

**République Algérienne Démocratique Et Populaire Ministère  
De L'enseignement Supérieur Et De la Recherche Scientifique  
Université Saad Dahlab Blida-01**

**Faculté de Technologie  
Département d'électronique**



**Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master**

**Filière : Électronique**

**Spécialité : Instrumentation**

**Numéro Du PFE : 3**

**Thème :**

---

**Application des méthodes classiques pour la prédiction de l'irradiation  
solaire globale GHI sous climat Algérien**

---

**Présenté par : -HAMID SIDI YKHLEF Abdeladhim**

**-MESGOU Hamza**

**Soutenu le 14/06/2025 devant le jury composé par :**

**Pr. A. GUESSOUME  
Dr. H. KAHLANE  
Dr. T. NACER  
Dr. M. ZEROUALI**

**USDB  
USDB  
ENSH  
CRTI**

**Président  
Examineur  
Promoteur  
CO- Promoteur**

**2024/2025**

## **REMERCIEMENTS**

Tous d'abord nous remercions Allah qui nous a donné la volonté et la capacité de terminer ce travail.

Nous voulons remercier notre promoteur Dr. NACER Tarek enseignant à l'école nationale supérieure d'hydraulique ENSH-Blida et notre Co-promoteur Dr ZEROULI Mohamed pour leurs conseils, encouragements et leurs orientations qu'ils nous ont prodigués tout au long de cette période en tant qu'étudiants. Nous sommes extrêmement chanceux d'avoir des encadreurs qui se souciaient tellement de notre travail et qui répondent à nos questions et requêtes si rapidement.

Nous tenons également à remercier les membres du jury, le professeur GUESSOUME Abderrezak, et DR. KAHLANE Hamza, qui ont accepté d'examiner notre travail.

Un merci spécial à tous ceux qui nous ont aidés pour terminer ce travail.

## DÉDICAIRES

Tout d'abord, je remercie dieu, notre créateur de m'avoir donné la force, la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail modeste.

Je dédie ce travail à ma mère, source de tendresse et lumières qui guide ma route et me mènent vers le chemin de la réussite. Je lui exprime toute ma gratitude pour ses sacrifices, ses précieux conseils, son soutien indéfectible et sa présence constante dans ma vie.

À mon père, que je remercie infiniment pour ses efforts, ses précieux conseils et sa surveillance tout au long de mon parcours.

À mes chers frères et sœurs, pour leur soutien et leur affection tout au long de ce parcours, À mes meilleurs amis, qui ont été une source de motivation et de réconfort dans les moments difficiles. Enfin, à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire, je leur exprime ma profonde gratitude.

HAMID SIDI YKHLEF Abdeladhim

Je dédie ce projet À mes chers parents, pour leur soutien indéfectible tout au long de ce parcours académique.

À mes amis, pour leur présence et leurs encouragements.

À mes professeurs, pour leur enseignement précieux et leurs conseils avisés.

Ce travail est le fruit de vos efforts combinés, et je vous en suis profondément reconnaissant.

MESGOU Hamza

## LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : Le système photovoltaïque autonomes  
Figure 2 : Système PV raccordé au réseau  
Figure 3 : schéma synthétique de l'effet photovoltaïque  
Figure 4 : les type des cellules photovoltaïque  
Figure 5 : Types des modules photovoltaïques  
Figure 6 : Le schéma de montage de régulateur  
Figure 7 : Le Régulateur PWM  
Figure 8 : L'Étape de charge batterie solaire  
Figure 9 : Régulateur de charge MPPT  
Figure 10 : Courbe de puissance MPPT  
Figure 11 : L'onduleur  
Figure 12 : Le rôle de l'onduleur  
Figure 13 : Les Types des systèmes PV  
Figure 14 : Le système PV raccordé aux réseaux  
Figure 15 : Système PV connecté aux réseaux  
Figure 16 : Le schéma de système PV hors réseau  
Figure 17 : Le schéma de système PV hybride  
Figure 18 : Le rayonnement diffusé  
Figure 19 : Les types de réflexion  
Figure 20 : Les composantes du rayonnement globale  
Figure 21 : Mouvement de la terre autour du soleil  
Figure 22 : Le mouvement de la terre autour d'elle-même  
Figure 23 : Le Trajectoires du Soleil au cours de l'année  
Figure 24 : Le pyrhéliomètre  
Figure 25 : Le pyrhéliomètre avec panneaux d'ombrage  
Figure 26 : L'albédo météré  
Figure 27 : Inclinaison du rayonnement incident et aire de la surface  
Figure 28 : La position du soleil au cours de l'année  
Figure 29 : Puissance solaire reçue au sol en fonction de la latitude  
Figure 30 : Courbe GHI par le modèle de persistance  
Figure 31 : Résidu de prédiction GHI mois de janvier  
Figure 32 : Prédiction GHI mois de janvier  
Figure 33 : Résidu de prédiction GHI mois de Mars  
Figure 34 : Prédiction GHI mois de Mars  
Figure 35 : Résidu de prédiction GHI mois de juin  
Figure 36 : Prédiction GHI mois de juin  
Figure 37 : Résidu de prédiction GHI mois de septembre  
Figure 38 : Prédiction GHI mois de septembre  
Figure 39 : Décomposition STL  
Figure 40 : Courbe d'autocorrélation ACF de GHI  
Figure 41 : Courbe d'autocorrélation partielle PACF de GHI  
Figure 42 : Graphe de GHI avec le graphe de prédiction Auto ARIMA  
Figure 43 : Résidu GHI mois de janvier  
Figure 44 : Prédiction GHI modèle ARIMA mois de janvier  
Figure 45 : Résidu GHI mois de mars  
Figure 46 : Prédiction GHI modèle ARIMA mois de Mars

Figure 47 : Résidu GHI mois de Juin

Figure 48 : Prédiction GHI modèle ARIMA mois de juin

Figure 49 : Résidu GHI mois de septembre

Figure 50 : Prédiction GHI modèle ARIMA mois de septembre

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1 : Le potentiel solaire de l'Algérie

Tableau 2 : Les centrales de production PV en Algérie (jusqu'à 2021)

Tableau 3 : Les type de cellules photovoltaïque

Tableau 4 : Comparaison entre régulateur PWM et MPPT

Tableau 5 : Les Type des convertisseurs DC/DC

Tableau 6 : comparaison les résultats entre les deux modèles de prédiction étudier

## ملخص

ندرس هذه المذكرة النماذج التقليدية للتنبؤ بالإشعاع الشمسي الأفقي (GHI) في الجزائر، وتعتمد على تحسين دقة التنبؤ بهذا العامل المهم و المؤثر في تقدير كمية الطاقة الفوتوفولطية الممكن انتاجها من الحقول الطاقوية. تضمنت الدراسة تحليل قدرات الطاقة الشمسية في الجزائر، ومكونات الأنظمة الكهروضوئية من خلايا شمسية ومنظمات وبطاريات ومحولات. تطرقت هذه الدراسة أيضا لأدوات القياس المستعملة لقياس الإشعاع الشمسي و العوامل المؤثرة عليه. و نظرا لعدم توفر معطيات قياس تجريبية للطاقة الشمسية دقيقة و موثوقة تم الإعتماد على بيانات الأقمار الاصطناعية المتحصل عليها من قاعدة البيانات NSRDB تمت مقارنة نماذج التنبؤ الاحصائية بالإشعاع الشمسي الأفقي (GHI) باستخدام لغة البرمجة بايثون من خلال برنامج تحليل البيانات Spyder. تُظهر النتائج أهمية النماذج الحاسوبية الكلاسيكية البسيطة في توفير تقديرات دقيقة للإشعاع الشمسي الذي يعد حجر الأساس لأي مشروع طاقة شمسية ناجح، إذ تُتيح تقييم الجدوى الاقتصادية واستغلال القدرات المتاحة بأقصى كفاءة.

## RÉSUMÉ

Ce mémoire étudie les modèles classiques de prédiction de l'irradiation globale horizontale (GHI) en Algérie, et vise à améliorer la précision de la prédiction de ce paramètre essentiel et influent dans l'estimation de la production photovoltaïque (PV) des centrales énergétiques. L'étude analyse le potentiel solaire de l'Algérie, les composants du système PV tels que les modules, les convertisseurs d'énergie, les régulateurs et les batteries.

Cette étude a également exploré les instruments utilisés pour mesurer le rayonnement solaire et les facteurs qui l'affectent. En raison du manque des données de mesure expérimentales précises et fiables, nous avons eu recours aux données satellitaires obtenues à partir de la base de données NSRDB.

Une comparaison des modèles de prédiction statistiques du GHI a été réalisée en exploitant le langage Python et ses bibliothèques et en utilisant le logiciel d'analyse des données Spyder.

Les résultats montrent l'importance des modèles classiques relativement simples dans la réalisation de prédictions acceptables du rayonnement solaire, ce paramètre (GHI) est la pierre angulaire de tout projet PV réussi.

## ABSTRACT

This dissertation aims to study the classical models for predicting global horizontal irradiation (GHI) in Algeria, and tries to improve the accuracy of predicting this essential and influential parameter in estimating the photovoltaic (PV) production of power plants. The study analyzes Algeria's solar potential, the PV system components such as modules, energy converters, regulators, and batteries.

This study also explored the instruments used to measure solar radiation and the factors affecting it. Due to the lack of precise and reliable experimental measurement data, we used satellite data obtained from the NSRDB database.

A comparison of statistical prediction models of GHI was conducted using the Python language and libraries, and employing the Spyder data analysis software.

The results show the importance of relatively simple classical models in making acceptable predictions of solar radiation; this parameter (GHI) constitutes the cornerstone of any successful PV project.



