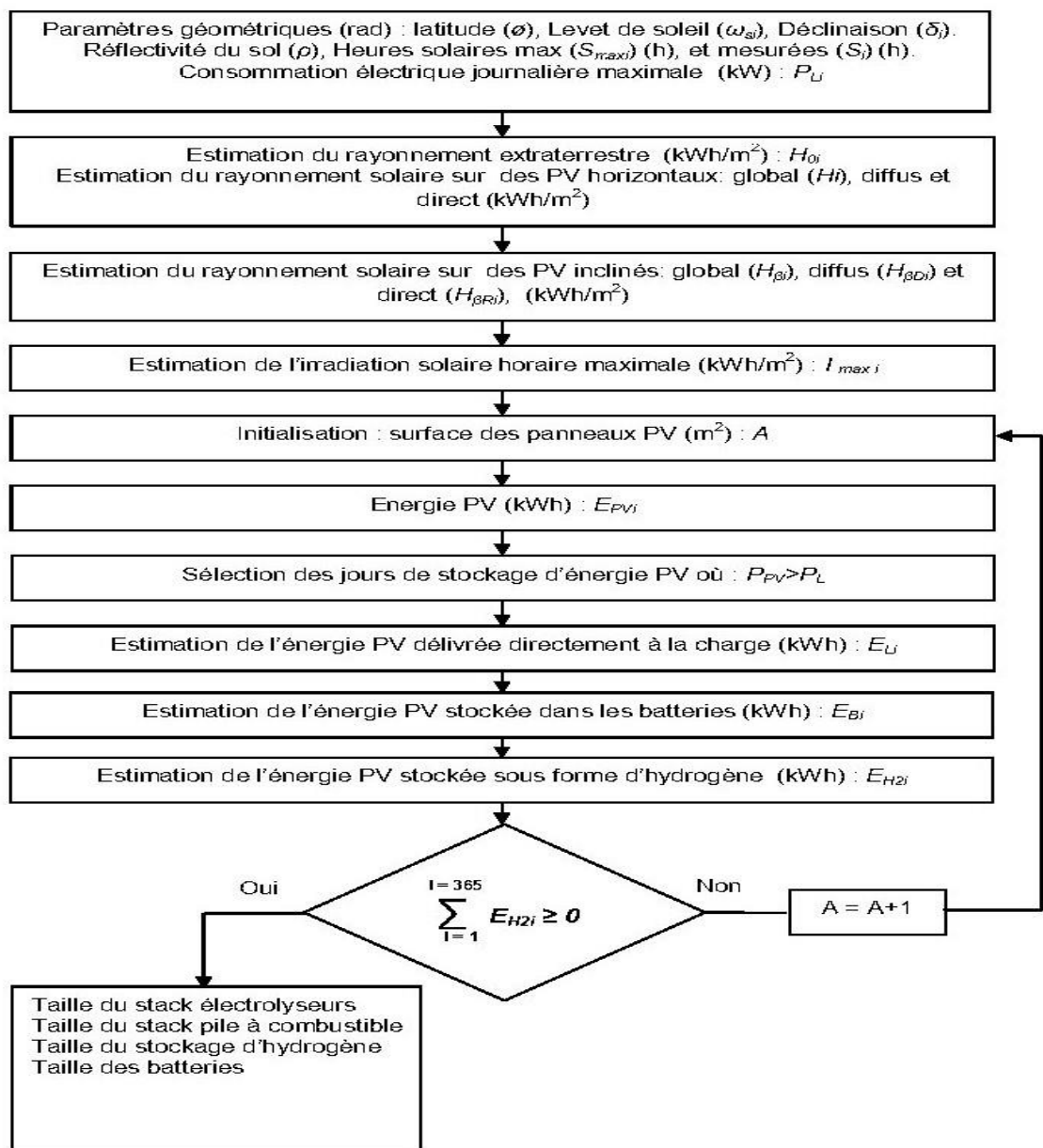


Figure (III.2) : Organigramme de dimensionnement du système

Le **panneau photovoltaïque** utilisé dans ce système dont les caractéristiques sont présentées sur le tableau suivant :

Paramètre	Description	Valeur Typique
Surface du module	Surface active du module	1.63 m <sup>2</sup>
Nombre de modules	Modules en série/parallèle	10 × 2
NOCT	Température à 800 W/m <sup>2</sup> , 20 °C, 1 m/s vent	45 °C
Coeff. température - tension	Taux de baisse de puissance par °C	-0.40 %/°C

**Table (III.2) :** Les données de panneau photovoltaïque Type 190C

Les entrées (Inputs) :

Paramètre	Description	Valeur Typique
Irradiance incidente	Rayonnement solaire reçu par le plan du module PV (W/m <sup>2</sup> )	1000 W/m <sup>2</sup>
Température de cellule	Température de fonctionnement du module	25 °C
Signal de commande	Activation/désactivation du module	1 (ON)
Facteur d'ombrage	Réduction due à l'ombrage	1 (aucun ombrage)
Température ambiante	Température atmosphérique	20 °C
Vitesse du vent	Influence sur la température de la cellule	1–3 m/s

**Table (III.3) :** Les entrées (Inputs) de panneau photovoltaïque Type 190C

Les Sorties (Outputs) :

Paramètre	Description	Valeur Typique
Puissance de sortie	Puissance électrique produite (selon conditions standard)	300 W
Courant de sortie	Courant produit par le module	~8.3 A
Tension de sortie	Tension en fonctionnement	~36 V
Température de cellule	Calculée si non fournie directement	~25–45 °C

Rendement instantané	Rendement conversion (module cristallin standard)	~18 %
Énergie cumulée	Énergie produite sur une période	Dépend du site

*Table (III.4) : Les Sorties (Outputs) de panneau photovoltaïque Type 190C*

#### III.6.4. Type 160a – Électrolyseur :

Type-160 représente un électrolyseur d'eau alcaline fonctionnant à haute pression. Il repose sur une combinaison de principes de thermodynamique fondamentale, de théorie du transfert thermique et de relations électrochimiques empiriques. Un modèle thermique dynamique y est également intégré. Le comportement électrochimique est basé sur une courbe courant-tension dépendante de la température pour une pression donnée, ainsi que sur une relation de rendement Faraday indépendante de la température et de la pression. La température de l'électrolyseur peut être soit fournie en entrée, soit calculée à l'aide d'un modèle thermique simplifié ou détaillé (Ulleberg, 1998 ; 2001). Dans cette version du Type160, l'utilisateur est amené à entrer directement la température de l'électrolyseur.

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

<i>Nome</i>	<i>Valeur</i>	<i>Unité</i>
Mode température	1	-
Zone d'électrode	0.25	M <sup>2</sup>
Le nombre de cellules est une série	70	-
Nombre de piles en parallèle	3	-
Densité de courant maximale admissible	680	MA/Cm <sup>2</sup>
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	-

**Table (III.5) :** les caractéristiques de l'électrolyseur (type160a)

Les entrées et les sorties :

<i>Les entres</i>	<i>Les sorties</i>
Signal de contrôle de l'électrolyseur	Courant consommé par l'électrolyseur
Courant de l'électrolyseur	Puissance de l'électrolyseur
Pression de l'électrolyseur	Efficacité énergétique
<i>Température de fonctionnement de l'électrolyseur</i>	<i>Taux de production d'hydrogène</i>
<i>Débit d'eau de refroidissement</i>	<i>Taux de production d'oxygène</i>

**Table (III.6) :** 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) :

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

Avec

$$r^* = r1 + r2T_{ely} \quad (III,2)$$

$$s^* = s1 + s2T_{ely} + s3T_{ely}^2 \quad (III,3)$$

$$t^* = t1 + \frac{t2}{T_{ely}} + \frac{t3}{T_{ely}^2} \quad (III,4)$$

Le rendement de Faraday correspond au rapport entre la quantité d'hydrogène effectivement produite et celle qui serait théoriquement générée par l'électrolyseur. Ce rendement prend en compte les pertes de courant dites parasites, notamment celles survenant le long des conduits de gaz, ce qui lui vaut également l'appellation de rendement en courant.

Ces courants parasites tendent à augmenter lorsque la densité de courant diminue, en raison de la plus grande proportion d'électrolyte, ce qui abaisse la résistance électrique. Par ailleurs, le courant parasite dans une cellule varie de manière linéaire avec la tension appliquée.

Ainsi, plus la densité de courant est faible, plus la part relative du courant parasite par rapport au courant total est importante. Une élévation de température accentue ce phénomène en réduisant la résistance, ce qui se traduit par des pertes plus élevées dues aux courants parasites et, en conséquence, une baisse du rendement de Faraday.

Une formule empirique permet de représenter avec précision ces effets à une température donnée :

$$n_f = \left( \frac{I_{\text{density}}}{a1 + I_{\text{density}}} \right) a2 \quad (\text{III},5)$$

D'après la loi de Faraday, la quantité d'hydrogène produite par une cellule d'électrolyse est directement liée au flux d'électrons atteignant les électrodes, ce flux étant équivalent au courant électrique circulant dans le circuit externe.

Ainsi, dans un électrolyseur constitué de plusieurs cellules montées en série, la production totale d'hydrogène est proportionnelle à l'intensité du courant appliqué. On peut alors exprimer le débit d'hydrogène généré de la manière suivante :

#### Production d'hydrogène :

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

$$\dot{n}_{H2} = n_f N_{\text{cells}} \frac{I_{\text{ely}}}{n_f} \quad (\text{III},6)$$

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

Production d'oxygène :

$$n_{O2} = \frac{1}{2} n_{H2} \quad (\text{III},7)$$

#### III.6.5. 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 :

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

*Table (III.7) : les données de Compresseur du H2*

Les entrées et les sorties :

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

*Table (III.8) : Les entrées et les sorties de compresseur de H2*

L'équation utilisée pour estimer la puissance nécessaire au compresseur, chargé de comprimer l'hydrogène avant son stockage dans un réservoir, est formulée comme suit :

Ce calcul repose sur un modèle de gaz parfait, appliqué à un processus de compression en quasi-équilibre. Un tel processus suppose que le système évolue à travers une suite d'états suffisamment proches de l'équilibre pour être traités comme tels.

Par ailleurs, ce modèle considère une compression polytropique, un type de processus en quasi-équilibre qui établit une relation spécifique entre la pression et le volume du gaz lors de la compression. Cette relation peut être représentée par l'équation suivante :

$$PV)^N = \text{constant} \quad (\text{III},8)$$

1er étage de compression :

$$W1 = \left( \frac{NRT_{\text{low}}}{N-1} \right) \left( 1 - \left( \frac{P_x}{P_{\text{in}}} \right) \left( \frac{N-1}{N} \right) \right) \quad (\text{III},9)$$

2ème étage de compression :

$$W2 = \left( \frac{NRT_{\text{low}}}{N-1} \right) \left( 1 - \left( \frac{O_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right) \left( \frac{N-1}{N} \right) \right) \quad (\text{III},10)$$

Puissance globale de compresseur :

$$P_{\text{com}} = \dot{m}_{\text{in}}(W1 + W2) \quad (\text{III},11)$$

Travail isotherme :

$$W_{\text{iso}} = -RT_{\text{low}} \ln \left( \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right) \quad (\text{III},12)$$

$$P_{\text{iso}} = \dot{m}_{\text{in}} W_{\text{iso}} \quad (\text{III},13)$$

Efficacité isentropique :

$$n_{\text{isen}} = \frac{P_{\text{iso}}}{P_{\text{comp}}} \quad (\text{III},14)$$

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 :

$$T_{\text{high}} = T_{\text{low}} R_f^{\frac{N-1}{N}} \quad (\text{III},15)$$

Chaleur produite par compression :

$$Q_{\text{cool}} = \dot{n}_{\text{in}} C_p (T_{\text{high}} - T_{\text{low}}) \quad (\text{III},16)$$

### III.6.6. Type 164b- Stockage du H2

Le Type 164b dans TRNSYS représente un réservoir de stockage d'hydrogène comprimé utilisé dans les systèmes énergétiques intégrant la production et l'utilisation de l'hydrogène. Ce modèle simule le comportement dynamique du stockage en fonction de l'entrée de gaz (débit, pression, température) et de la demande en sortie. Il prend en compte les variations de pression et de température du gaz stocké, tout en supposant un comportement de gaz parfait. Le volume du réservoir est fixe, et les transferts thermiques avec l'environnement peuvent être modélisés pour simuler les effets de refroidissement ou de réchauffement. Le modèle permet également de suivre l'état de charge (SoC) en hydrogène et de calculer l'énergie stockée. Il est principalement utilisé pour l'analyse de la gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides comportant électrolyseurs, piles à combustible, et panneaux photovoltaïques.