## ABRÉVIATION

**ACF** : Autocorrélation Function (fonction d'Autocorrélation)  
**AGM** : Absorbent Glass Mat  
**AIC** : Akaike information Criterion  
**ARIMA** : Auto Regressive integrated Moving Average  
**B.O.O** : Bulide, Own, Operate  
**BIC** : Byaesian information Criterion  
**CdTe** : Tellurure de cadmium  
**CERFE** : Commissariat aux Énergie Renouvelables et à l'Efficacité Énergétique  
**CIGS** : cuivre- indidium-Gallium -Sélénium  
**CIS** : Sélénium de cuivre-indium  
**CPV** : concentrated photovoltaics  
**CSV** : Comma-Separated Values  
**ER** : Energie renouvelable  
**EVA** : Ethylene-Vinyl Acetate  
**GEL** : Gelified Electrolyte battery  
**GHI** : Globale Horizontale Irradiance (irradiation Horizontale Globale)  
**H0** : irradiance hors atmosphère  
**MAE** : Mean Absolute Error (Erreur Absolue Moyenne )  
**MPPT** : Maximum Power Point Tracking  
**NASA** : Nationale Aeronautics and space administration  
**NOAA** : Nationale Oceanic and Atmospheric Administration  
**NREL** : National Renewable Energy Laboratory  
**NSRDB** : National Solar Radiation Database  
**ADF** : augmentation dickey-fuller  
**PACF** : Partial Autocorrelation Function (fonction d'autocorrélation Partial )  
**PV** : Photovoltaïque  
**PWM** : Pulse Width Modulation  
**RMSE** : Root Mean Square Error (Erreur Quadratique Moyenne )  
**STL** : Seasonal and Trend decomposition using Loess  
**TEP** : Tonne Équivalent Pétrole

# SOMMAIRE

## Table des matières

|                                                                                      |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------|
| REMERCIEMENTS .....                                                                  | I    |
| DÉDICACES .....                                                                      | II   |
| LISTE DES FIGURES .....                                                              | IV   |
| LISTE DES TABLEAUX .....                                                             | VI   |
| ملخص .....                                                                           | VII  |
| RÉSUMÉ .....                                                                         | VII  |
| ABSTRACT .....                                                                       | VII  |
| ABRÉVIATION .....                                                                    | VIII |
| SOMMAIRE .....                                                                       | IX   |
| INTRODUCTION GENERALE .....                                                          | 1    |
| Chapitre I : PROGRAMME NATIONAL DE DÉVELOPPEMENT DES ÉNERGIES<br>RENOUOVLABLES ..... | 2    |
| I-1-Introduction .....                                                               | 3    |
| I-2-Aperçu historique des énergies renouvelables .....                               | 3    |
| I-3-Généralité sur les ER.....                                                       | 3    |
| I-4-Les avantages et les inconvénients des énergies renouvelables .....              | 6    |
| I-4-1- Les Avantages .....                                                           | 6    |
| I-4-2- Les inconvénients .....                                                       | 6    |
| I-5-Potentiel photovoltaïque en Algérie.....                                         | 6    |
| I-6-Stratégie énergétique en l'Algérie.....                                          | 7    |
| I-6-1-Les réalisations photovoltaïques en Algérie .....                              | 8    |
| I-6-2-Les principaux projets photovoltaïques en Algérie .....                        | 8    |
| I-7-Le soutien à transition énergétique en Algérie .....                             | 9    |
| I-8-Conclusion .....                                                                 | 11   |
| Chapitre II : LE SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE .....                                        | 12   |
| II-1-Introduction .....                                                              | 13   |
| II-2-Les systèmes photovoltaïques .....                                              | 13   |
| II-3-Principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque .....                    | 14   |
| II-3-1-L'effet photovoltaïque .....                                                  | 14   |
| II-3-2-Les Cellules Solaires photovoltaïques .....                                   | 15   |
| II-3-3-Module photovoltaïque .....                                                   | 16   |
| II-3-4-Régulateur de charge .....                                                    | 16   |
| II-3-5-La batterie solaire .....                                                     | 18   |
| II-3-6-L'onduleur .....                                                              | 19   |

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| II-4-Les types de système photovoltaïque .....             | 20 |
| II-5-La protection du système PV .....                     | 22 |
| II-6-Dimensionnement d'un système photovoltaïque .....     | 23 |
| II-6-1-Calcul de la production énergétique .....           | 23 |
| II-6-2-Les paramètres influençant la production PV .....   | 23 |
| II-7-Rendement : .....                                     | 24 |
| II-8-Conclusion .....                                      | 24 |
| Chapitre III : L'IRRADIATION GLOBALE HOZONTALE (GHI) ..... | 25 |
| III-1-Introduction .....                                   | 26 |
| III-2-Les composantes de l'irradiation solaire .....       | 26 |
| III-2-1-Rayonnement direct : .....                         | 26 |
| III-2-2-Rayonnement diffus : .....                         | 26 |
| III-2-3-Rayonnement réfléchi .....                         | 27 |
| III-2-4-Le rayonnement global : .....                      | 27 |
| III-2-5-L'albédo : .....                                   | 27 |
| III-3-La position du soleil .....                          | 28 |
| III-4-Les angles solaires .....                            | 29 |
| III-4-1-La déclinaison solaire .....                       | 29 |
| III-4-2-Angle horaire du soleil .....                      | 29 |
| III-4-3-Le trajectoire du soleil .....                     | 29 |
| III-5-L'irradiation globale extraterrestre : .....         | 30 |
| III-6-Instruments de mesure du rayonnement solaire .....   | 30 |
| III-6-1-Le pyréliomètre .....                              | 30 |
| III-6-2-Le pyranomètre .....                               | 31 |
| III-6-3-Le Pyréliomètre ombré : .....                      | 31 |
| III-6-4-L'albédo mètre : .....                             | 32 |
| III-7-Les mesures satellitaires .....                      | 32 |
| III-8-Conclusion .....                                     | 33 |
| Chapitre IV : Les modèles de prédiction de GHI .....       | 34 |
| IV-1-Introduction .....                                    | 35 |
| IV-2-Caractéristiques des ressources solaires .....        | 35 |
| IV-2-1-Variabilité temporelle .....                        | 35 |
| IV-2-2-Variation spatiale .....                            | 36 |
| IV-3-Extraction des données .....                          | 37 |
| IV-4-Cas d'étude .....                                     | 38 |
| IV-5-Outils informatiques de développement .....           | 38 |
| IV-6-Les indicateurs de performance .....                  | 38 |

|                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>IV-6-1-Erreur Quadratique Moyenne (RMSE - Root Mean Square Error) :</b> | <b>38</b> |
| <b>IV-6-2- Erreur Absolu moyenne (MAE – Mean Absolute Error) :</b>         | <b>38</b> |
| <b>IV-7-Modèles de prévision de l'irradiation solaire</b>                  | <b>39</b> |
| <b>IV-7-1-Modèle de persistance</b>                                        | <b>39</b> |
| <b>IV-7-2-Implémentation du modèle de persistance</b>                      | <b>39</b> |
| <b>IV-7-3-Interpretation des résultats</b>                                 | <b>45</b> |
| <b>IV-7-4-Modèles de prédiction statistiques des séries temporelles</b>    | <b>46</b> |
| <b>IV-7-5-Implémentation du modèle ARIMA</b>                               | <b>48</b> |
| <b>IV-7-6-Interpretation des résultats</b>                                 | <b>57</b> |
| <b>IV-7-7-Comparaison des deux modèles étudiés</b>                         | <b>58</b> |
| <b>IV-8-Conclusion</b>                                                     | <b>58</b> |
| <b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b>                                                 | <b>60</b> |
| <b>Références</b>                                                          | <b>61</b> |

# INTRODUCTION GENERALE

Les défis environnementaux et économiques actuels ont souligné l'urgence de la transition vers des sources d'énergie renouvelable. Cette transition vers des sources alternatives est désormais considérée comme une décision stratégique essentielle pour garantir à la fois la sécurité énergétique et la durabilité environnementale à long terme.

Lorsqu'il est question des diverses sources d'énergie renouvelable, il convient de noter que l'énergie solaire photovoltaïque se démarque par son abondance et sa capacité à être largement exploitée.

L'Algérie dispose d'un important potentiel solaire grâce à sa position géographique et son climat ensoleillé tout au long de l'année, ce qui ouvre des perspectives significatives pour l'essor de l'énergie solaire. En raison de cette particularité, le pays occupe une place stratégique pour la réalisation de projets visant à encourager l'adoption des énergies propres et efficaces, ce qui favorise la transition vers une économie plus durable et respectueuse de l'environnement.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres. Le premier explore le programme national de développement des énergies renouvelables en Algérie, et évoque les principaux projets PV réalisés ou en cours de réalisation. Le deuxième chapitre propose une analyse détaillée du système photovoltaïque qui comporte une analyse approfondie de ses composants tels que les modules photovoltaïques, les convertisseurs et les systèmes de stockage d'énergie. En plus, une analyse des diverses typologies de systèmes photovoltaïques a été réalisée, permettant de mettre en évidence les spécificités de chacune.

Après l'étude des systèmes PV, il s'est révélé évident que le paramètre principal influençant la production énergétique du système est l'irradiation horizontale globale (GHI) disponible au site de l'installation, cette puissance reçue peut être ensuite optimisée en modifiant l'orientation et l'inclinaison des modules photovoltaïques. Le troisième chapitre traite l'irradiance horizontale globale (GHI) et ses instruments et méthodes de mesure.

Le quatrième et dernier chapitre de notre mémoire de fin d'étude examine les diverses méthodes de prédiction de l'irradiation solaire classiques et statistiques. Une analyse comparative a été réalisée entre le modèle de persistance de base et le modèle ARIMA, qui adopte une approche plus élaborée basée sur les séries temporelles.

Afin de valider nos résultats, un cas d'étude sur la région de Blida a été choisi. Les données météorologiques satellitaires de la base de données nationale américaine du rayonnement solaire (NSRDB) ont été utilisées. Les modèles de prédiction ont été programmés par le langage Python en utilisant l'environnement Spyder de la plateforme Anaconda Navigator.

**Chapitre I : PROGRAMME NATIONAL DE  
DÉVELOPPEMENT DES ÉNERGIES ROUNOUVLABLES**

### **I-1-Introduction**

Face aux problèmes environnementaux et économiques actuels, passer aux énergies renouvelables est essentiel pour protéger nos ressources et diminuer les émissions polluantes. L'énergie solaire, en particulier photovoltaïque, est l'une des solutions prometteuses dans ce domaine en raison de sa disponibilité et de sa diversité d'applications. L'Algérie possède une grande abondance de rayonnement solaire et son potentiel se classe parmi les plus élevés au monde, ce qui en fait un site idéal pour la mise en place des projets dans ce domaine. Dans ce contexte, ce premier chapitre explore les différents projets de production des énergies renouvelables en Algérie et la volonté de la politique nationale de développer ce secteur.

### **I-2-Aperçu historique des énergies renouvelables**

Bien que le terme « énergie renouvelable » soit relativement récent, apparu dans les années 1970, les sources d'énergie qu'il désigne existent depuis pratiquement l'origine de la terre. Leur utilisation par l'homme remonte à plusieurs centaines, voire plusieurs milliers d'années. Par exemple, la biomasse a été exploitée pour le chauffage et le développement de l'industrie métallurgique. L'énergie thermique solaire a été utilisée pour sécher les aliments, les céréales ou le foin. Les sources géothermales ont joué un rôle clé dans l'établissement de nombreuses implantations humaines. L'énergie éolienne a été employée par les civilisations égyptienne pour la propulsion des navires, tandis que l'énergie hydraulique était déjà utilisée en Perse et dans l'empire romain il y a plus de deux millénaires. Ces exemples illustrent l'ancienneté et la diversité des applications des énergies renouvelables à travers l'histoire.

Les réflexions initiées dans les pays développés quelques années avant le premier choc pétrolier ont permis de sensibiliser l'opinion publique aux risques liés à l'augmentation exponentielle de la consommation d'énergies fossiles. Cette tendance pourrait entraîner des pénuries d'approvisionnement et des situations environnementales irréversibles.[1]

### **I-3-Généralité sur les ER**

Les énergies renouvelables représentent un ensemble de méthodes de production d'énergie issues de ressources considérées comme inépuisables à l'échelle humaine. Ces ressources sont soit disponibles en permanence, soit capables de se régénérer à un rythme supérieur à celui de leur consommation. Les énergies renouvelables sont souvent évoquées en opposition aux énergies fossiles, dont les réserves sont limitées et non renouvelables à l'échelle humaine, telles que le charbon, le pétrole ou le gaz naturel. Contrairement à ces dernières, les énergies renouvelables sont générées à partir de sources telles que le rayonnement solaire ou le vent, qui sont considérées comme inépuisables.

Les énergies renouvelables sont également désignées sous les appellations 'énergies vertes' ou 'énergies propres'. Leur exploitation se distingue par un impact environnemental limité, ce qui en fait un élément essentiel dans la transition vers des modes de production énergétique plus durables et respectueux de l'environnement.

### I-3-1-Les Types d'énergies renouvelables

La préservation de l'environnement constitue aujourd'hui un enjeu prioritaire. Par conséquent, de nombreuses initiatives de recherche se sont orientées vers le développement et l'optimisation des énergies renouvelables. On qualifie de renouvelable toute forme d'énergie générée à partir de ressources naturelles dont la disponibilité n'est pas affectée par leur exploitation. Parmi les formes les plus répandues, on retrouve[2] :

#### I-3-1-1-L'énergie solaire

C'est l'énergie transmise par le soleil sous forme de lumière et de chaleur. Considérée comme pratiquement inépuisable. Cette énergie peut être exploitée directement à diverses fins, telles que l'éclairage naturel, le chauffage ou la cuisson (chauffe-eau solaire, four solaire), ainsi que pour la production d'électricité via l'utilisation de panneaux photovoltaïques.[3]

Plusieurs formes d'énergies solaires peuvent être distinguées :

#### Énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'énergie captée et convertie directement en électricité à partir du rayonnement solaire, grâce à l'utilisation de panneaux solaires photovoltaïques. Ce processus repose sur l'effet photovoltaïque, qui est découvert en 1839 par Antoine Becquerel.

#### Énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique désigne l'énergie captée sous forme de chaleur à partir du rayonnement solaire. Elle peut être exploitée de manière passive ou active, parmi ses applications :

**Le chauffage solaire** : utilise les rayons solaires pour chauffer un fluide (l'eau ou l'air) par des capteurs thermiques. Cette chaleur peut être utilisée pour chauffer l'eau sanitaire, chauffer les bâtiments...

**Le four solaire** : utilise un miroir ou des lentilles pour focaliser le rayonnement en un point précis afin d'augmenter sa température. Il peut être utilisé pour cuire des aliments, fondre des matériaux...

#### I-3-1-2-L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable issue de la force du vent. Lorsque les éoliennes sont équipées d'un générateur électrique, elles sont également appelées aérogénérateurs. Plusieurs de ces dispositifs peuvent être regroupés sur un même site pour former un parc éolien. L'énergie éolienne, sous forme d'électricité produite par des aérogénérateurs intégrés aux réseaux électriques interconnectés, représente aujourd'hui la source d'énergie primaire dont la croissance est la plus rapide à l'échelle mondiale. Cette énergie peut être exploitée de deux manières distinctes [4] :

**La conversion de l'énergie mécanique** : Le vent est exploité pour actionner des systèmes de pompage d'eau ou encore pour entraîner la meule d'un moulin.



***La transformation en énergie électrique*** : L'éolienne est connectée à un générateur électrique afin de produire du courant alternatif. Ce système peut être intégré à un réseau électrique ou opérer de manière autonome, en étant complété par un générateur d'appoint, tel qu'un groupe électrogène, ou par un dispositif de stockage d'énergie, comme une batterie.

### **I-3-1-3-Energie hydraulique**

L'énergie hydraulique constitue une source d'énergie renouvelable caractérisée par des émissions extrêmement faibles de gaz à effet de serre. Elle repose sur l'exploitation du mouvement de l'eau, généré par l'action combinée du soleil et de la gravité, à travers divers phénomènes naturels tels que le cycle hydrologique, les marées et les courants marins.

Que ce soit en exploitant les chutes d'eau naturelles (telles que les cascades) ou artificielles (comme les barrages hydroélectriques), en utilisant le débit des cours d'eau ou en captant les courants marins, les centrales hydrauliques génèrent de l'énergie mécanique, laquelle est majoritairement transformée en électricité, communément appelée hydroélectricité.

Dès l'Antiquité, les moulins à eau ont été utilisés pour exploiter cette énergie afin de pomper l'eau, moulinier le grain ou actionner des marteau-pilon. Leurs successeurs modernes, les centrales hydrauliques, perpétuent cette tradition en transformant l'énergie de l'eau en électricité de manière plus sophistiquée et à plus grande échelle[5].

### ***Les types de l'énergie hydraulique***

- **Energie des vagues** : utilise la puissance du mouvement des vagues.
- **Energie marémotrice** : issue du mouvement de l'eau créé par les marées.
- **Energie hydrolienne** : les hydroliennes utilisant les courants sous-marins.
- **Energie thermique des mers** : produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans.
- **Energie osmotique** : la diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'eau douce dans l'eau salée génère de l'énergie.

### **I-3-1-4-Energie géométrique :**

La géothermie, un terme dérivé des mots grecs « géo » (terre) et « thermos » (chaud), consiste à exploiter l'énergie thermique naturellement présente dans le sol, constamment renouvelée par le rayonnement solaire, les précipitations et le vent. Cette énergie peut être utilisée de plusieurs manières : comme le chauffage via des pompes à chaleur, sous forme d'eau chaude pour chauffer directement des habitations ou encore sous forme de vapeur pour produire de l'électricité[6].

### **I-3-1-5-L'énergie biomasse :**

Dans le domaine énergétique, le terme biomasse désigne l'ensemble des matières organiques susceptibles de devenir des sources d'énergie. Ces matières peuvent être exploitées de différentes manières, Directement (comme le bois) ou après un processus de méthanisation produisant du biogaz, ou encore à travers des transformations chimiques aboutissant à la création de biocarburants, elles peuvent également être valorisées par le compostage.

Provenant principalement des forêts et de l'agriculture, la biomasse constitue un potentiel énergétique significatif, offrant ainsi une alternative viable aux énergies fossiles. Dans la majorité des cas, l'énergie issue de la biomasse est considérée comme renouvelable.[7]

### **I-4-Les avantages et les inconvénients des énergies renouvelables**

#### **I-4-1- Les Avantages**

Les énergies renouvelables offrent de nombreux avantages, notamment leur caractère propre, Et leur sécurité et leur disponibilité illimitée, contrairement aux énergies fossiles dont les ressources sont épuisables[8].

**La sûreté :** leur utilisation à grande échelle contribuerait à une stabilité climatique, économique, environnementale et sociale. La sûreté constitue l'un de leurs principaux atouts, car les risques d'accident sont extrêmement faibles par rapport au pétrole et gaz.

**Faible production de déchets :** ces énergies génèrent peu de déchets, et ceux-ci sont souvent recyclables, réduisant ainsi leur impact environnemental.

**Décentralisation :** la décentralisation des énergies renouvelables représente un atout majeur pour le développement territorial et local.

**Ecologie :** ces énergies respectent l'environnement tout au long de leur cycle de vie, que ce soit lors de leur fabrication, et de leur fonctionnement ou de leur démantèlement en fin de vie.

#### **I-4-2- Les inconvénients**

- L'intermittence de la disponibilité des sources des énergies renouvelables dépend fortement des conditions climatiques.
- L'impact visuel sur le paysage est également un enjeu important, notamment lors de la construction de grandes centrales solaires ou de parcs éoliens.
- Les barrages hydroélectriques posent des problèmes majeurs pour les écosystèmes, car ils submergent des vallées entières et perturbent gravement la biodiversité[8].

### **I-5-Potentiel photovoltaïque en Algérie**

Dans le cadre de notre mémoire, nous avons choisi de se limiter à l'étude de l'énergie solaire photovoltaïque parce qu'elle est la forme d'énergie la plus affectée par l'irradiation horizontale globale. Ce choix repose aussi sur le potentiel significatif de cette technologie et ses avancées technologiques récentes qui lui en font un sujet d'étude particulièrement pertinent et prometteur.

#### **I-5-1-Le potentiel solaire en Algérie**

Le potentiel national en énergies renouvelables est principalement axé sur l'énergie solaire, ce qui positionne l'Algérie pour considérer cette ressource comme une opportunité stratégique et un levier essentiel pour son développement économique et social. Cela se traduit notamment par la mise en place d'industries génératrices de richesses et d'emplois, renforçant ainsi la croissance durable du pays.

L'Algérie dispose de l'un des gisements solaires les plus importants au monde. La durée d'ensoleillement sur la quasi-totalité du territoire national excède les 2000 heures et pouvant atteindre jusqu'à 3900 heures annuellement dans les régions des hauts plateaux et Sahara[2].

## Chapitre I : PROGRAMME NATIONAL DE DÉVELOPPEMENT ER

La quantité d'énergie solaire captée annuellement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> s'élève approximativement à 4,6 kW dans le nord du pays, tandis qu'elle dépasse 7,2 kW/m<sup>2</sup> dans les régions de l'extrême sud[9]. L'Algérie occupe une surface de 2 381 741 km<sup>2</sup>, cela lui donne un énorme potentiel en énergie photovoltaïque.

L'état algérien a lancé un programme ambitieux de développement de cette filière à travers le lancement de plusieurs projets[10].