#### Avantages du modèle Type 164b

##### 1. Modélisation réaliste du stockage dynamique

Le Type 164b prend en compte les variations de pression, température et état de charge en temps réel, permettant une simulation fidèle du comportement du réservoir dans des conditions opérationnelles variables.

### 1. Intégration facile dans des systèmes hybrides

Ce modèle est conçu pour s'intégrer efficacement avec d'autres composants TRNSYS comme les électrolyseurs (Type 160) et les piles à combustible (Type 165), facilitant la simulation de systèmes complets de production, stockage et utilisation de l'hydrogène.

### 2. Prise en compte des transferts thermiques

Le Type 164b permet de simuler les échanges thermiques avec l'environnement, ce qui est essentiel pour évaluer les effets de la température sur la sécurité, l'efficacité énergétique et la performance globale du système de stockage.

Les données citées dans le tableau suivant.

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

*Table (III.9) : les données de Compresseur du H2*

Les entrées et les sorties :

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

*Table (III.10) : Les entrées et les sorties de compresseur de 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 :

$$P = \frac{nRT_{\text{gaz}}}{\text{Vol} - nb} - a \frac{n^2}{\text{Vol}^2} \quad (\text{III},17)$$

Où  $n$  désigne le nombre de moles de gaz,  $R$  la constante universelle des gaz,  $\text{Vol}$  le volume du réservoir et  $T_{\text{gaz}}$  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 :

$$PVol = nRT_{gaz} \quad (\text{III,17})$$

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

$$a = \frac{27R^2T_{cr}^2}{64P_{cr}} \quad (\text{III,18})$$

$$b = \frac{RT_{cr}}{8P_{cr}} \quad (\text{III,19})$$

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.6.7. Type 173a- Pile à combustible :

Le modèle **Type-173a** représente une modélisation mathématique simplifiée d'une pile à combustible alcaline (PAC). Il s'appuie sur une relation empirique permettant de décrire la caractéristique courant-tension à une température de fonctionnement nominale. Bien que la chaleur générée par la PAC soit estimée, le modèle ne comporte pas de description thermique dynamique approfondie.

Ce modèle a été développé à partir d'une PAC spécifique conçue par la société ZeTek (Brown, 2001 ; ZeTek, 2001), et repose sur l'hypothèse d'une alimentation en air du côté cathodique, par opposition à une alimentation en oxygène pur.

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

<i>Pente de Tafel</i>	<i>0.21727222</i>	<i>V/dec</i>
<i>Résistance ohmique</i>	<i>0.01168209</i>	<i>Ohm</i>
<i>Tension minimale autorisée des cellules</i>	<i>0.4</i>	<i>V</i>

**Table (III.11) : Les données de AFC (PAC) (type173a)**

Les entrées et les sorties :

<i>Les entres</i>	<i>Les sorties</i>
<i>Signal de contrôle</i>	<i>Efficacité énergétique</i>
<i>Température de fonctionnement de la pile</i>	<i>Puissance de sortie de la pile à combustible</i>
<i>Pression d'entrée de H2</i>	<i>Tension de la pile</i>
<i>Courant de la pile</i>	<i>Tension de la cellule</i>

**Table (III.12) : 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 :

$$U_{cell} = \frac{U_{mod}}{n_{c.ser}} \quad \text{(III,20)}$$

$$U_{mod} = U_0 - b \log(I_{stack}) - R_{ohm} I_{stack} \quad \text{(III,21)}$$

$$U_{stack} = n_{m.ser} U_{mod} \quad \text{(III,22)}$$

Courant de cellule et de pile :

$$I_{cell} = \frac{I_{FC}}{n_{c.par} n_{s.par}} \quad \text{(III,23)}$$

$$I_{stack} = \frac{I_{FC}}{n_{s.par}} \quad \text{(III,24)}$$

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

$$P_{stack} = U_{stack} I_{stack} \quad \text{(III,25)}$$

Efficacité énergétique :

$$n_e = \frac{U_{cell}}{U_{tn}} \quad \text{(III,26)}$$

Débit molaire stœchiométrique d'hydrogène :

$$n_{H_2} = \frac{n_{c.ser} n_{m.ser} I_{FC}}{zF} \quad (\text{III,27})$$

Consommation totale d'hydrogène :

$$V_{H_2} = \frac{n_{H_2}}{\rho_{gas}} S_{H_2} \quad (\text{III,28})$$

Chaleur totale générée par la pile à combustible :

$$Q_{gen} = P_{stack} \left( \frac{1-n_e}{n_e} \right) \quad (\text{III,29})$$

### III.6.8. Type 175a- Onduleurs électriques (DC/AC ou AC):

Le modèle **TYPE175** constitue une modélisation mathématique d'une unité de conditionnement d'énergie, essentielle dans les systèmes électriques hybrides ou autonomes. Ce modèle est basé sur des courbes de rendement empiriques permettant de représenter le comportement de différents types de convertisseurs d'énergie, notamment les convertisseurs DC/DC, ainsi que les onduleurs DC/AC et AC/DC. La relation empirique utilisée dans le cadre de ce modèle a été initialement proposée par Laukamp (1988), puis a fait l'objet d'améliorations notables par Ulleberg (1998), dans une optique d'optimisation des performances énergétiques et de meilleure adéquation aux systèmes hybrides modernes.

Le modèle suppose que la puissance d'entrée est connue et disponible à chaque instant. À partir de cette donnée, la puissance de sortie est calculée en appliquant le rendement correspondant, en fonction des conditions de fonctionnement spécifiques du dispositif. Cette approche, bien que simplifiée, permet d'obtenir une estimation réaliste des pertes énergétiques au sein des dispositifs de conversion, tout en assurant une compatibilité avec les logiciels de simulation de systèmes énergétiques, notamment TRNSYS.

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

<i>Nome</i>	<i>Valeur</i>	<i>Unité</i>
<i>Mode</i>	<i>1</i>	-
<i>Puissance nominale</i>	<i>350000</i>	<i>W</i>
<i>Constant de ralenti</i>	<i>5.836E-3</i>	-
<i>Tension de consigne</i>	<i>2.06</i>	<i>V</i>
<i>Constant ohmique</i>	<i>138.42</i>	<i>V^2</i>

<i>Nombre d'unité en parallèle</i>	<i>1</i>	<i>-</i>
<i>Puissance parasite</i>	<i>0</i>	<i>W</i>

*Table (III.13) : Les données d'onduleur électrique (DC/AC ou AC/DC).*

Les entrées et les sorties :

<i>Les entres</i>	<i>Les sorties</i>
<i>Puissance d'entrée</i>	<i>Puissance de sortie</i>
<i>Tension d'entrée</i>	<i>Tension de sortie</i>
<i>Tension de sortie</i>	<i>Courant de sortie</i>
	<i>Efficacité</i>

*Table (III.14) : Les entrées et les sorties d'onduleur*

Dans un **système d'alimentation autonome (SAPS)** intégrant une source d'énergie renouvelable, telle que l'énergie solaire, la puissance d'entrée varie de manière continue au cours du temps en raison de la nature intermittente de la ressource. Les caractéristiques de sortie d'une PV présentent des points de puissance maximale qui dépendent directement de la vitesse du vent. Afin d'optimiser la récupération énergétique, il peut s'avérer pertinent d'intégrer un algorithme de **suivi du point de puissance maximale (MPPT)**, permettant d'exploiter au mieux le potentiel de la source.

La performance des conditionneurs d'énergie, utilisés dans ce contexte pour adapter les niveaux de tension ou convertir la nature du courant (continu ou alternatif), est influencée par les pertes énergétiques internes. Ces **pertes de puissance (notées Ploss)** dépendent essentiellement du courant électrique circulant dans le dispositif. **Laukamp (1988)** a proposé un modèle empirique à trois paramètres permettant de quantifier ces pertes, offrant ainsi une base pour l'intégration de ces dispositifs dans les outils de simulation énergétique :

$$P_{loss} = P_{in} - P_{out} \quad \text{(III,30)}$$

$$P_{in} - P_{out} = P_0 + \frac{U_s}{U_{out}} P_{out} + \frac{R_{in}}{U_{out}^2} P_{out}^2 \quad \text{(III,31)}$$

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

$$\frac{P_{in}}{P_{nom}} = \frac{P_0}{P_{nom}} + \left(1 + \frac{U_s}{U_{out}}\right) \frac{P_{out}}{P_{nom}} + \frac{R_{in}}{U_{out}} P_{nom} \left(\frac{P_{out}}{P_{nom}}\right) \quad (\text{III,32})$$

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 :

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (\text{III,33})$$

Courant de sortie :

$$I_{out} = \frac{P_{out}}{U_{out}} \quad (\text{III,34})$$

### III.6.9. Type 105a- Contrôles principaux pour un système de mini-réseau PV-hydrogène :

Le **Type 105** correspond à un contrôleur principal destiné à un système électrique autonome intégrant des PV (ou toute autre source d'énergie renouvelable), un électrolyseur, une pile à combustible, un dispositif de stockage d'hydrogène ainsi que des groupes électrogènes diesel (ou une source d'énergie auxiliaire composée de plusieurs unités).

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

<i>Limite inférieure de stockage de H2 (pile à combustible)</i>	<i>10</i>	<i>% (base 100)</i>
---	-----------	---------------------

**Table (III.15) :** les données de Type 105a- Contrôles principaux pour un système de mini réseau PV-hydrogène.

Les entrées et les sorties

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

**Table (III.16) :** Les entrées et les sorties de Contrôles principaux pour un système de miniréseau PV-hydrogène.

### III.6.10. Type 150- Contrôleur de sortie retardée :

Ce composant représente un contrôleur de type « persistant », dont les sorties correspondent aux valeurs d'entrée enregistrées lors d'un pas de temps antérieur, déterminé par l'utilisateur. Par exemple, il est possible de configurer ce contrôleur de manière à ce que les sorties d'un autre composant dépendent des températures mesurées dans une zone à l'instant précédent, voire à celui de la journée précédente.

La durée de cette persistance est exprimée en nombre de pas de temps, et non en unités horaires.

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

**Table (III.17) :** Les données de Type 150- Contrôleur de sortie retardée

### III.6.11. Type 120a- Modèle générique de moteur diesel (DEGS) :

Le modèle **TYPE120** constitue une représentation mathématique destinée à simuler le comportement d'un groupe électrogène diesel (GED). Il s'appuie sur une relation empirique, modélisée par un polynôme du premier ordre, qui exprime la consommation de carburant en fonction de la puissance électrique normalisée délivrée par l'unité. Ce modèle calcule également les rendements électrique et énergétique associés à la production de puissance. Dans son usage courant, le modèle TYPE120 permet de prédire les performances d'un groupe électrogène générique évoluant dans une plage de puissance comprise entre 5 kW et 500 kW. Cette approche générique est fondée sur l'extrapolation d'une courbe de rendement énergétique de référence, obtenue à partir de la moyenne des caractéristiques de cinq groupes électrogènes distincts.

Pour améliorer la précision de ses prédictions, le modèle intègre un facteur de correction empirique, dérivé de données expérimentales collectées sur vingt systèmes d'alimentation électrique en sites isolés (Remote Area Power Systems, RAPS), avec des puissances moyennes de fonctionnement situées entre 5 et 186 kW (Lloyd, 1999).

Par défaut, le carburant considéré est le diesel liquide. Toutefois, TYPE120 comprend une base de données détaillant les propriétés physico-chimiques des carburants (Adler et al., 1986 ; McCarthy, 1982), permettant ainsi de calculer les débits de carburant équivalents pour cinq carburants alternatifs : gaz de pétrole liquéfié (GPL), propane (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), méthane (CH<sub>4</sub>), gaz naturel et hydrogène (H<sub>2</sub>). Cette fonctionnalité étend la portée du modèle à des applications diversifiées, notamment dans le cadre de la transition énergétique et des systèmes hybrides intégrant des sources de carburants variées.

<i>Nome</i>	<i>Valeur</i>	<i>Unité</i>
<i>DEGS mode</i>	<i>1</i>	-
<i>DEGS Type</i>	<i>1</i>	-
<i>Puissance maximale DEGS</i>	<i>360</i>	<i>KW</i>
<i>Puissance minimal DEGS</i>	<i>0</i>	<i>KW</i>
<i>Puissance nominale</i>	<i>300</i>	<i>KW</i>

*Table (III.18) : Les données de moteur diesel (DEGS).*

### III.6.12. Type 185a- batterie de secours

Le **Type 185a** dans TRNSYS modélise une **batterie électrochimique** destinée au **stockage temporaire de l'énergie électrique**. Il est particulièrement adapté aux systèmes hybrides autonomes basés sur les énergies renouvelables, où la gestion de l'intermittence est critique. Ce type permet de simuler le comportement dynamique d'une batterie en fonction des flux de charge et de décharge imposés par le système.

Fonctionnalités principales :

- Modélisation du processus de charge et de décharge avec rendement (efficacité énergétique).
- Intégration d'une profondeur de décharge maximale (*Depth of Discharge*, DoD).
- Prise en compte de la capacité nominale de stockage (en Ah ou kWh).
- Gestion de l'état de charge (State of Charge, SoC) au fil du temps.
- Comportement réaliste basé sur des seuils de tension minimale et maximale.
- Limitation des courants de charge/décharge pour respecter les caractéristiques physiques.

**a) Scénario de base :**

**Fonctionnement normal :**

Ce scénario représente les conditions nominales d'exploitation du système hybride photovoltaïque–hydrogène avec batterie de secours. La simulation repose sur des données météorologiques standardisées correspondant à une année typique de référence dans la région d'étude, caractérisée par un ensoleillement moyen et une température ambiante modérée. La courbe de charge appliquée est relativement stable et prévisible, reflétant un profil de consommation quotidien classique.

Dans ce cadre, les panneaux photovoltaïques assurent l'alimentation principale de la charge. L'excédent d'énergie produit est dirigé vers l'électrolyseur, qui génère de l'hydrogène stocké pour une utilisation différée. La pile à combustible est sollicitée lors des périodes d'ensoleillement insuffisant, assurant ainsi la continuité de l'approvisionnement. La batterie de secours intervient de manière ponctuelle pour lisser les fluctuations rapides ou répondre à des besoins transitoires de puissance. Ce scénario sert de référence pour l'évaluation du comportement nominal du système.

**b) Scénario alternatif :**

**Variation de la demande et intermittence des énergies renouvelables**

Ce scénario explore les effets combinés de la variabilité de la demande énergétique et de l'intermittence de la ressource solaire. Des profils de charge dynamiques sont appliqués, incluant des pics soudains (par exemple en soirée ou en hiver) ainsi qu'une consommation irrégulière. En parallèle, des périodes prolongées de faible ensoleillement sont introduites dans les données météorologiques, simulant des conditions climatiques défavorables telles que des journées nuageuses ou pluvieuses.

Ce contexte met en évidence les limites de la seule production photovoltaïque et teste la résilience du système. L'analyse porte sur la réactivité du réservoir d'hydrogène et la capacité de la pile à combustible à prendre le relais en cas de déficit de production. La batterie de secours joue ici un rôle crucial pour compenser les déséquilibres de court terme et garantir la stabilité du système. Ce scénario permet d'évaluer les performances en conditions réelles dégradées et la complémentarité des différents moyens de stockage dans une approche 100 % renouvelable.

#### **III.6.13. 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.

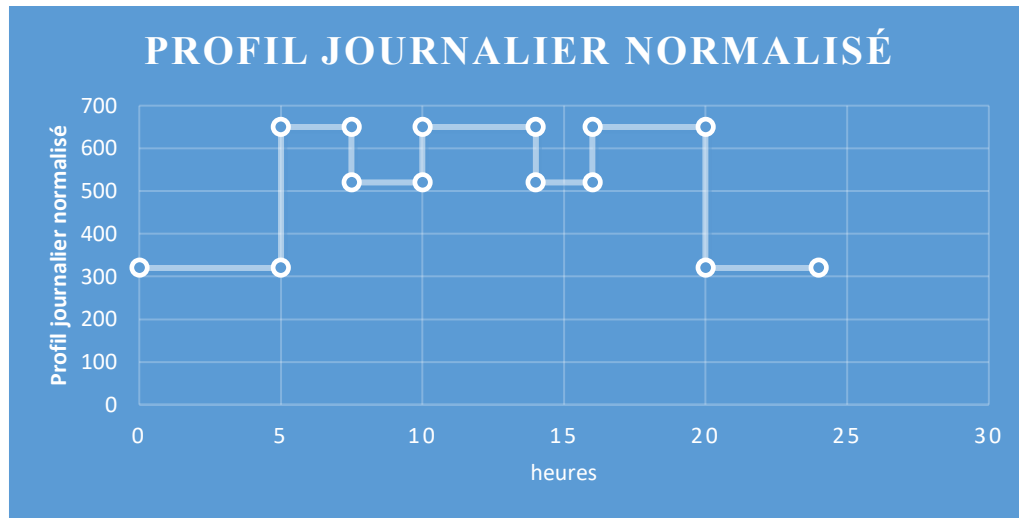
Cette version de Type15 lit les données au format de fichier météo Energy Plus (EPW). Pour notre simulation on a choisi la météo d'Ain Témouchent.

#### **III.6.14. Type 14h- Fonction de forçage dépendante du temps pour le profil de demande de puissance**

##### **Profil journalier normalisé:**

Le graphique illustre la variation horaire de la demande énergétique sur une journée type, exprimée sous forme normalisée. L'axe des abscisses (x) correspond à la plage temporelle couvrant les 24 heures de la journée, tandis que l'axe des ordonnées (y) représente un profil de consommation énergétique normalisé, dépourvu d'unité explicite, résultant probablement d'une mise à l'échelle des valeurs en watts (W) ou kilowatts (kW). Ce type de représentation est couramment utilisé dans l'analyse des charges électriques afin de comparer et d'optimiser les profils de consommation dans les systèmes énergétiques, notamment dans les études de

dimensionnement et de gestion des réseaux électriques, ainsi que dans la modélisation des systèmes autonomes.



*Figure (III.3) : Profil journalier normalisé*

### Analyse technique du profil de charge journalier normalisé

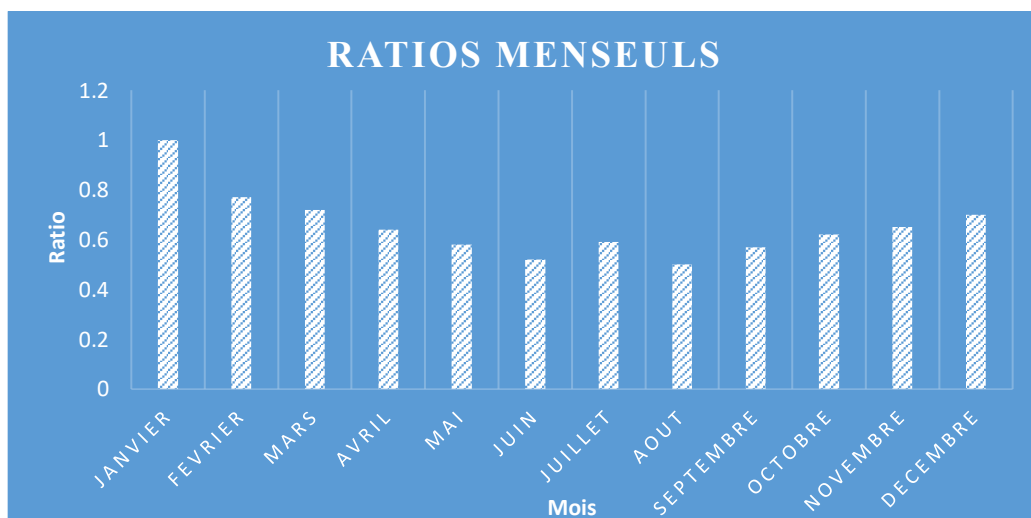
La courbe de charge journalière normalisée se caractérise par une succession de phases représentatives des dynamiques de consommation énergétique d'un foyer ou d'un petit site isolé, en lien avec les comportements usuels et les cycles d'activité quotidienne.

- **Phase nocturne (00h – 05h)** : Durant cette plage horaire, la courbe demeure stable autour de 320 unités, traduisant une consommation résiduelle minimale, essentiellement liée à des usages passifs tels que les appareils en veille, la réfrigération ou l'éclairage de sécurité. Cette période coïncide avec l'inactivité humaine maximale (sommeil).
- **Pic matinal (vers 05h)** : Une élévation soudaine de la demande est observée, atteignant environ 650 unités. Ce pic matinal est typiquement associé au démarrage synchronisé des activités domestiques (chauffage, éclairage, appareils électroménagers), traduisant le réveil massif des occupants.
- **Stabilisation intermédiaire (05h – 08h)** : Une légère décrue de la charge à environ 540 unités indique une phase d'activité modérée, marquant un équilibre énergétique après le pic initial. Cette période est caractéristique d'une occupation partielle du logement avec une charge relativement constante.
- **Reprise d'intensité (vers 10h)** : Une nouvelle augmentation de la demande à 650 unités traduit une reprise significative de la consommation, souvent en lien avec le fonctionnement d'équipements bureautiques, de cuisine ou d'ateliers domestiques. Elle marque le début d'une période d'activité soutenue.

- **Plateau de haute activité (10h – 14h)** : Durant cette période, le profil énergétique reste à un niveau élevé et stable, caractéristique d'un fonctionnement continu des charges dans un contexte professionnel ou résidentiel actif.
- **Réduction méridienne (14h)** : Une diminution modérée à environ 530 unités suggère une réduction temporaire de la demande, généralement liée à la pause déjeuner, avec un usage énergétique plus faible et sporadique.
- **Deuxième phase de pleine charge (14h – 20h)** : La courbe montre une reprise vers 640 unités avec une stabilité prolongée, traduisant la réactivation des usages résidentiels en fin de journée (retour à domicile, cuisson des repas, équipements audiovisuels, recharge de dispositifs électroniques).
- **Transition vers l'inactivité (vers 20h)** : Une chute brutale de la consommation à environ 320 unités signale la fin des activités intensives, correspondant à la mise en veille ou à l'arrêt progressif des équipements.
- **Période de repos (21h – 24h)** : La charge demeure faible et constante, illustrant une nouvelle phase d'inactivité nocturne où seules les charges de base subsistent.

#### Ratios mensuels:

Le graphique 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.