L'Algérie bénéficie du gisement solaire le plus important de l'ensemble du bassin méditerranéen grâce à sa position géographique privilégiée. L'énergie solaire totale reçue sur son territoire est estimée à 169 440 TWh/an, ce qui équivaut à 5 000 fois la consommation annuelle d'électricité du pays.

Le tableau ci-dessous présente la durée moyenne annuelle d'ensoleillement ainsi que l'énergie solaire reçue dans diverses régions du territoire national[11].

**Tableau 1 : Le potentiel solaire de l'Algérie**

| Région                                            | Région côtière | Hauts Plateaux | Sahara |
|---------------------------------------------------|----------------|----------------|--------|
| Superficie (%)                                    | 4              | 10             | 86     |
| Durée moyenne<br>D'ensoleillement<br>(Heures/an)  | 2000           | 2800           | 3900   |
| Energie moyenne<br>Reçue (Kwh/m <sup>2</sup> /an) | 1700           | 1900           | 2650   |

### I -6-Stratégie énergétique en l'Algérie

L'Algérie s'engage dans une transition énergétique durable en mettant en œuvre un programme ambitieux dédié au développement des énergies renouvelables et à l'amélioration de l'efficacité énergétique. Cette initiative gouvernementale repose sur une stratégie claire visant à exploiter les ressources inépuisables, telles que l'énergie solaire photovoltaïque, afin de diversifier le mix énergétique national et de préparer l'avenir énergétique du pays.

En combinant des actions concrètes et une expertise innovante, l'Algérie ouvre la voie à une nouvelle ère énergétique, alignée sur les objectifs de durabilité et de résilience. Le programme actualisé des énergies renouvelables prévoit le déploiement d'une capacité de production d'origine renouvelable atteignant 22 000 MW d'ici 2030, destinée principalement au marché national, tout en conservant l'option d'exportation comme objectif stratégique, sous réserve des conditions favorables du marché.

Parallèlement, le programme actualisé d'efficacité énergétique vise à réaliser, d'ici 2030, des économies d'énergie équivalent à 63 millions de tonnes équivalent pétrole (TEP) à travers l'ensemble des secteurs concernés, notamment le bâtiment, l'éclairage public, les transports et l'industrie. Ces initiatives s'inscrivent dans une démarche globale de transition énergétique et d'optimisation des ressources[12].

## I-6-1-Les réalisations photovoltaïques en Algérie

Le nombre des centrales installées est de 22 (21 PV et 01 Éolien) avec une puissance installée atteignant les 354,3 MW (344,1 MWc PV et 10,2 MWc Éolien). Le tableau ci-dessous représente les centrales de production PV jusqu'à l'année 2021.

**Tableau 2 :** Les centrales de production PV en Algérie (jusqu'à 2021)[13]

| Station               | Wilaya        | Capacité (MWc) | Superficie (ha) |
|-----------------------|---------------|----------------|-----------------|
| Ain El Melh           | M'sila        | 16             | 40              |
| Al-Hujaira            | Ouargla       | 24             | 60              |
| Bayadh                | Bayadh        | 16             | 40              |
| Al-Mughair            | El Oued       | 22,4           | 59              |
| Ain Beida             | OumEl Bouaghi | 21,6           | 54              |
| Ain El Bel            | Djelfa        | 20,8           | 52              |
| Tissemsilt            | Tissemsilt    | 20,8           | 52              |
| Saïda                 | Saïda         | 20             | 50              |
| Naâma                 | Naâma         | 20             | 50              |
| Biskra                | Biskra        | 20             | 50              |
| Touggourt             | Touggourt     | 18,4           | 46              |
| Ain El Melh           | M'sila        | 16             | 44              |
| Tindouf               | Tindouf       | 16             | 40              |
| Mecheria              | Naâma         | 16             | 40              |
| Tiaret                | Tiaret        | 16             | 40              |
| Ghardaïa              | ghardaïa      | 16             | 40              |
| El Oued               | El Oued       | 14,4           | 36              |
| Ouled Djellal         | Biskra        | 8,4            | 20              |
| Abadla                | Béchar        | 7,6            | 18              |
| El Abiodh Sidi Cheikh | Bayadh        | 6,9            | 16              |
| Aïn Sefra             | Naâma         | 6,8            | 16              |

## I-6-2-Les principaux projets photovoltaïques en Algérie

### I-6-2-1- Le Projet SOLAR 1000

Le projet Solar1000 MW constitue la première phase du programme national de transition énergétique en Algérie, qui vise à déployer 15 000 MWc d'énergies renouvelables d'ici 2035.

Cet appel d'offres, destiné aux investisseurs nationaux et internationaux selon le modèle B.O.O (Build, Own, Operate), est réparti en cinq lots couvrant cinq wilayas du sud et des hauts plateaux (Laghouat, Ouargla, Touggourt, El Oued et Bechar). Il permettra aux producteurs d'énergie indépendants de générer plus de 2 600 GWh d'énergie propre et durable par an. Ce projet

Contribuera à économiser 600 millions de m<sup>3</sup> de gaz naturel annuellement et à réduire l'empreinte carbone de l'Algérie d'un million de tonnes de CO<sub>2</sub> par an[11].

### **I-6-2-2-Le projet Tafouk1**

C'est un projet d'envergure visant la construction de centrales solaires photovoltaïques, d'une capacité de production de 4 000 MWc et représentant un investissement pouvant atteindre 3,6 milliards de dollars. Ce projet générera environ 56 000 emplois durant la phase de construction, ainsi que 2 000 postes supplémentaires lors de la phase d'exploitation.

Les centrales solaires photovoltaïques, développées dans le cadre de ce projet, seront implantées dans une dizaine de wilayas et occuperont une superficie totale d'environ 6 400 hectares[14].

### **I-6-2-3-Les initiatives locales et régionales**

C'est des projets d'électrification rurale (villages isolés) qui consistent d'équiper les habitations des zones isolées de kits complets d'énergie solaire photovoltaïque, et de généraliser l'usage de l'énergie solaire pour l'éclairage public « intelligent », notamment pour les réseaux routiers éloignés du réseau électrique[15].

### **I-6-2-4-Les partenariats internationaux**

L'Algérie collabore avec plusieurs pays étrangères dans le domaine de l'énergie photovoltaïque et parmi ces pays on trouve la Chine en haut de la liste.

La société Power Construction Corporation of China (Power China) a entamé la construction d'une centrale solaire PV de 220 MWc dans la wilaya de Biskra. Parallèlement, un consortium chinois comprenant China Electricity and Water Company (CWE), Chinese Nuclear Industries Corporation (HXCC) et Yellow River Company for Consulting Engineering (YREC) a lancé la construction d'un projet de 80 MWc dans la wilaya d'Ouled Djellal, située juste au sud de Biskra. Nous constatons aussi la présence des sociétés espagnoles et turques dans le secteur des énergies renouvelables en Algérie.

Les investissements étrangers occupent une place essentielle dans le développement des projets de transition énergétique en Algérie, favorisant ainsi la réalisation des objectifs stratégiques en matière d'énergies renouvelables[16]. Ces objectifs incluent notamment :

- Le financement de projets solaires à grande échelle.
- Le transfert de technologies et d'expertise.
- La création d'emplois et la stimulation du développement économique.
- La réduction de la dépendance aux énergies fossiles.

## **I-7-Le soutien à transition énergétique en Algérie**

Le Commissariat aux Énergies Renouvelables et à l'Efficacité Énergétique (CEREFÉ) a publié dans son rapport 2020 sur la transition énergétique en Algérie, que le gouvernement a souligné l'importance de cette transition comme priorité du programme présidentiel, mettant en avant le potentiel solaire et territorial de l'Algérie[17].

## **Chapitre I : PROGRAMME NATIONAL DE DÉVELOPPEMENT ER**

Dans cette politique de soutien de l'état algérien au développement du secteur des énergies renouvelables, en particulier l'énergie photovoltaïque, plusieurs initiatives ont été mises en place afin d'accompagner et d'encourager les investisseurs locaux. Ces mesures visent à favoriser l'émergence d'une industrie solaire nationale dynamique et compétitive, tout en renforçant la capacité du pays à diversifier son mix énergétique.

A ce titre, un certain nombre d'investisseurs algériens ont bénéficié d'un appui stratégique leur permettant de participer activement à la réalisation de projets majeurs de production d'énergie solaire, parmi ces acteurs nationaux on trouve :

### **COSIDER**

Le Groupe Sonelgaz et COSIDER Canalisations, filiales du COSIDER Groupe, ont procédé, la réalisation de trois centrales solaires photovoltaïques, d'une capacité totale de 520 MW. La construction de deux centrales solaires à Touggourt, d'une capacité respective de 150 MW et 250 MW, ainsi que d'une centrale à Béchar, d'une capacité de 120 MW. Ces trois projets seront menés en partenariat avec la société Fimer, spécialiste mondial dans la production électrique et la fabrication d'onduleurs pour systèmes photovoltaïques.[18]

### **CONDOR**

Le groupe Condor investit activement dans le développement des énergies renouvelables, notamment à travers la mise en place d'une usine de production de panneaux photovoltaïques. L'usine de Condor, spécialisée dans l'énergie solaire, est dédiée à la fabrication de panneaux photovoltaïques utilisant la technologie du silicium, avec une puissance variante entre 70 W et 280 W (monocristallin et polycristallin). Ces panneaux sont conçus pour des applications industrielles (stations solaires), résidentielles, agricoles (pompage), ainsi que pour l'électrification rurale et l'éclairage public, Condor assurera la conception et le dimensionnement des installations, la fabrication des panneaux solaires, leur installation ainsi que le service après-vente, Condor a également équipé de nombreux agriculteurs situés dans des zones isolées avec des pompes à eau alimentées à l'énergie solaire.

### **MILLTECH**

La société algérienne Milltech, spécialisée dans les télécommunications et les énergies renouvelables, annonce la construction d'une nouvelle usine dédiée à la production de panneaux photovoltaïque. Située dans la zone industrielle de Boukerana à Chelghoum El Aid, dans la province de Mila au nord-est du pays, cette installation aura une capacité de production annuelle de 100 MW. Elle deviendra ainsi la troisième usine de fabrication de panneaux photovoltaïque en Algérie. Milltech prévoit de produire des modules photovoltaïques de 60 et 72 cellules, couvrant l'ensemble des technologies actuellement disponibles sur le marché. Bien que la distribution cible principalement le marché national, l'entreprise ambitionne également d'exporter ses produits à l'international.[17]

Et d'autre société a bénéficié aussi du soutien de l'état comme AMIMER Energie, HAMMADI Eurl, LAGUA Solaire, CLEAN POWER Engineering.