*Figure (III.4) : Ratios mensuels*

#### 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.

### Équation de la Puissance de Charge

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

$$P(t) = P_{max}R_m(t)100 \quad \text{(III,35)}$$

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.6.15. Type 65c- Traceur graphique en ligne avec fichier de sortie :

Le **composant de traçage en ligne** joue un rôle essentiel dans la supervision des simulations énergétiques en temps réel. Il permet l'affichage graphique des variables systèmes sélectionnés au cours de la simulation, facilitant ainsi le suivi dynamique de l'évolution des grandeurs d'intérêt (telles que les flux thermiques, les puissances électriques, ou encore les températures de fonctionnement). Ce composant, couramment utilisé dans les environnements de simulation tels que TRNSYS, est vivement recommandé en raison de sa capacité à fournir une rétroaction immédiate sur le comportement du système modélisé, permettant de détecter rapidement d'éventuelles incohérences ou anomalies de fonctionnement.

Plus précisément, le **traceur Type65** génère automatiquement, à chaque pas de temps, une visualisation graphique des données transmises, tout en enregistrant simultanément ces valeurs dans un fichier de sortie externe spécifié par l'utilisateur. Ce fichier ne contient toutefois pas les descripteurs d'unités physiques (tels que kJ/h, kg/s, °C, etc.), ce qui implique que l'interprétation correcte des résultats nécessite une connaissance préalable des variables sélectionnées. Ce type d'outil est particulièrement utile dans les phases de validation de

modèles, d'analyse de sensibilité ou encore dans l'optimisation de stratégies de gestion énergétique pour des systèmes hybrides ou autonomes.

### **Conclusion**

Ce chapitre a permis de présenter de manière détaillée la méthodologie de modélisation et de simulation adoptée pour l'étude du système énergétique autonome, à l'aide de l'environnement TRNSYS. Après une introduction aux fonctionnalités pertinentes du logiciel, les principaux composants du système – panneaux photovoltaïques, piles à combustible, électrolyseurs, unités de stockage par batterie et hydrogène – ont été modélisés individuellement sur la base de sous-modèles validés. La flexibilité de TRNSYS a été exploitée pour configurer différents scénarios de simulation, permettant d'évaluer la réponse du système face à des conditions de fonctionnement variées, notamment en ce qui concerne les fluctuations de la demande et l'intermittence des sources renouvelables.

L'ensemble des paramètres techniques, des hypothèses de modélisation et des critères d'évaluation des performances ont été rigoureusement définis, assurant la cohérence des résultats obtenus dans les chapitres suivants. Cette étape constitue une base essentielle pour l'analyse critique du comportement du système hybride simulé, et pour l'optimisation ultérieure de ses performances énergétiques et économiques. Le cadre mis en place ouvre également la voie à des études de sensibilité, ainsi qu'à des scénarios prospectifs intégrant des variantes technologiques ou climatiques.



---

***CHAPTRE IV: Résultats et discussion***

---



## Introduction :

Ce chapitre vise à procéder à une analyse approfondie des résultats issus de la modélisation et de la simulation d'un système d'alimentation autonome basé sur l'énergie solaire couplée à un dispositif de stockage d'hydrogène. L'étude est conduite dans le contexte climatique spécifique de la région d'Aïn Témouchent, en s'appuyant sur les données météorologiques locales intégrées au modèle de simulation. L'évaluation des performances du système permet de mettre en évidence les facteurs déterminants qui conditionnent son efficacité énergétique. Une attention particulière est portée à l'identification des leviers techniques susceptibles d'optimiser cette solution énergétique dans le cadre d'une application locale durable.

### IV.1. Données météorologiques

#### Analyse des conditions climatiques locales – Cas de la wilaya d'Aïn Témouchent

Suite à l'identification de la localisation géographique de la wilaya d'Aïn Témouchent, des données climatiques horaires ont été analysées, incluant la vitesse du vent, l'irradiation globale ainsi que la température ambiante. Ces paramètres sont essentiels pour évaluer le potentiel énergétique local, en particulier dans le cadre de la planification et de l'optimisation de systèmes à énergies renouvelables.

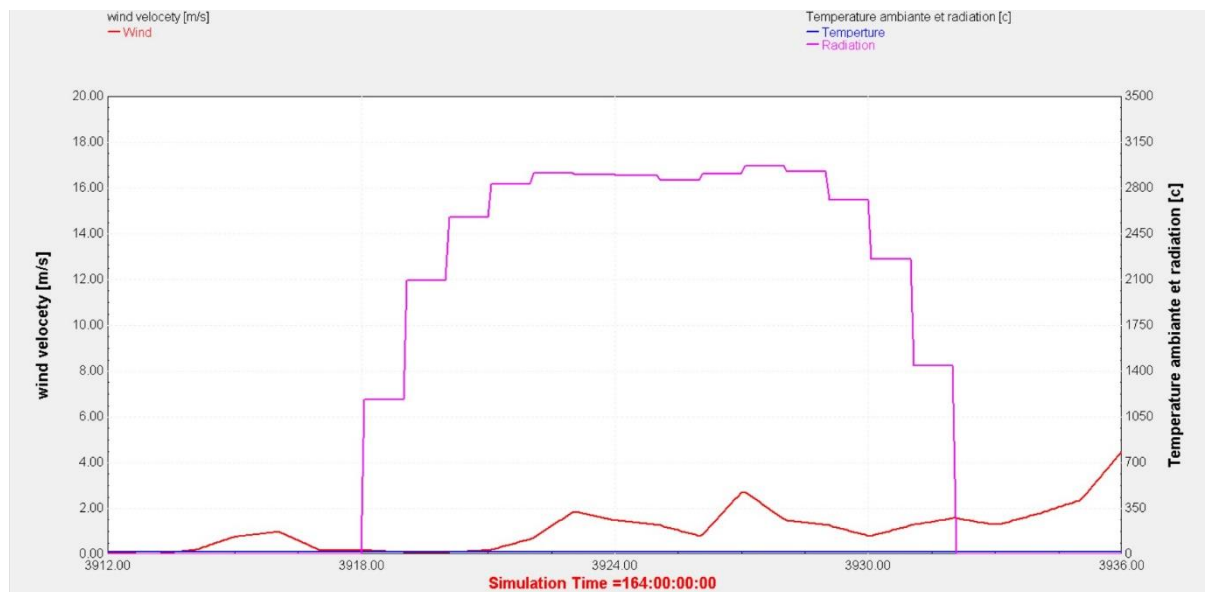
Illustre les profils journaliers représentatifs de deux périodes saisonnières clés : sur deux jours de **14 Décembre (hiver)** et **14 Juin (été)**, mettant en évidence les fluctuations de la vitesse du vent, de l'irradiation solaire et de la température.

- **1) Pour le 14 Juin (été)** : L'irradiation diffuse est quasi inexistante (Ce n'est pas vraiment zéro, mais les capteurs peuvent arrondir à 0 kJ/h·m<sup>2</sup>). La vitesse du vent diminue sensiblement, atteignant environ 1,5 m/s, ce qui limite le potentiel éolien pour cette période tandis que la température ambiante s'établit autour de 23 °C, traduisant un ensoleillement direct plus important.
  - En été, l'irradiation diffuse peut être presque nulle en raison de la prédominance de ciels dégagés et d'une faible diffusion atmosphérique, ce qui permet à la majeure partie du rayonnement solaire d'atteindre la surface sous forme de rayonnement direct.
- **2) Pour le 14 Décembre (hiver)** : L'irradiation diffuse mesurée avoisine les 3360 kJ/h·m<sup>2</sup>, La vitesse du vent atteint un pic d'environ 13,5 m/s, ce qui indique un potentiel significatif pour l'exploitation éolienne. Tandis que la température ambiante reste relativement stable autour de 10,85 °C, ce qui reflète les conditions thermiques typiques de cette saison.
  - En hiver, l'irradiation diffuse tend à être plus élevée en raison de la présence fréquente de nuages, de brumes et d'un ensoleillement plus faible, qui favorisent la diffusion du rayonnement solaire dans l'atmosphère avant qu'il n'atteigne la surface.

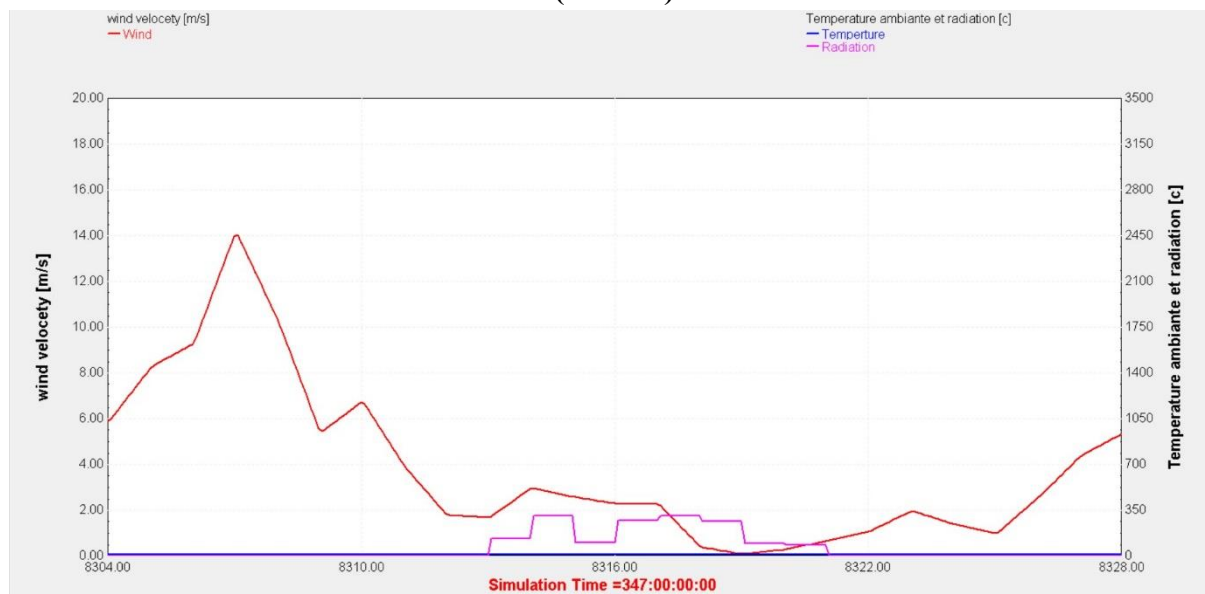
Ces données permettent une compréhension fine des contraintes et opportunités climatiques propres à la région. Elles constituent une base indispensable pour l'adaptation technico-économique des systèmes énergétiques autonomes, qu'ils soient éoliens, solaires ou hybrides, en prenant en compte la variabilité saisonnière et les particularités météorologiques locales.

#### IV.2. Résultats de simulation de panneaux photovoltaïques.

### IV.2.1. Variation de la vitesse de vent, la température ambiante, l'irradiation globale



(14 Juin)



(14-Décembre)

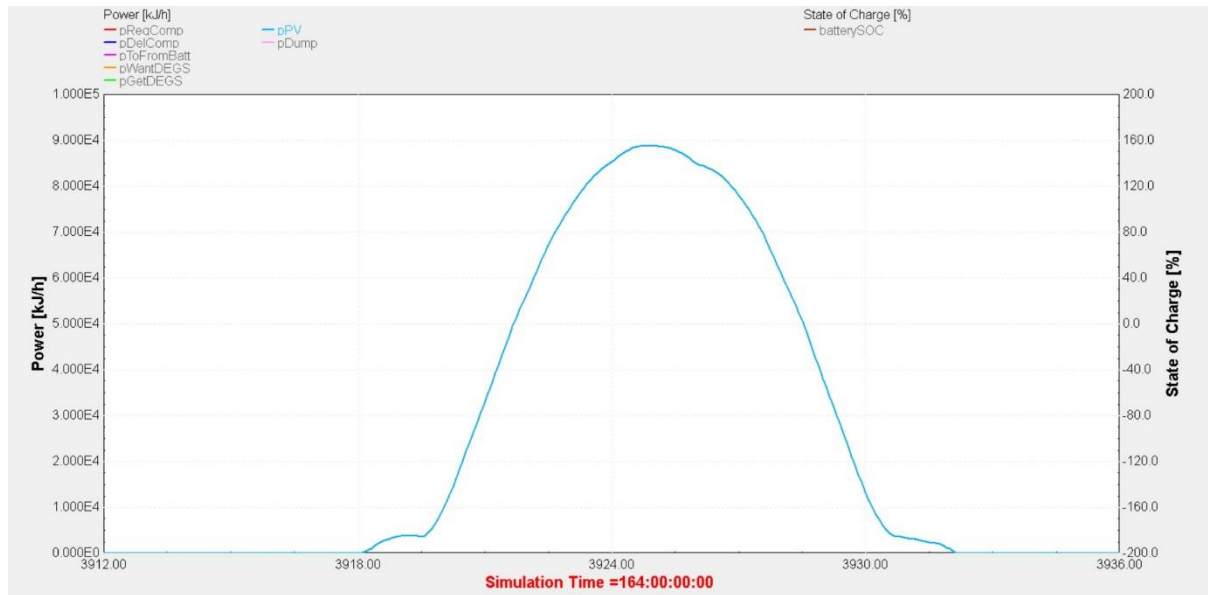
La figure (IV. 1) présente l'irradiation globale et l'évolution de la vitesse de vent, la température ambiante, (14 Décembre) et (14 Juin).

La figure (IV,1) représente la Variation l'évolution de la vitesse de vent, la température ambiante, l'irradiation globale (Décembre, et Juin).

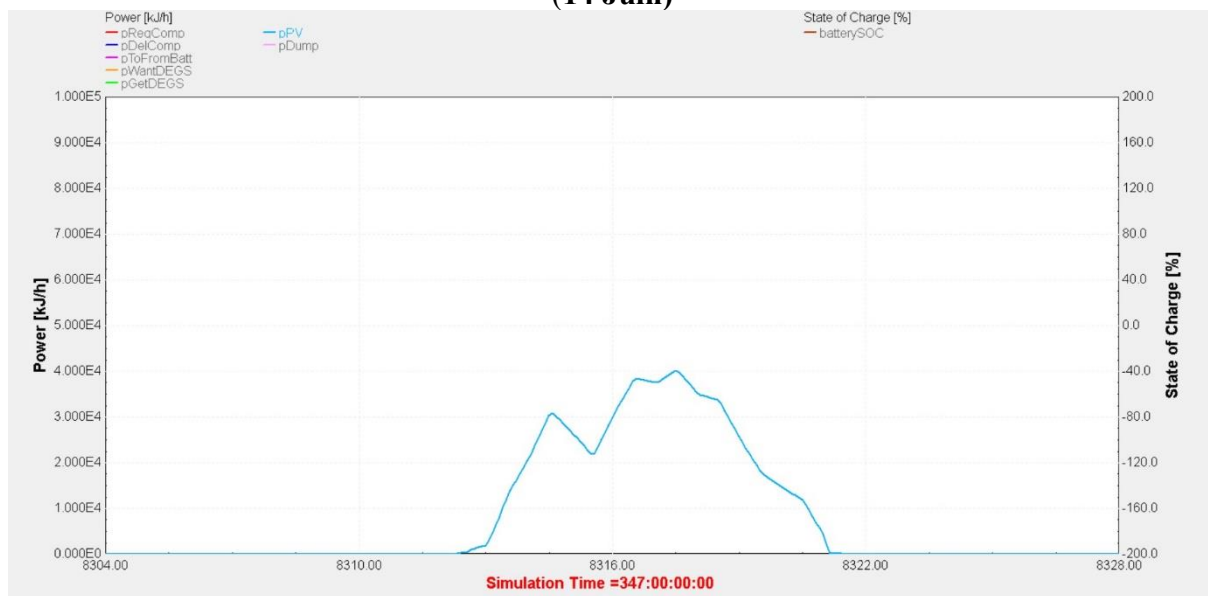
1) Pour le **14 Juin** (été): les températures sont élevées, l'irradiation globale atteint des niveaux maximaux en raison d'un ensoleillement intense et constant, tandis que la vitesse du vent est généralement modérée.

2) Pour le **14 Décembre** (l'hiver) : les températures chutent, l'irradiation globale diminue significativement en raison de la couverture nuageuse plus fréquente, et la vitesse du vent tend à augmenter sous l'effet des perturbations atmosphériques.

### IV.3. La puissance générée par Système panneaux photovoltaïques:



(14 Juin)



(14 Décembre)

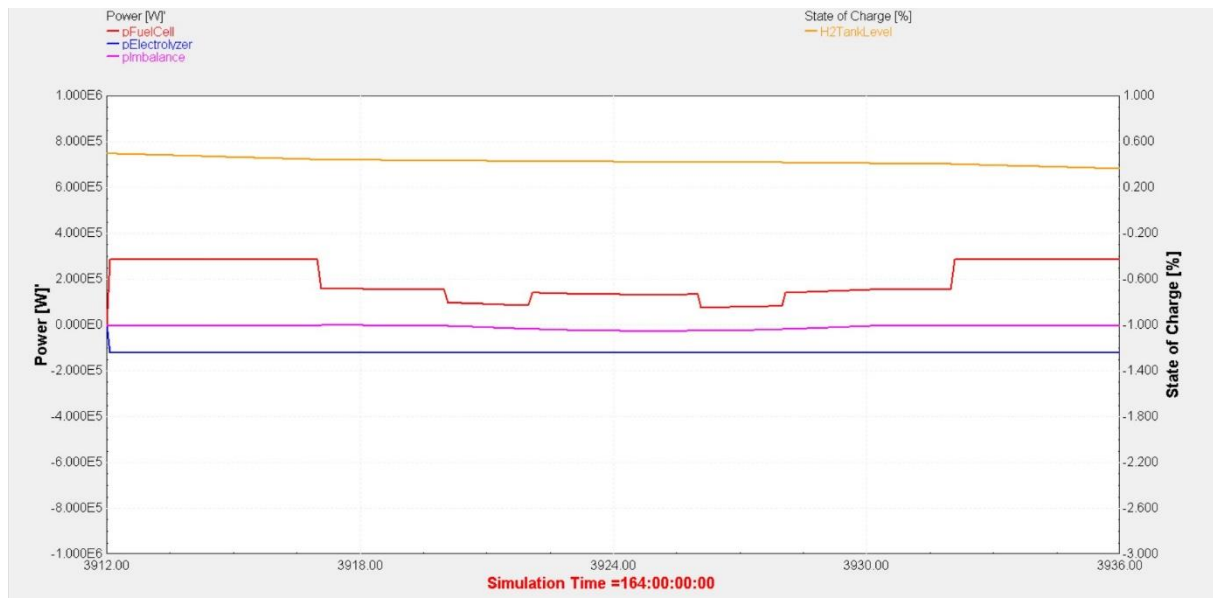
**Figure (IV.2) : Variation de la puissance générée par panneaux photovoltaïques durant (14 Décembre) et (14 Août).**

La figure (IV.2) présente l'évolution de Variation de la puissance générée par panneaux photovoltaïques durant (14 Décembre) et (14 Août).

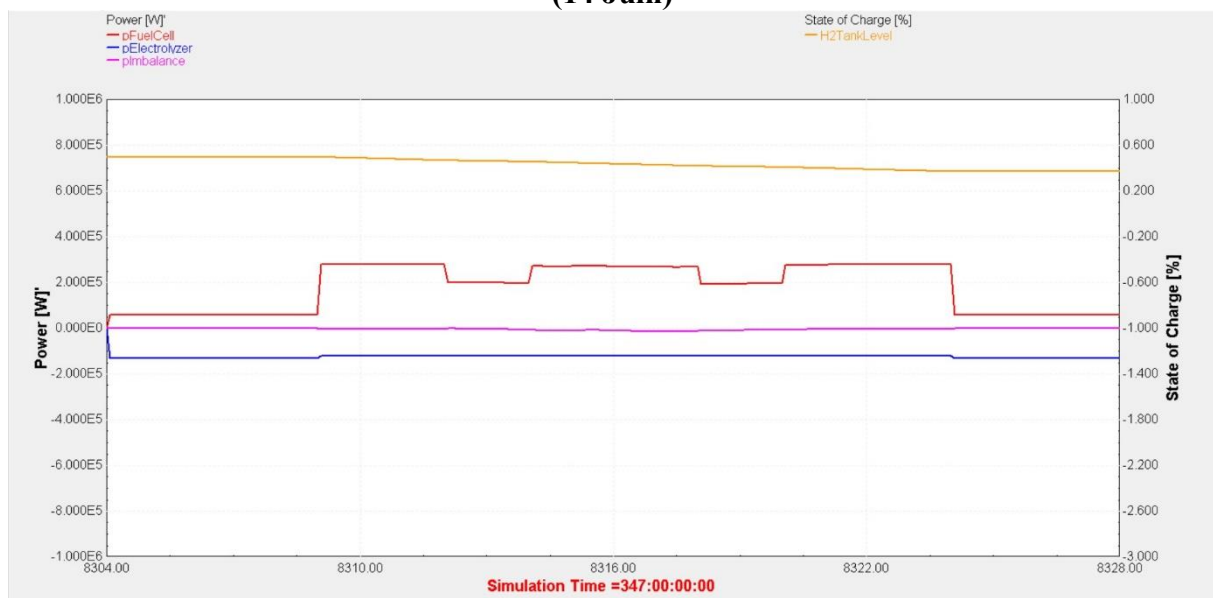
**1) Pour le 14 Juin (été):** La production PV suit une courbe diurne, atteignant un pic à midi en raison de l'irradiation solaire maximale.

**2) Pour le 14 Décembre (l'hiver)** La production PV est nettement inférieure à celle de l'été, avec un pic plus court et moins prononcé, dû à une irradiation solaire plus faible et à des journées plus courtes.

**IV.4. Variation de production de H2 :**



(14 Juin)



(14 Décembre)

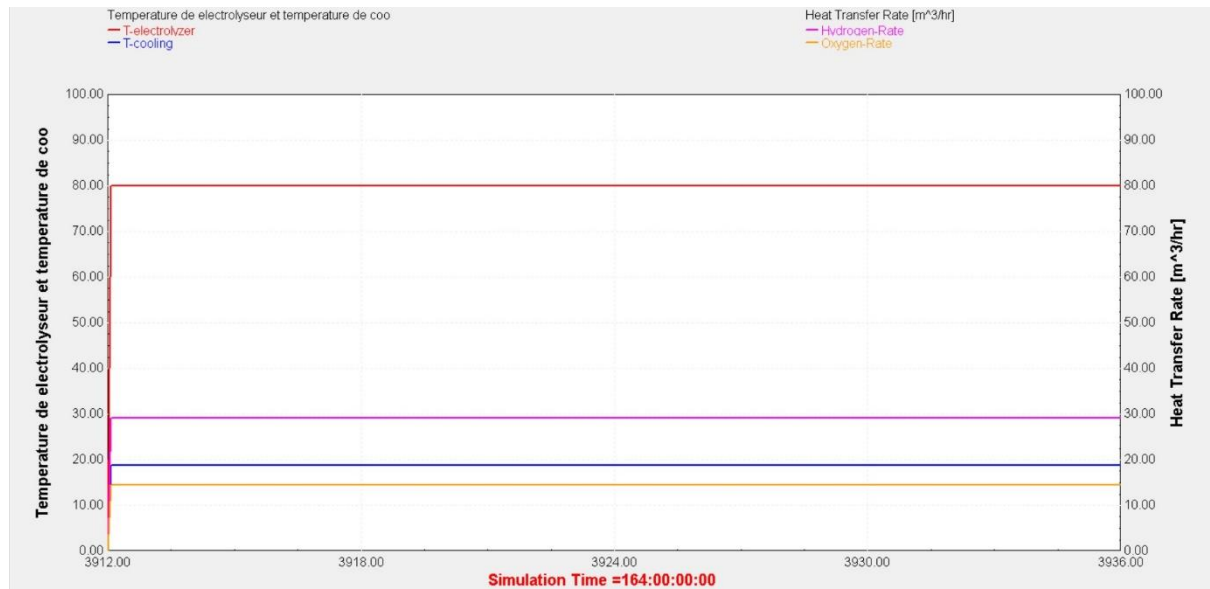
**Figure (IV.3) : Variation de production de H<sub>2</sub> pour (14 Décembre) et de (14 Juin).**

1) Pour **14 Juin** (été) : Les résultats de simulation pour une journée typique d'été montrent un fonctionnement modéré et intermittent de l'électrolyseur, activé par la présence d'un excédent d'énergie photovoltaïque. La pile à combustible reste inactive durant toute la période, ce qui reflète une stratégie axée sur la production d'hydrogène plutôt que sur la restitution immédiate de l'énergie. Le niveau du réservoir d'hydrogène demeure globalement stable, avec de faibles variations, indiquant que le surplus énergétique est suffisant pour maintenir une production sans entraîner une augmentation notable du stockage. Le déséquilibre de puissance fluctue légèrement mais reste globalement négatif, révélant quelques écarts ponctuels entre l'offre et la demande, malgré des conditions solaires favorables.