### **I-8-Conclusion**

Nous avons essayé de montrer dans ce chapitre l'importance croissante des énergies renouvelables, surtout l'énergie solaire photovoltaïque, en tant que pilier fondamental de la transition énergétique durable.

L'Algérie dispose d'un énorme potentiel qui la place en position de leader dans le domaine de l'énergie solaire, que ce soit en termes d'intensité du rayonnement solaire ou de vastes superficies disponibles pour la construction de stations photovoltaïques.

La stratégie gouvernementale ambitieuse, tel que le programme SOLAR 1000 et les projets locaux et internationaux, reflète un engagement fort en faveur de la réalisation des objectifs de développement durable et de la réduction de la dépendance aux combustibles fossiles. On peut dire que l'Algérie est au seuil d'une transformation radicale dans le secteur de l'énergie.

Après démonstration du potentiel de l'énergie solaire et l'adoption de la stratégie nationale des systèmes photovoltaïques, le prochain chapitre sera consacré aux systèmes PV et leurs composants.

## **Chapitre II : LE SYSTÈME PHOTOVOLTAIQUE**



### II-1-Introduction

Les systèmes d'énergie solaire photovoltaïque apparaissent comme une solution pour répondre à la demande croissante d'énergie tout en réduisant la dépendance aux sources traditionnelles polluantes. Ce chapitre vise à décrire les composants du système PV afin de faciliter la compréhension du processus de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique d'une façon optimale.

### II-2-Les systèmes photovoltaïques

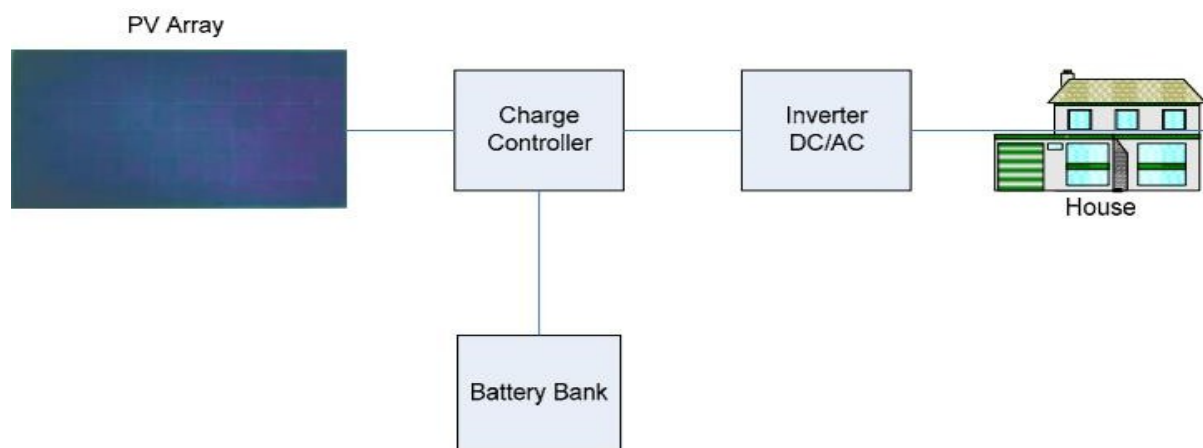
Les systèmes photovoltaïques peuvent être classés en deux grandes catégories principales

#### a) Système PV Autonome

Ce système est généralement utilisé dans les régions isolées, il fonctionne de manière indépendante sans connexion au réseau de distribution électrique. La configuration la plus couramment utilisée est illustrée par la figure 1.

Ce système est le plus complexe, intégrant tous les éléments essentiels pour alimenter des appareils en courant alternatif (AC) dans des applications domestiques ou commerciales standard. Un générateur supplémentaire (par exemple, fonctionnant au diesel ou à l'énergie éolienne) pourrait être envisagé pour renforcer la fiabilité du système (hybridation), bien qu'il ne soit pas indispensable.

Le nombre de composants requis dépend du type de charge à alimenter. L'onduleur peut être supprimé ou remplacé par un convertisseur DC-DC si seules des charges en courant continu (DC) doivent être alimentées. Il est également possible de connecter directement un ensemble de modules PV à une charge DC lorsque des méthodes de stockage alternatives sont employées ou lorsque les contraintes horaires d'utilisation ne sont pas critiques[19].



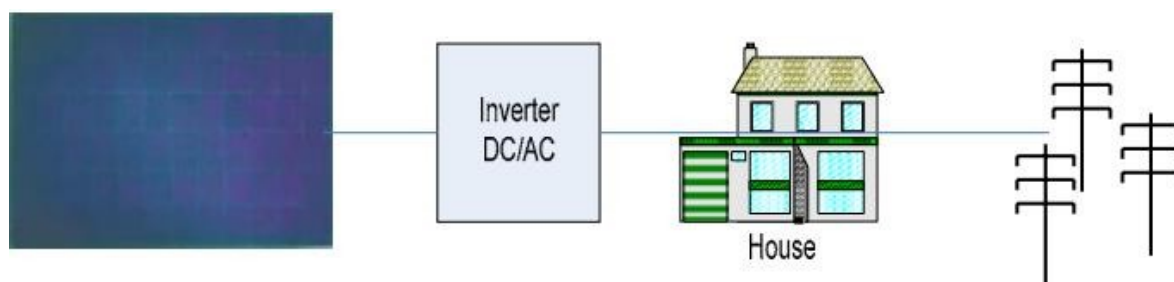
**Figure 1** : Le système photovoltaïque autonomes[20]

#### b) Système PV raccordé au réseau

Ce système est directement connecté au réseau de distribution électrique et ne nécessite pas de dispositif de stockage (batteries). La figure 2 illustre la configuration de base d'un tel système.

L'énergie électrique produite peut être injectée (vendue) ou absorbée (achetée) auprès du réseau électrique local, en fonction des profils de consommation énergétique locale et des variations des ressources solaires au cours de la journée.

Ce mode de fonctionnement requiert l'utilisation d'un onduleur pour convertir le courant continu (DC) généré par les panneaux photovoltaïques en courant alternatif (AC) compatible et synchronisé avec le réseau électrique[21].



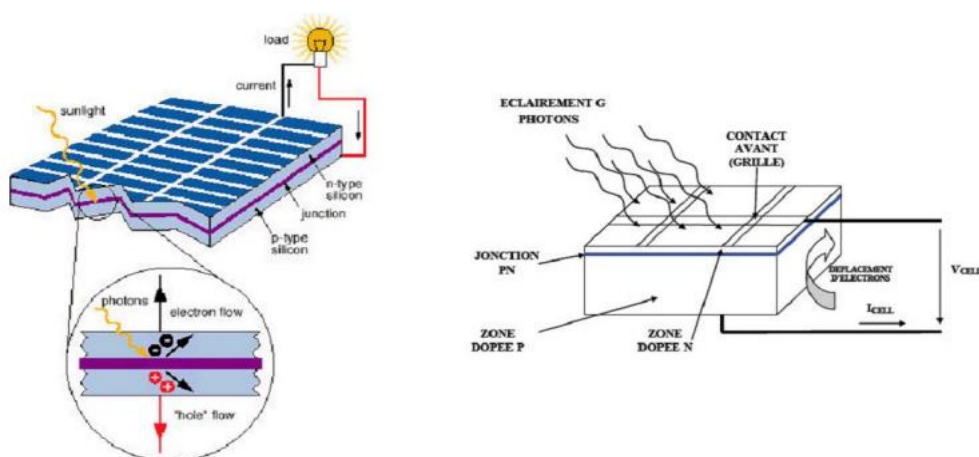
**Figure 2 : Système PV raccordé au réseau[20]**

### II-3-Principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque

#### II-3-1-L'effet photovoltaïque

Sous l'effet du rayonnement solaire, les paires électron-trou générées au niveau de la jonction de la cellule sont séparées par le champ électrique présent dans cette zone. Les trous, porteurs de charge positive, sont accélérés vers la région dopée P, tandis que les électrons, porteurs de charge négative, se dirigent vers la région dopée N. Les trous et les électrons deviennent alors majoritaires sur les surfaces extérieures des zones P et N respectivement. Il en résulte l'apparition d'une tension électrique entre les deux côtés du dispositif, qui se transforme ainsi en un générateur électrique.

La collecte du courant est assurée par des contacts métalliques (électrodes). Si ces électrodes sont connectées à un circuit externe, un courant continu circule[22].

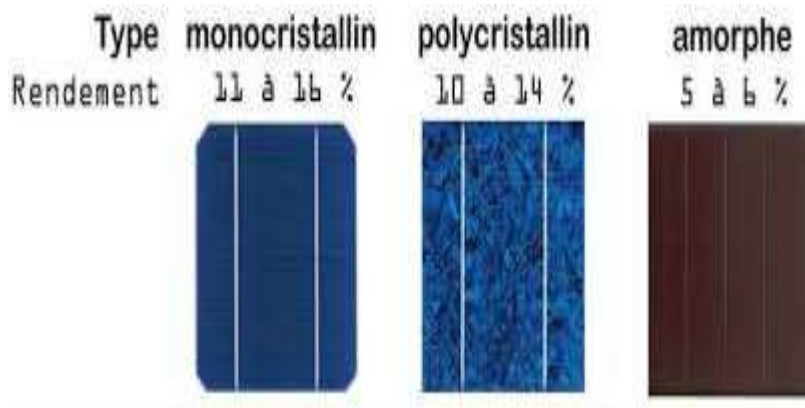


**Figure 3 : schéma synthétique de l'effet photovoltaïque[23]**

### II-3-2-Les Cellules Solaires photovoltaïques

Elles convertissent directement l'énergie lumineuse (photons) en électricité grâce à l'interaction de la lumière solaire avec des matériaux semi-conducteurs intégrés dans les cellules.

Une cellule photovoltaïque en silicium cristallin mesure généralement 12 centimètres de diamètre et 0,25 millimètre d'épaisseur. En plein ensoleillement, elle peut générer un courant continu de 4 ampères à 0,5 volt, soit une puissance électrique de 2 watts. Il existe principalement deux types de technologies photovoltaïques : les cellules cristallines et les cellules à couche mince. Dans la technologie à couche mince, une couche ultra-mince de matériau photovoltaïque est déposée sur un substrat. Le matériau le plus couramment utilisé pour les cellules à couche mince est le silicium amorphe, mais d'autres matériaux tels que le diséléniure de cuivre-indium/gallium (CIGS), le séléniure de cuivre-indium (CIS), le tellure de cadmium (CdTe), les cellules sensibilisées par colorant et les cellules solaires organiques sont également envisageables[19].