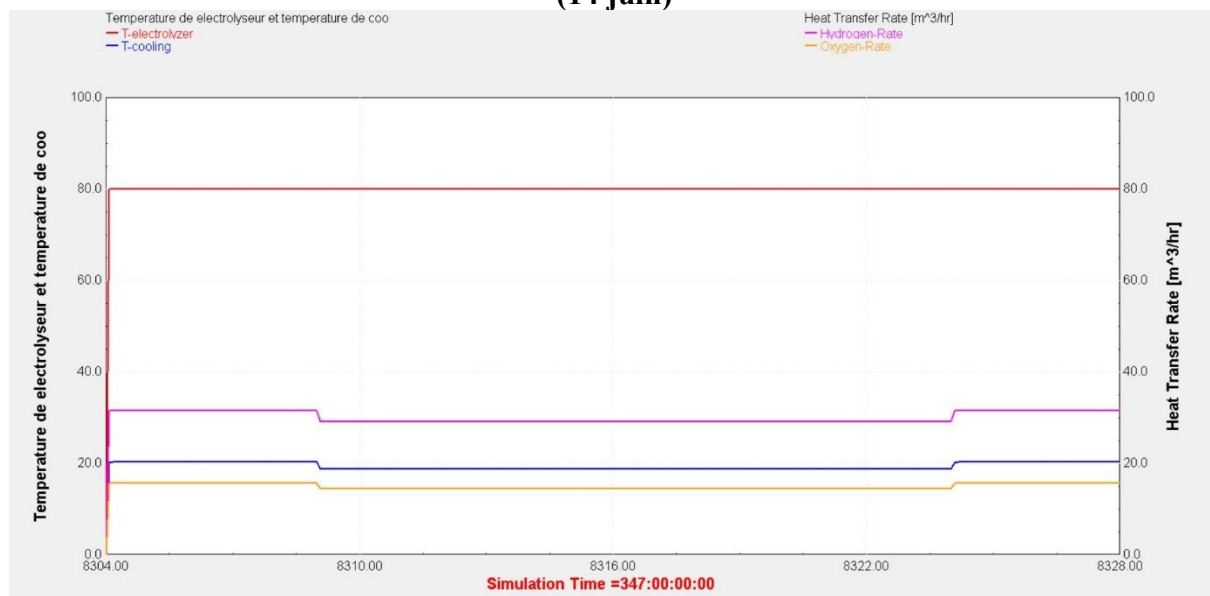
2) Pour le **14 Décembre** (l'hiver) : Lors de la simulation pour une journée d'hiver, l'activité de l'électrolyseur est nettement plus limitée, avec des périodes d'activation plus courtes et moins fréquentes. Cette réduction s'explique par une irradiance solaire plus faible en décembre. La pile à combustible demeure inactive, tandis que le niveau du réservoir d'hydrogène diminue

progressivement, ce qui indique une consommation nette d'hydrogène stocké non compensée par la production. Le déficit énergétique léger mais constant, mis en évidence par le déséquilibre de puissance négatif, souligne la difficulté saisonnière de maintenir l'équilibre énergétique dans les systèmes hybrides autonomes durant les périodes de faible ressource.

#### IV.5. Variation de puissance de l'électrolyseur



(14 juin)



(14 Décembre)

**Figure (IV.4) : Variation de puissance de l'électrolyseur et la chaleur générée et de l'efficacité (globale, énergétique et faraday) durant les jours (14 Juin) et de (14 Décembre).**

La figure (IV, 4) représente Variation de puissance de l'électrolyseur et la chaleur générée et de l'efficacité (globale, énergétique et faraday) durant les jours (14 Juin) et de (14 Décembre).

1) Pour 14 Juin (été) :

a) **Puissance de l'électrolyseur**

La courbe violette montre une puissance constante d'environ 2,8 kW, indiquant un

fonctionnement en régime stationnaire, probablement piloté par un contrôle prioritaire d'énergie excédentaire.

b) **Chaleur générée**

La courbe rouge indique une chaleur constante autour de 1 kW, cohérente avec les pertes thermiques classiques du processus d'électrolyse.

c) **Rendement de Faraday**

Très proche de 1, le rendement de Faraday (courbe verte) traduit une excellente efficacité électrochimique, avec peu de pertes secondaires.

d) **Rendement énergétique**

La courbe cyan présente un rendement d'environ 0,88, témoignant d'une conversion efficace de l'électricité en hydrogène.

e) **Rendement global**

Enfin, le rendement global (courbe jaune) est stable et légèrement inférieur à 1, reflétant la performance globale du système.

- La simulation révèle un fonctionnement stable et efficace de l'électrolyseur durant une journée ensoleillée de juin, avec des rendements élevés (Faraday > 98 %, énergétique  $\approx$  88 %), caractéristiques d'un système PEM bien dimensionné. Une analyse plus approfondie nécessiterait l'étude de plusieurs jours et conditions climatiques variées.

2) Pour le **14 Décembre** (l'hiver) :

a) **Puissance électrique de l'électrolyseur**

Comme en juin, la puissance électrique (courbe violette) reste relativement constante autour de 2,8 kW, bien que l'on observe une légère réduction vers le milieu de la période, probablement en lien avec une baisse temporaire de la production photovoltaïque.

b) **Chaleur générée**

La courbe rouge de la chaleur générée montre une légère chute pendant cette même période, tombant à environ 0,9 kW. Cela reflète une réduction temporaire de l'activité électrochimique, probablement due à une baisse de l'énergie disponible.

c) **Rendement de Faraday**

Le rendement de Faraday (vert) reste très élevé et stable, proche de 1, traduisant une excellente efficacité électrochimique tout au long de la journée, même en hiver.

d) **Rendement énergétique**

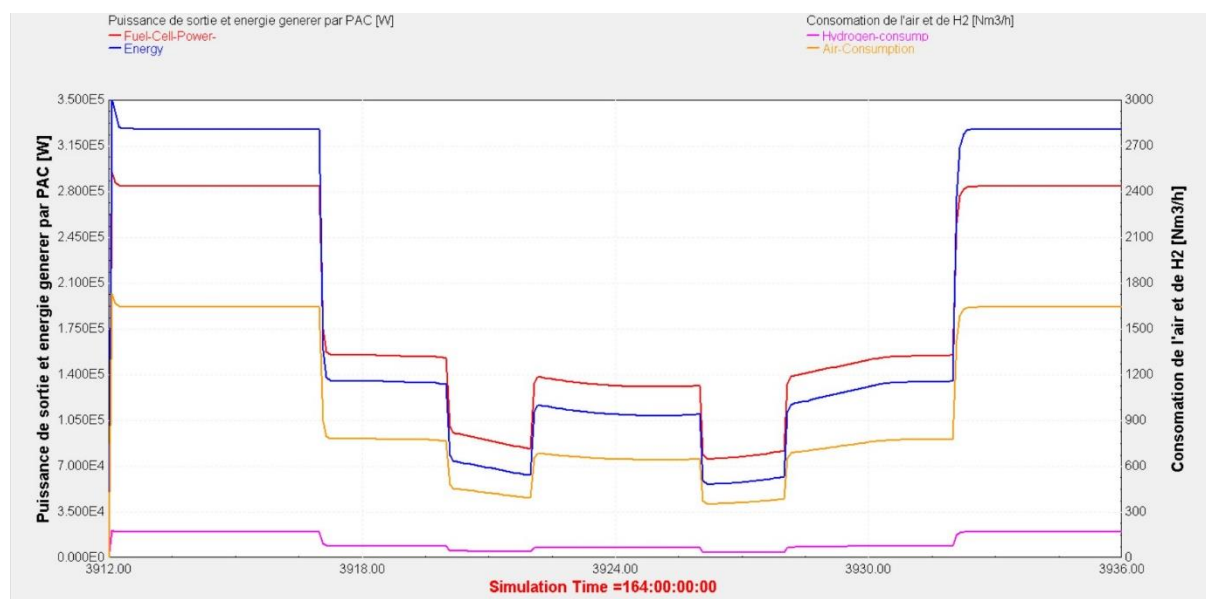
Le rendement énergétique (cyan) diminue légèrement dans la phase centrale, indiquant que l'énergie consommée a été moins efficacement convertie en hydrogène pendant cette période.

e) **Rendement global**

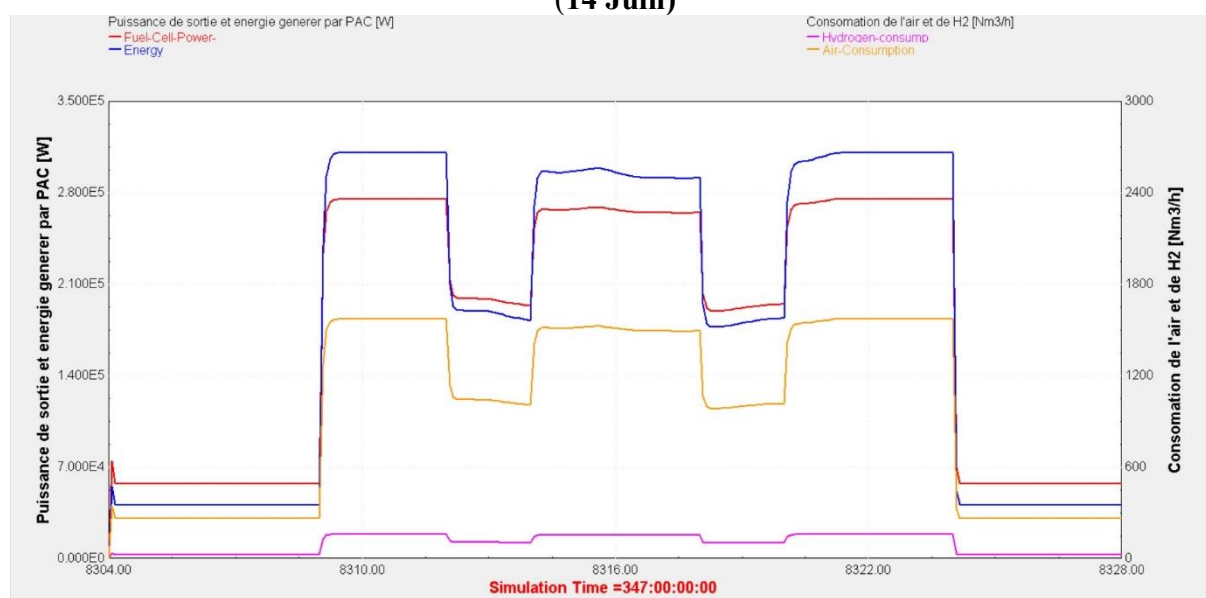
Le rendement global (jaune) reste stable mais suit légèrement la tendance du rendement énergétique, confirmant une performance globale légèrement réduite au moment du creux de puissance.

La simulation de décembre montre une légère baisse de performance due à l'ensoleillement réduit, mais l'électrolyseur reste efficace avec un rendement de Faraday stable.

#### IV.6. Résultats de simulation de La pile à combustible



(14 Juin)



(14 Décembre)

**Figure (IV.5) Variation de la puissance de sortie et l'énergie générée 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 générée par PAC et la consommation d'air et de H2 durant les jours (14 **Décembre**) et de (14 juin).

### 1) Pour 14 **Juin** (été) :

#### 1. Fonctionnement cyclique de la PAC

La puissance de sortie de la PAC (courbe bleue) présente un fonctionnement intermittent en plusieurs phases distinctes. On remarque une pleine puissance ( $\sim 3000$  W) en début et fin de journée, avec des baisses marquées au milieu de la période. Cette variation reflète probablement une réponse à la demande énergétique ou à la disponibilité d'hydrogène.

#### 2. Corrélation avec la consommation d'hydrogène

La courbe rouge (Hydrogène consommation) suit fidèlement les variations de la puissance de la PAC, ce qui est attendu : plus la PAC produit de l'électricité, plus elle consomme

d'hydrogène. Cela confirme une relation directe entre la charge électrique et la consommation de carburant.

### 3. Consommation d'air (orange)

La consommation d'air est également proportionnelle à la puissance générée, mais elle est légèrement moins réactive que la courbe d'hydrogène. Cela peut être dû à un dimensionnement constant du débit d'air pour assurer un excès d'oxygène.

### 4. Production énergétique cumulée

La courbe rose représentant l'énergie (Energy) est stair-step, ce qui reflète une accumulation d'énergie par paliers. Elle n'augmente que lorsque la PAC est active.

### 5. Périodes d'inactivité

Certaines périodes, notamment autour de  $t = 3946$  et  $3952$ , montrent que la PAC est à l'arrêt (courbes proches de zéro). Cela peut indiquer une faible demande ou une interruption de l'alimentation en hydrogène.

## 2) Pour le 14 Décembre (l'hiver) :

### 1. Deux phases de fonctionnement principales

On observe deux plages horaires distinctes où la PAC fonctionne à puissance élevée (vers 8334 et 8346). Ces périodes correspondent probablement à des pics de demande énergétique, peut-être liés à une réduction de la production photovoltaïque en hiver.

### 2. Réponse dynamique de la consommation de réactifs

Les courbes rouge (hydrogène) et orange (air) suivent, comme en juin, la courbe bleue (puissance). Cependant, on note une légère instabilité ou modulation de la puissance pendant les périodes actives, avec des pics et creux qui peuvent refléter une régulation dynamique de la charge.

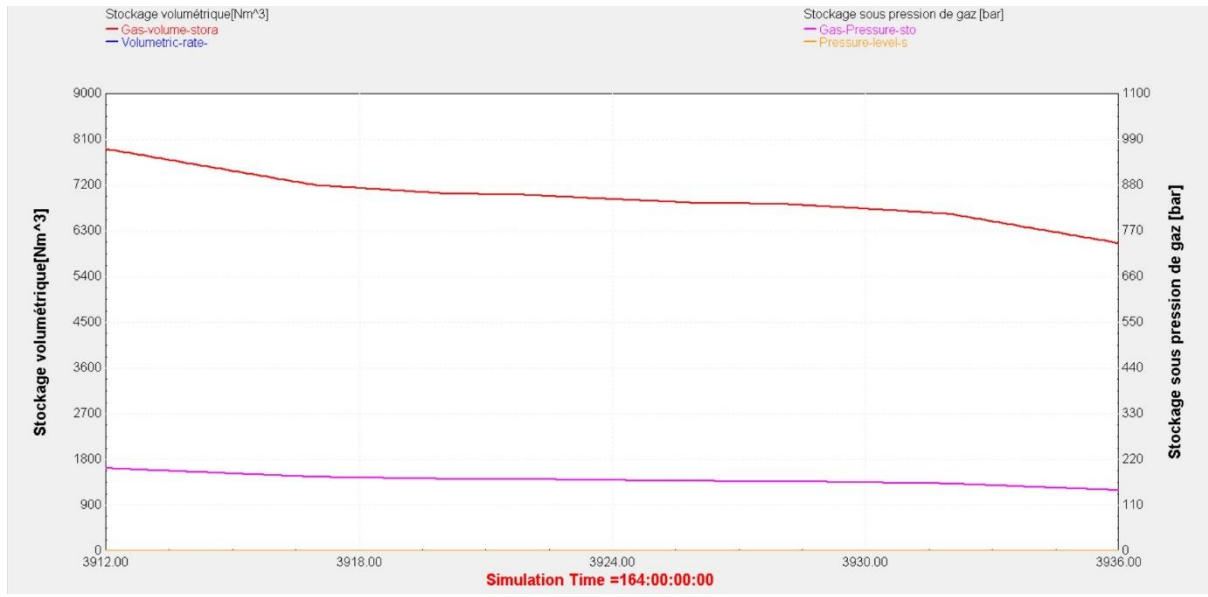
### 3. Énergie cumulée en faible progression

La courbe rose (Energy) indique une progression lente et par paliers, avec une production totale d'énergie probablement inférieure à celle du jeu de juin. Cela peut être attribué à un temps de fonctionnement réduit ou à une puissance moyenne plus basse.

### 4. Périodes d'arrêt prolongées

Entre les deux phases actives, la PAC reste à l'arrêt pendant une durée significative, indiquant une baisse de la demande ou une stratégie de gestion de l'hydrogène pour préserver les stocks ou équilibrer le système.

## IV.7. Résultats de simulation de stockage d'hydrogène :



(14 Juin)



(14 Décembre)

**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 (14 Juin) et de (14-Décembre).**

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 (14 Juin) et de (14 Décembre) dans la ville d’Ain Témouchent, Où nous remarquons.

1) Pour le **14 Juin** (été): Ce graphique illustre l'évolution temporelle de deux types de stockage d'hydrogène :

- **Stockage volumétrique (Nm³)** représenté par la courbe rouge (Gas-volume-stora).
- **Stockage sous pression (bar)** représenté par la courbe rose (Gas-pressure-stora).

➤ **Diminution progressive du volume stocké**

La courbe rouge montre une **baisse régulière** du volume d'hydrogène stocké tout au long de la journée. Cela signifie que l'hydrogène est **progressivement consommé**, probablement par une pile à combustible pour répondre à une demande énergétique.

➤ **Lien entre volume et pression**

La courbe rose, représentant la pression dans le réservoir, suit également une **tendance décroissante**, bien que plus linéaire. Cette relation est cohérente avec le comportement des gaz en réservoir : la pression diminue à mesure que le gaz est consommé, en particulier dans des conditions isothermes ou quasi-isothermes.

➤ **Absence de recharge**

Aucun pic de remontée n'est observé, ce qui indique que **le réservoir n'a pas été rechargé** durant cette période de simulation. L'hydrogène est donc utilisé sans apport nouveau sur l'intervalle de temps représenté.

➤ **Stockage haute pression**

Les valeurs de pression initiales sont relativement élevées (près de 1000 bar), ce qui est typique d'un **stockage sous haute pression** utilisé pour maximiser la densité énergétique sans cryogénie.

2) Pour le **14 Décembre** (l'hiver) : Ce graphique illustre l'évolution de deux paramètres principaux liés au stockage de l'hydrogène :

- Le **volume de gaz stocké** (courbe rouge, en Nm<sup>3</sup>),
- La **pression du gaz** dans le réservoir (courbe rose, en bar).

➤ **Tendance à la baisse du volume stocké**

La courbe rouge montre une **diminution régulière** du volume d'hydrogène au cours de la journée. Cela traduit une **consommation continue** du gaz, très probablement pour alimenter la pile à combustible pendant les heures de faible production renouvelable.

➤ **Stabilité relative, mais décroissance visible de la pression**

La courbe rose indique une **légère baisse de la pression**, en cohérence avec la réduction du volume de gaz. Cela montre que l'hydrogène est soutiré du réservoir sans recharge, entraînant une baisse graduelle de la pression dans un réservoir sous haute pression.

➤ **Comparaison saisonnière implicite**

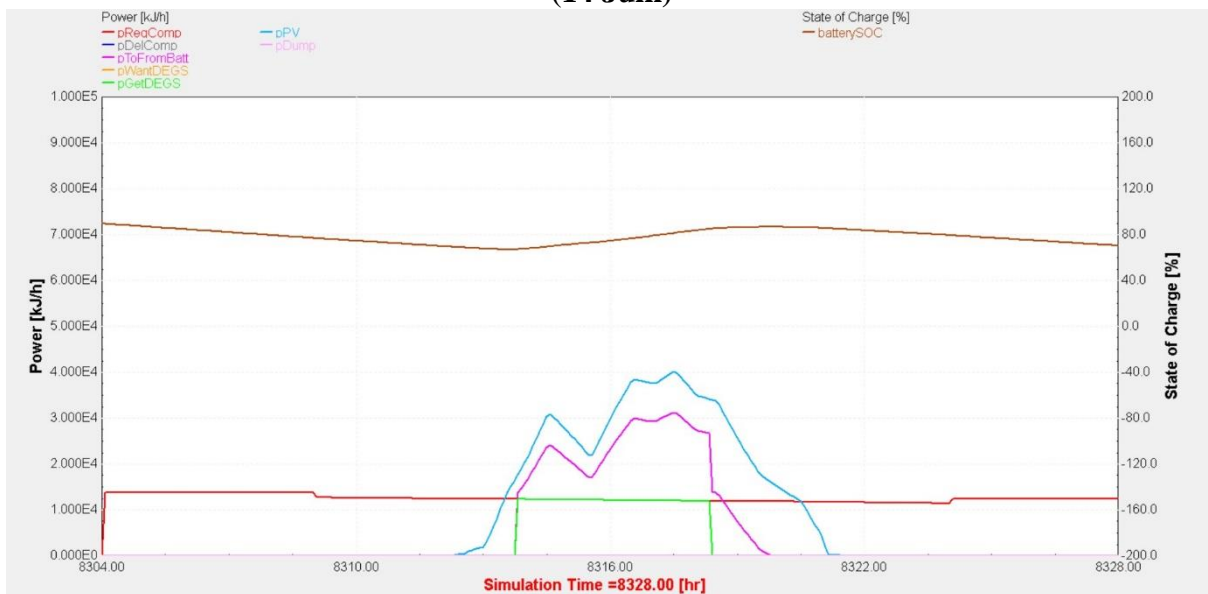
Comparé au stockage observé en juin, la baisse semble **plus modérée**, ce qui pourrait suggérer :

- Une consommation plus faible,
- Un apport d'hydrogène préalable plus important,
- Ou un meilleur équilibre production/consommation à cette date précise de décembre.

## IV.8. Batteries de secours



(14 Juin)



(14 Décembre)

**Figure (IV.6) : Variation de stockage de Batterie de secours durant les jours (14 Juin) et de (14-Décembre).**

1) Pour le 14 Juin (été): L'état de charge de la batterie (batterie de secours, ligne brune) débute à un niveau relativement élevé (~85 %) et reste assez stable, avec une légère diminution en fin de journée. Ce comportement traduit le rôle secondaire attribué à la batterie dans la logique de gestion de l'énergie : elle intervient en fin de journée, lorsque la production PV devient insuffisante et que la pile à combustible n'est pas encore sollicitée.