**Figure 4 : les type des cellules photovoltaïque[24]**

**Tableau 3 : Les type de celles photovoltaïque**

| Type de cellule            | Rendement | Avantages                                                                     | Inconvénients                                                       |
|----------------------------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Monocristalline (mono-SI)  | ≈ 20%     | Taux de rendement élevé, optimisé par un usage commercial, haute valeur a Vie | Cher                                                                |
| Polycristallins (P-SI)     | ≈ 15%     | Prix inferieur                                                                | Sensible au Température élevées, duré de vie inferieur,             |
| Silicium amorphe (A-SI)    | ≈7-10%    | Couts relativement bas, Faciles a produit, flexible                           | Garanties et duré de Vie plus courtes                               |
| Cellule PV concentré (CPV) | ≈41%      | Rendement très élevées                                                        | Un suiveur solaire et un système de refroidissement sont Nécessaire |

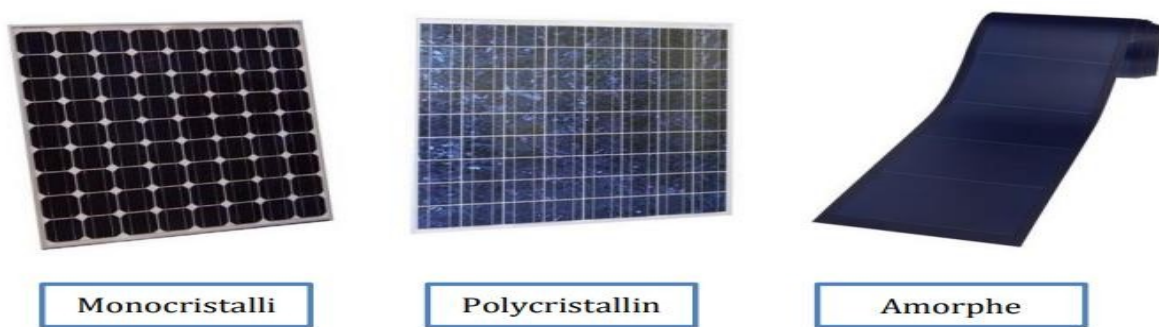
### II-3-3-Module photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques (PV) constituent les éléments de base des modules PV. Dans la plupart des applications, la tension générée par une seule cellule est insuffisante. Ainsi, les cellules sont connectées en série pour augmenter la tension. Plusieurs de ces chaînes de cellules peuvent ensuite être connectées en parallèle afin d'accroître le courant. Ces cellules interconnectées, ainsi que leurs connexions électriques, sont encapsulées entre une couche supérieure en verre ou en plastique transparent et une couche inférieure en plastique ou en matériau composite métallique.

Un cadre externe (frame) est utilisé pour renforcer la structure mécanique du module et faciliter son installation. Cet ensemble est appelé module ou panneau photovoltaïque.

Le courant produit est directement proportionnel à la taille des cellules, à son rendement de conversion et à l'intensité lumineuse reçue. Le tableau 3 illustre le rendement ainsi que les avantages et inconvénients de chaque type de modules PV. De même, la figure 5 donne un aperçu de l'aspect visuel de chaque type de module.

Par exemple, des cellules photovoltaïques connectées en série par 36 sont assemblées dans des modules standards offrant une tension nominale de 12 volts[25].



**Figure 5 :** Types des modules photovoltaïques[26]

### II-3-4-Régulateur de charge

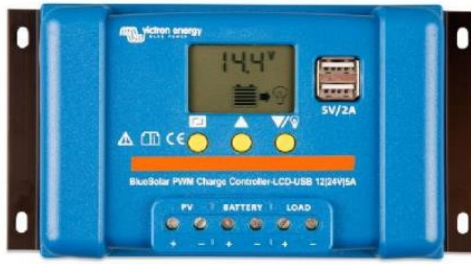
Le contrôleur de charge joue un rôle crucial dans la qualité et la durabilité du système, notamment grâce à ses fonctions de protection de la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. De plus, le régulateur de charge est utilisé pour le suivi et l'optimisation de la puissance maximale des panneaux PV. La figure 6 représente le principe de montage d'un régulateur de charge.



**Figure 6 :** Le schéma de montage de régulateur[27]

Le régulateur est positionné entre le champ photovoltaïque et la batterie. Il est constitué d'un interrupteur électronique fonctionnant selon le principe de la MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) et d'un dispositif anti-retour, généralement une diode.

L'ouverture et la fermeture de l'interrupteur électronique sont contrôlées à une fréquence spécifique, permettant ainsi de réguler avec précision le courant de charge en fonction de l'état de charge de la batterie. Lorsque la tension de la batterie est inférieure à la tension de limitation définie par le régulateur, l'interrupteur reste fermé, permettant à la batterie de se charger avec un courant proportionnel à l'ensoleillement[28].

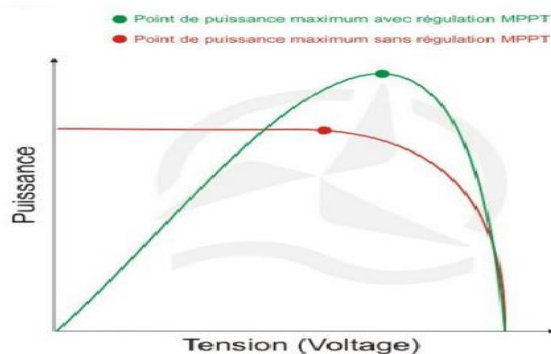


**Figure 7 :** Le Régulateur PWM[29] **Figure 8 :** L'Étape de charge batterie solaire[30]

Le régulateur de charge MPPT (maximum power point tracker) intègre un convertisseur DC/DC à découpage de haute efficacité, assurant trois fonctions principales :

- **Détection De La Puissance Maximale**
- **Conversion DC/DC** : pour adapter les niveaux de tension et de courant.
- **Régulation de la tension de sortie** : en fonction des différentes phases de charge (Bulk, Absorption et Floating).

Le champ solaire est connecté à l'entrée du régulateur, tandis que la batterie est reliée à sa sortie. Lorsque la tension de la batterie est inférieure à la tension de régulation, le régulateur optimise le fonctionnement du générateur photovoltaïque pour atteindre la puissance maximale (Pmpp) et transfère cette puissance à la sortie. Le régulateur MPPT permet également une plus grande flexibilité dans le choix des panneaux solaires. En effet, il est compatible avec tous les types de modules photovoltaïques, à condition que les tensions (V) et courants (A) restent dans les plages de tolérance spécifiés par le régulateur[31].



**Figure 9 :** Régulateur de charge MPPT[32] **Figure 10 :** Courbe de puissance MPPT[33]

**Tableau 4 :** Comparaison entre régulateur PWM et MPPT

| Contrôleur de charge PWM simple                                                                             | Contrôleur de charge MPPT                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Couplage direct du champ PV sur la batterie                                                                 | Charge de la batterie via un convertisseur Abaisseur de tension                                              |
| La tension nominale de la chaîne PV doit Être compatible à la tension de batterie                           | La tension minimale de la chaîne PV peut Être supérieur de la tension de batterie                            |
| Optimisation énergétique lorsque la température des modules est élevée et que la Batterie et presque chargé | Gain énergétique maximale lorsque la température des module et basse et que la Batterie et faiblement chargé |
| Typiquement adapté pour des petits Systèmes PV < 200Wc                                                      | Plus adapter aux puissances PV > 200Wc                                                                       |
| Nécessite l'utilisation 36 ou 72 cellules                                                                   | Possibilité d'utiliser des modules quel que Soit le nombre de cellules                                       |
| Champ PV dimensionné en courant (basé sur le courant de charge de la batterie)                              | Champ PV dimensionné en puissance (basé sur le courant max de charge x la tension de Batterie)               |

### Types De Convertisseur DC/DC

Le Tableau 5 représente la complexité de chaque type de convertisseur[34].

**Tableau 5 :** Les Type des convertisseurs DC/DC

| Type       | Fonction                       | Complexité |
|------------|--------------------------------|------------|
| Buck       | Abaisseur de tension           | Faible     |
| Boost      | Élévateur de tension           | Faible     |
| Buck-boost | Abaisseur/élévateur de tension | Moyenne    |

### II-3-5-La batterie solaire

Une batterie rechargeable, également appelée batterie de stockage ou cellule secondaire, est un dispositif électrique composé d'une ou plusieurs cellules électrochimiques conçues pour être chargées, déchargées et rechargées à de multiples reprises.

Les batteries solaires se classent en trois catégories principales : les batteries sans entretien (avec une efficacité d'environ 80 %), les batteries au plomb-acide (efficacité d'environ 90 %) et les batteries lithium-ion (efficacité d'environ 98 %). En plus du stockage d'énergie et l'apport d'une autonomie au système PV, la batterie a d'autres fonctions comme [35] :

**La stabilisation du courant :** elle garantit une alimentation stable en tension et en courant aux charges électriques connectées, contribuant au bon fonctionnement des équipements.

**La fourniture de courant de surtension :** La batterie est capable de délivrer des courants élevés pour répondre aux exigences de démarrage ou de fonctionnement de charges électriques ou d'appareils électroménagers nécessitant une puissance instantanée importante.

Nous prenons exemple des batteries suivantes[36] :



### a) La batterie AGM (absorbe Glass Mat)

L'électrolyte est absorbé et immobilisé dans des séparateurs en fibre de verre (boro-silicate), positionnés entre les électrodes. Le mécanisme de recombinaison des gaz diffère de celui des batteries ouvertes : les molécules d'oxygène diffusent à travers les séparateurs, des électrodes positives vers les électrodes négatives, où elles se recombinent pour former de l'eau. Ce processus permet de recombinaison jusqu'à 99 % de l'hydrogène et de l'oxygène en eau. Les alliages Pb-Ca et Pb-Ca-Sn sont utilisés dans les batteries AGM, car ces compositions limitent l'électrolyse de l'eau, réduisant ainsi les émissions de gaz [37].

### b) La batterie GEL

La technologie des batteries plomb-acide à électrolyte gel a été développée dans les années 1950 par la société allemande Sonnenschein. Cette innovation repose sur la solidification de l'électrolyte par l'ajout de silice sous forme de gel. Dans certaines variantes, de l'acide phosphorique est incorporé pour optimiser la longévité des batteries, notamment en conditions de cyclage profond. Au cours des premiers cycles de charge et de décharge, des microfissures se forment dans l'électrolyte gélifié, entre les électrodes positive et négative. Ces fissures favorisent la recombinaison des gaz en améliorant leur circulation, ce qui contribue à l'efficacité et à la durabilité de la batterie [38].

### c) La batterie Lithium

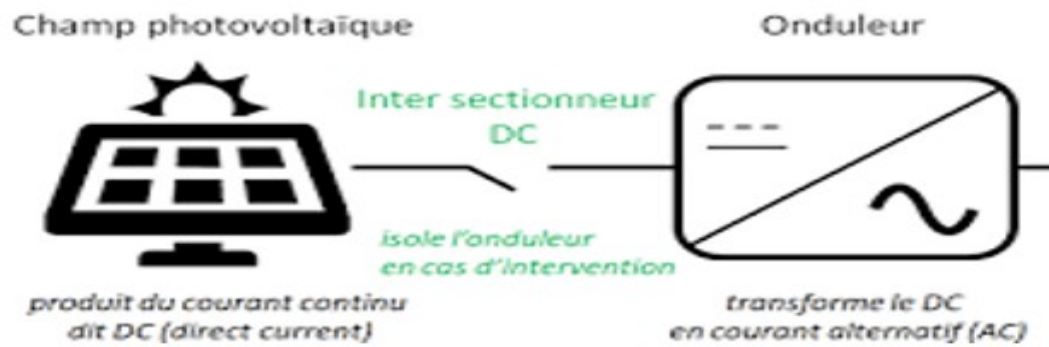
La batterie lithium représente une avancée technologique majeure et s'impose comme une innovation phare depuis 2017. Elle se distingue par la durée de vie la plus élevée sur le marché, pouvant atteindre jusqu'à 7 200 cycles à 80 % de capacité, ce qui équivaut à une durée de vie dépassant 10 ans. Ses performances exceptionnelles, couplées à l'absence d'effet mémoire, en font une solution de stockage d'énergie hautement performante et durable.

## II-3-6-L'onduleur

Un onduleur, également appelé convertisseur de puissance, est un dispositif électronique conçu pour convertir le courant continu (CC) en courant alternatif (CA). Comme illustré par la figure 12, cet appareil peut être raccordé au réseau électrique ou autonome. Les onduleurs solaires se divisent en trois catégories principales : les onduleurs autonomes (hors réseau), les onduleurs connectés au réseau (on-grid), et les onduleurs avec fonction de secours sur batterie.[39]



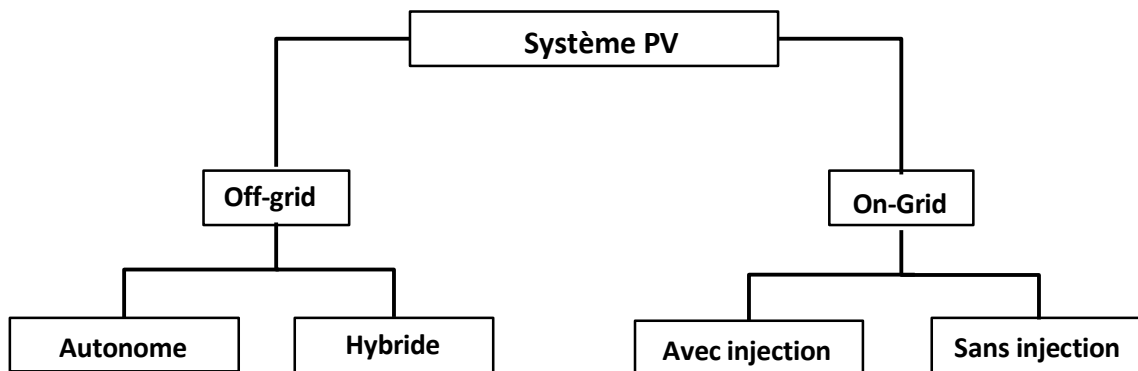
Figure 11 : L'onduleur[40]



**Figure 12 :** Le rôle de l'onduleur[41]

#### II-4-Les types de système photovoltaïque

Le système photovoltaïque (PV) se divise en deux catégories principales, raccordé au réseau (on-grid) et autonomes (off-grid), comme illustré par la figure suivante.



**Figure 13 :** Les Types des systèmes PV

Les systèmes photovoltaïques connecté au réseau (figure 14) sont utilisés pour réduire la dépendance à l'énergie fournie par le réseau électrique local. Un système connecté au réseau se compose principalement d'un ensemble de panneaux solaires et d'un onduleur, dont la fonction est de convertir l'électricité en courant alternatif (CA) synchronisé avec le réseau [42] .

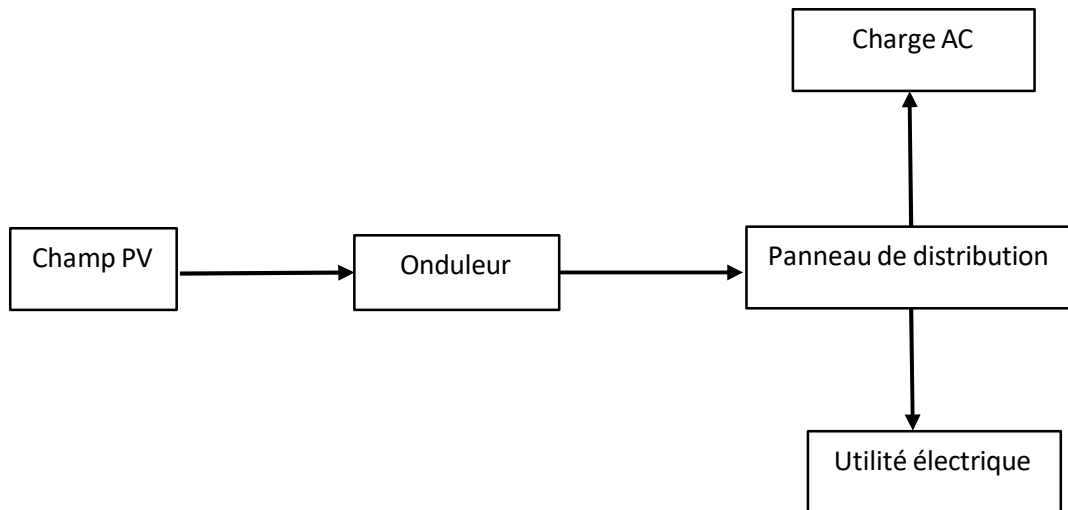


**Figure 14 :** Le système PV raccordé aux réseaux[43]



L'énergie électrique générée par le système PV est injectée au réseau durant la journée et les besoins en électricité du soir sont assurés par le réseau public. Le propriétaire du système photovoltaïque peut réaliser des économies en produisant et en injectant plus d'énergie dans le réseau que ce qu'il consomme lorsque le système ne génère pas d'électricité (pendant la nuit ou par temps nuageux).

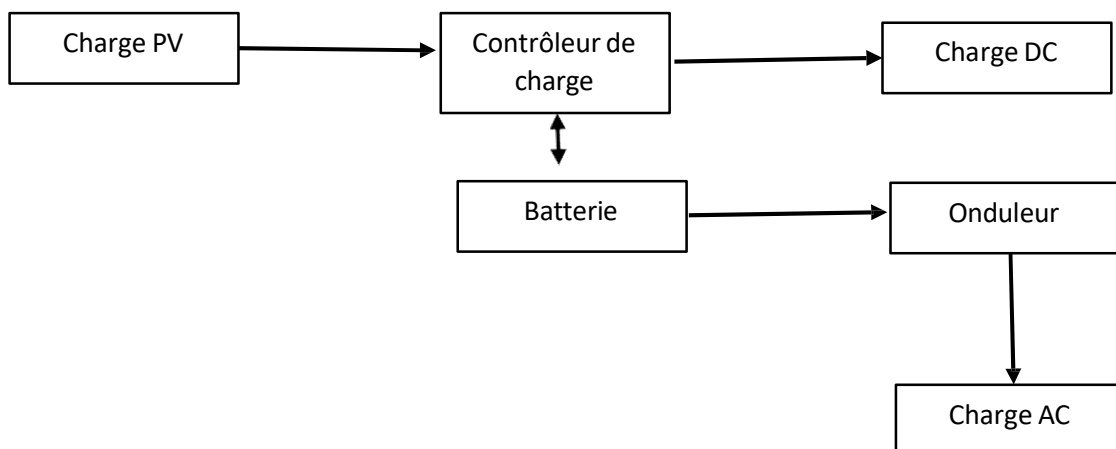
Les compteurs électriques d'interaction avec le réseau permettent de mesurer la quantité d'énergie injectée dans le réseau ainsi que celle consommée par le propriétaire, ce qui génère un crédit énergétique auprès du fournisseur d'électricité local.



**Figure 15 : Système PV connecté aux réseaux**

### d) Système PV isolé (off grid)

L'un des principaux défis de la vie en zone isolée est l'indisponibilité ou la difficulté d'accès au réseau électrique. Dans une telle situation, le recours à un système photovoltaïque (PV) avec batteries (système autonome) constitue la meilleure solution [44]. Ce système doit comporter des modules PV, des batteries, un régulateur de charge et un onduleur comme illustré par la figure suivante.