2) Pour le 14 Décembre (l'hiver) : L'état de charge de la batterie (batterie de secours, courbe brune) débute à un niveau modérément élevé (~84 %) mais décroît lentement au cours de la journée, pour finir aux alentours de 77–78 %. Ce comportement traduit une sollicitation modérée de la batterie en raison de l'insuffisance de la production solaire et, possiblement, de la non-activation de la pile à combustible à ce stade. La batterie joue alors son rôle de secours pour compenser le déficit de production.

- Le système de contrôle priorise probablement la charge hydrogène à long terme (via électrolyseur), tout en réservant la batterie pour les périodes de transition, ce qui correspond bien à une stratégie mixte.

### Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé les résultats de simulation d'un système hybride composé de panneaux photovoltaïques (PV) et d'une filière hydrogène, réalisés pour deux journées représentatives de conditions climatiques contrastées : le **14 juin (été)** et le **14 décembre (hiver)**. Les résultats obtenus sont les suivants :

#### En été, malgré un rayonnement solaire intense, sa constance journalière a permis :

- La production d'environ **980 kWh** sur 24 heures à partir de l'énergie solaire, ce qui a permis d'alimenter l'électrolyseur en énergie électrique de manière continue.
- L'électrolyseur a fonctionné dans des conditions thermiques stables, avec une **température de cellule maintenue autour de 85 °C** et un **circuit de refroidissement entre 15 et 50 °C**, garantissant un bon équilibre thermique. Les débits de production d'hydrogène et d'oxygène ont atteint respectivement **30 à 55 m<sup>3</sup>/h** et **12 à 15 m<sup>3</sup>/h**.
- La consommation électrique de l'électrolyseur variait entre **95 et 290 kW**, produisant également de la chaleur, avec une **puissance thermique générée entre 4,5 et 37 kW**. Les performances obtenues sont :
  - **Efficacité énergétique : 92 %**
  - **Efficacité globale : 89 %**
  - **Efficacité de Faraday : 88 %**
- La pile à combustible a produit entre **35 et 280 kWh**, avec une puissance de sortie variant de **50 à 255 kW**. Les consommations spécifiques étaient comprises entre **21 et 170 m<sup>3</sup>/h** pour l'hydrogène, et entre **1600 et 265 m<sup>3</sup>/h** pour l'air.
- Le **stockage de l'hydrogène** a atteint un volume d'environ **8000 m<sup>3</sup>**, avec une **pression oscillant entre 200 et 175 bars**, suivant les phases de charge et de décharge.

Globalement, la production d'hydrogène s'est révélée plus stable et soutenue en **été**, en raison d'un ensoleillement modéré mais régulier. L'électrolyseur a pu fonctionner de manière efficace, atteignant une puissance de près de **300 kW**. La pile à combustible a assuré la conversion de l'hydrogène stocké en électricité pendant les périodes nocturnes ou en cas de forte demande, assurant la stabilité énergétique du système.

#### En hiver, malgré une irradiation solaire plus faible:

- La production photovoltaïque a **hiver** plus abondante mais marquée par une plus grande variabilité liée à des épisodes intermittents d'ensoleillement, ce qui a affecté la régularité du fonctionnement de l'électrolyseur.
- L'électrolyseur a maintenu une **température de cellule de 80 °C**, avec un circuit de refroidissement compris entre **15 et 25 °C**. Les débits de production ont **hiver** estimés entre **20 et 70 m<sup>3</sup>/h** pour l'hydrogène et **15 à 35 m<sup>3</sup>/h** pour l'oxygène.
- La consommation électrique variait entre **60 et 150 kW**, générant également une puissance thermique d'environ **3 kW** pour l'électrolyseur et **25 kW** pour le circuit de récupération.
- Les efficacités observées dans ces conditions sont :
  - **Efficacité énergétique : 93 %**
  - **Efficacité globale : 90 %**
  - **Efficacité de Faraday : 94 %**
- La pile à combustible a produit entre **40 et 175 kWh**, avec une puissance de sortie de **50 à 250 kW**. Les consommations spécifiques étaient de **60 à 90 m<sup>3</sup>/h** pour l'hydrogène et de **600 à 900 m<sup>3</sup>/h** pour l'air.

- Le **stockage d'hydrogène** a atteint un volume d'environ **7500 m<sup>3</sup>**, avec une **pression variante entre 175 et 200 bars**, selon les cycles de charge/décharge.

Ces résultats confirment la validité du dimensionnement du système. L'hybridation entre le solaire photovoltaïque et l'hydrogène offre une solution fiable et performante. Le **rayonnement solaire** constitue l'élément central du bon fonctionnement du système, en fournissant l'énergie nécessaire à la chaîne de production et de conversion.

En conclusion, cette étude a démontré que le système hybride PV–hydrogène est capable d'assurer une autonomie énergétique satisfaisante, sous réserve d'une **adaptation des capacités de stockage et des puissances installées** en fonction des **variations saisonnières**. L'intégration de stratégies avancées de gestion énergétique et de prévision météorologique représenterait un levier majeur pour optimiser la performance et renforcer la résilience du système face aux fluctuations climatiques.



---

***CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES***

---



## Conclusion générale

---

### *Conclusion générale :*

L'énergie solaire constitue aujourd'hui l'une des sources renouvelables les plus exploitées à l'échelle mondiale, en raison de son abondance, de sa disponibilité locale, et de son potentiel à long terme. Elle joue un rôle stratégique dans les systèmes énergétiques durables, notamment pour la production d'hydrogène vert par électrolyse.

Le présent travail a porté sur la modélisation et la simulation d'un système hybride combinant une installation photovoltaïque pour la conversion de l'énergie solaire, un électrolyseur pour la production d'hydrogène, une pile à combustible pour sa reconversion en électricité, un système de stockage d'hydrogène sous pression, ainsi qu'une batterie de secours destinée à assurer la continuité de l'alimentation en cas de déficit temporaire d'énergie. Ce système vise à satisfaire, à tout instant, la demande énergétique d'un site isolé, en garantissant autonomie, fiabilité et stabilité de l'approvisionnement.

En conclusion, cette étude démontre la viabilité technique d'un mini-réseau autonome hybride solaire-hydrogène avec batterie de secours pour les zones isolées. Les résultats obtenus sont prometteurs et suggèrent plusieurs perspectives de recherche et développement :

- **L'optimisation technico-économique** du dimensionnement des composants,
- **L'intégration d'autres sources renouvelables** ou complémentaires (ex. : solaire thermique, micro-éolien),
- **Le déploiement de stratégies de gestion intelligente** (smart grid, prévision de charge, pilotage adaptatif) pour maximiser l'efficacité, la sécurité et la rentabilité du système.

## Bibliographie

---

### Bibliographie:

- [1] (Microgrids: Architectures and Control, Nikolaos Hatziargyriou, pages 1-30)
- [2] Smith, J. (2021). "Renewable Energy Solutions for Rural Electrification." *Energy Reports*, 7, 456-472.
- [3] Microgrid Design and Operation: Toward Smart Energy in Cities, Hossam A. Gabbar, pages 95-120, 185-210
- [4] Perez, M. (2019). "Photovoltaic Integration in Microgrids: Challenges and Solutions." *Renewable Energy*, 134, 1259-1271.
- [5] Le Duigou, (2020). "The GRHYD Project: Hydrogen Integration in Residential Energy Systems." *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(12), 6543-6557.
- [6] Wang, (2022). "Economic Analysis of Hydrogen and Battery Storage in Microgrids." *Applied Energy*, 305, 117823.
- [7] TRNSYS « 01-GettingStarted ».
- [8] Zhou,(2023). "Comparative Study of HOMER and MATLAB for Microgrid Simulation." *Journal of Energy Systems*, 9(2), 87-102.
- [9] Kim,(2021). "Hybrid Renewable Energy Systems: A Path to Carbon Reduction." *Energy & Environmental Science*, 14(6), 3321-3338.
- [10] <https://lmops.univ-lorraine.fr/axe-systemes/activites-de-recherche/integration-des-energies-renouvelables-dans-les-micro-reseaux/>
- [11] <https://jesit.springeropen.com/articles/10.1186/s43067-024-00186-6>
- [12] <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=536277>
- [13] <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/aesr.202400088>
- [14] <https://digitalcommons.usf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=9858&context=etd>
- [15] Khare,V.,Nema,S.,&Baredar,P.(2016). Solar–wind hybrid renewable energy system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.223>
- [16] Benkassis, A. (2024). Étude et modélisation d'un panneau photovoltaïque. Université de Guelma. [Lien PDFspace University of Guelma+1University of Blida+1](#)
- [17] Connaissance des Énergies. (2024). Pile à combustible : définition, fonctionnement et applications. [Lien Connaissance des Énergies+1Energie Plus Le Site+1](#)

## Bibliographie

---

- [18]SB Fluid Experts. (2024). La production d'hydrogène par électrolyse : une clé pour l'avenir énergétique. [Lienksb-fluidexperts.fr](http://Lienksb-fluidexperts.fr)
- [19]Enapter. Système hybride de stockage d'énergie à l'hydrogène. [LienEnapter](http://LienEnapter)
- [20]<https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-du-vivant/photosynthese-artificielle-transformer-le-soleil-en-carburants>
- [21]<https://hvoexpert.co.uk/other-renewable-fuels/e-fuels/>
- [22][https://www.researchgate.net/publication/341877666\\_Comparison\\_of\\_energy\\_simulation\\_applications\\_used\\_in\\_green\\_building](https://www.researchgate.net/publication/341877666_Comparison_of_energy_simulation_applications_used_in_green_building)
- [23]<https://www.mrsolar.com/what-is-a-solar-panel/>
- [24]<https://greenminigrid.afdb.org/fr/search/content>
- [25][https://fr.wikipedia.org/wiki/Pile\\_%C3%A0\\_combustible#Principe\\_de\\_fonctionnement](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pile_%C3%A0_combustible#Principe_de_fonctionnement)
- [26][https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/azzoui\\_boubaker/files/chapitre-2-exemples-de-systemes-hybrides-energies-renouvelables.pdf](https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/azzoui_boubaker/files/chapitre-2-exemples-de-systemes-hybrides-energies-renouvelables.pdf)
- [27][https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/16539/1/F1\\_7\\_BENKASSIS\\_AMIRA.pdf&ved=2ahUKEwiFtubsv5aNaxWAKvsDHaxMONEQFnoECBkQAQ&usg=AOvVaw2C7CFHZdsMBDFws2Hgfe0D](https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/16539/1/F1_7_BENKASSIS_AMIRA.pdf&ved=2ahUKEwiFtubsv5aNaxWAKvsDHaxMONEQFnoECBkQAQ&usg=AOvVaw2C7CFHZdsMBDFws2Hgfe0D)
- [28]<https://www.pv-magazine.com/2022/03/29/designs-for-solarstoragehydrogen-systems-in-buildings/>
- [29]<https://dspace.univ-medea.dz/bitstream/123456789/9368/1/MG1092.pdf>
- [30]Les Données météorologiques DZ-ain\_temouchente-hour.tm2.
- [31] M. R. Mostafa et M. D. Walid, « Modélisation et simulation d'un système d'alimentation autonome avec éoliennes moteur diesel ».
- [32] Mr FEROUANI ABDELMADJID. Etude par Simulation et Modélisation Electriques des Cellules Photovoltaïques en Couche Mince à base de Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>(CIGS). Thèse de doctorat.Université de Tlemcen, Algérie, 2016.
- [33] Moussi, A., & Saadi, A. (2002). Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque. LARHYSS Journal, 158