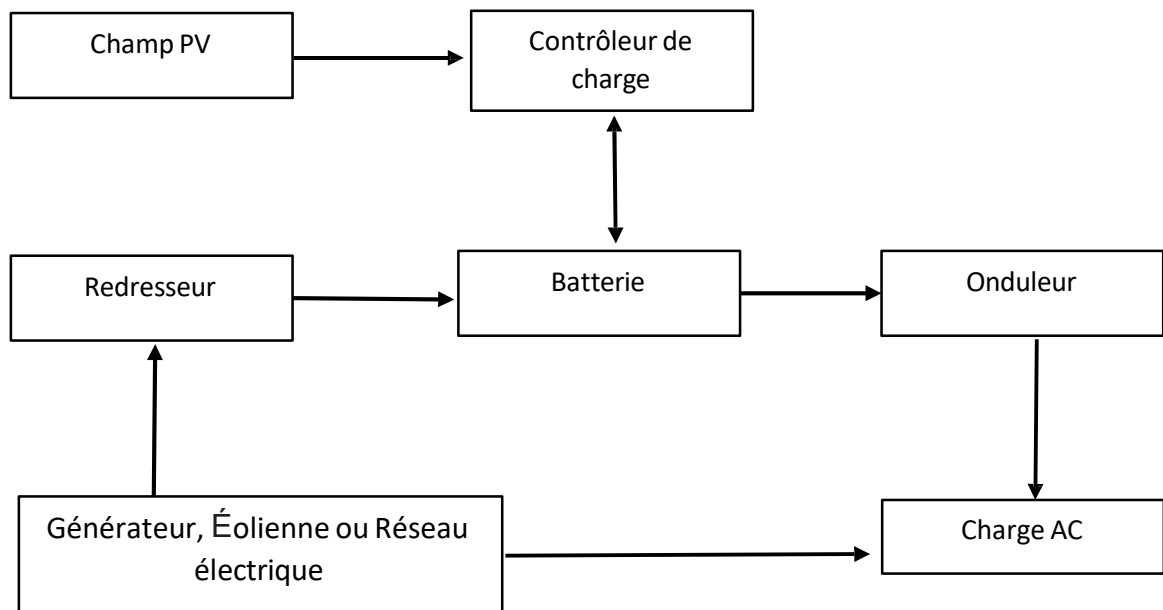


**Figure 16 : Le schéma de système PV hors réseau**

**c) Système PV hybride :**

Un système hybride permet de compenser l'énergie fournie par le système PV par une autre source d'énergie afin de recharger les batteries en cas de besoin. Un système hybride solaire est capable de stocker l'énergie produite pendant la journée pour une utilisation nocturne. Lorsque l'énergie stockée est épuisée, un générateur à combustible ou un système éolien ou même le réseau électrique peuvent servir de solution de secours, offrant ainsi aux utilisateurs une combinaison optimale d'autonomie et de sécurité énergétique.

Ces sources d'énergie complémentaires sont généralement modulables, permettant d'ajuster la production en fonction de la demande. Il est également possible de combiner plusieurs formes d'énergies renouvelables, comme l'éolien et le solaire, pour optimiser la production. L'objectif principal de la production d'énergie photovoltaïque dans un système hybride est de réduire la consommation de combustibles non renouvelables [45].



**Figure 17 : Le schéma de système PV hybride**

**II-5-La protection du système PV**

Il est important de protéger le système PV pour garantir son bon fonctionnement tout au long de son cycle d'utilisation en utilisant [42] :

**-Un parafoudre**

Pour protéger l'installation PV et particulièrement l'onduleur contre les surtensions liées à la foudre, un parafoudre doit être installé. En cas de surtension, cet équipement amène le courant vers la prise terre. La norme NF C15-100, référence en matière d'installations électriques chez les particuliers n'impose pas toujours la mise en place d'un parafoudre. Celui-ci est obligatoire dans les zones sujettes aux orages.

**- Les coffrets de protection**

Un coffret de protection photovoltaïque permet de faire la jonction entre les panneaux photovoltaïques et le piquet de terre. Il protège les panneaux solaires, mais aussi toute l'installation électrique. Différents coffrets de protection peuvent être envisagés :

- 1-Un coffret AC pour les centrales équipées d'un micro-onduleur ;
- 2-Un coffret AC/DC pour les panneaux solaires avec un onduleur.

Ces coffrets peuvent s'installer sur un branchement en monophasé ou en triphasé selon les caractéristiques de votre centrale solaire [46].

### **II-6-Dimensionnement d'un système photovoltaïque**

#### **II-6-1-Calcul de la production énergétique**

Le ratio kWh/kWc est un indicateur clé pour mesurer la productivité d'énergie de panneaux photovoltaïque. Il représente la quantité d'énergie électrique générée par une installation solaire en kWh pour chaque kilowatt-crête kWc de puissance installée.

Pour estimer la production annuelle en kWh de l'installation solaire, il suffit de multiplier sa puissance en kWc par le ratio kWh/kWc spécifique à chaque région [47].

$$Productivité (kwh/ kwc) = \frac{\text{Énergie prouduit kwh}}{\text{Puissance installée (kwc)}} \dots (1)$$

Le calcul de base de la production d'énergie solaire d'une installation peut être estimée selon la formule suivante :

$$Production PV = Puissance (KWc) * Productivité \dots (2)$$

La puissance des panneaux, mesurée en kilowatt crête (kWc), représente leur performance maximale sous des conditions idéales d'ensoleillement (STC). La productivité PV est fortement liée au temps d'ensoleillement qui reflète le nombre d'heures pendant lesquelles les panneaux captent efficacement l'irradiation solaire. Afin d'intégrer l'orientation et l'inclinaison des panneaux, on ajoute un coefficient d'orientation et un coefficient d'inclinaison [47].

#### **II-6-2-Les paramètres influençant la production PV**

Il existe plusieurs facteurs qui influence la production électrique des panneaux photovoltaïques d'une manière directe ou indirecte. Parmi ces facteurs [48] on peut citer :

**II-6-2-1-L'irradiation solaire GHI :** La quantité de lumière solaire reçue par les modules PV dépend de la localisation géographique, du climat et de la saison.

**II-2-2-L'orientation et L'inclinaison :** L'angle et la direction des panneaux par rapport au soleil affectent leur production.

**II-6-2-3-La Température :** Les performances des panneaux photovoltaïques diminuent généralement avec des températures élevées.

**II-6-2-4-L'ombrage :** Les ombrages causés par des bâtiments, des arbres ou d'autres obstacles peuvent réduire la production d'électricité.

**II-6-2-5-La Propreté :** La poussière, les feuilles et autres débris sur les panneaux peuvent également réduire leur efficacité.

**II-6-2-6-L'humidité :** L'influence de l'humidité varie de diverses manières selon son augmentation ou sa diminution au niveau de l'atmosphère.

**II-6-2-7-Le Vent :** La puissance et le rendement des panneaux photovoltaïques augmentent avec l'augmentation de la vitesse du vent, ce qui traduit l'effet du vent comme facteur d'aération pour les cellules du capteur PV.

### **II-7-Rendement :**

Le rendement PV désigne tout simplement le rapport entre la quantité d'énergie produite et la quantité d'énergie reçue. Autrement dit, il s'agit de déterminer la puissance électrique que le panneau est en capacité de produire, en fonction de la puissance du rayonnement solaire parvenant aux cellules photovoltaïques. Un rendement de 100 %, qui permettrait de convertir l'intégralité de l'énergie solaire reçue en électricité, constitue une impossibilité technique et théorique. Il existe, en effet, nécessairement des pertes d'énergie au cours du processus de transformation. En pratique, le rendement réel d'un panneau solaire commerciale est généralement situé entre 7 et 24% selon la technologie [49].

### **II-8-Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons fait une analyse complétée du système photovoltaïque, nous avons présenté les composants de base pour la conversion de la ressource solaire en énergie électrique, de la cellule jusqu'à la consommation de l'énergie en passant par les différents étages du système PV.

Les types des systèmes PV ont été présenté ainsi que les principaux facteurs affectant la production photovoltaïque. Il s'est avéré que le principal paramètre impactant la production photovoltaïque est la disponibilité de la ressource solaire en particulier l'irradiation globale horizontale solaire GHI qui fera l'objectif du prochain chapitre.

**Chapitre III : L'IRRADIATION GLOBALE HOZONTALE  
(GHI)**

## Chapitre III : L'IRRADIATION GLOBALE HORIZONTALE

### III-1-Introduction

Dans ce chapitre, nous passons en revue les principales composantes du rayonnement solaire global atteignant la surface de la terre. Nous explorons ensuite les facteurs affectant la distribution de ce rayonnement et les instruments de mesure utilisés pour la quantification de l'irradiation solaire horizontale globale.

### III-2-Les composantes de l'irradiation solaire

Le rayonnement solaire global incident au niveau du sol se compose de trois éléments principaux distincts [50] :

#### III-2-1-Rayonnement direct :

Il s'agit de la composante provenant directement de l'angle solide défini par le disque solaire, sans subir d'altération lors de son interaction avec les constituants de l'atmosphère. Cette composante dépend de l'épaisseur atmosphérique traversée par le rayonnement solaire ainsi que de l'angle d'incidence des rayons par rapport à la surface terrestre.

#### III-2-2-Rayonnement diffus :

Il s'agit du rayonnement dispersé par l'atmosphère, les nuages, les poussières et les aérosols. Ce phénomène correspond à la transformation d'un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux se propageant dans toutes les directions. Pour une surface plane donnée, la composante diffuse, représente la partie la plus complexe à modéliser et à quantifier. On distingue trois types de rayonnement diffus comme illustré par la figure suivant :

- Le rayonnement diffus isotropique : provenant de l'ensemble de la voûte céleste.
- Le rayonnement diffus circonférentiel : provenant de la couronne solaire.
- Le rayonnement diffus horizontal, issu d'une fine bande d'horizon, résultant d'une accumulation d'aérosols dans les basses couches de l'atmosphère.

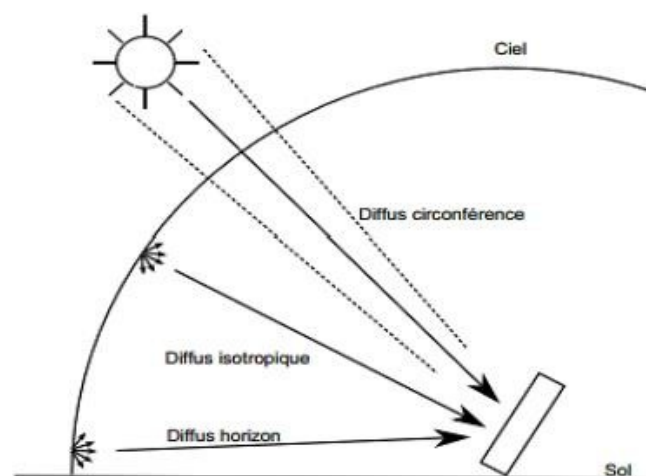


Figure 18 : Le rayonnement diffusé[51]

## Chapitre III : L'IRRADIATION GLOBALE HORIZONTALE

### III-2-3-Rayonnement réfléchi

Le sol réfléchit une partie du rayonnement incident en fonction de ses propriétés physiques et de sa nature. Cette composante réfléchie doit être prise en compte principalement pour les surfaces inclinées. La réflexion peut être de deux types :

- Spéculaire** : lorsque le rayonnement est renvoyé intégralement dans une direction unique.
- Diffuse** : lorsqu'il est dispersé dans toutes les directions.

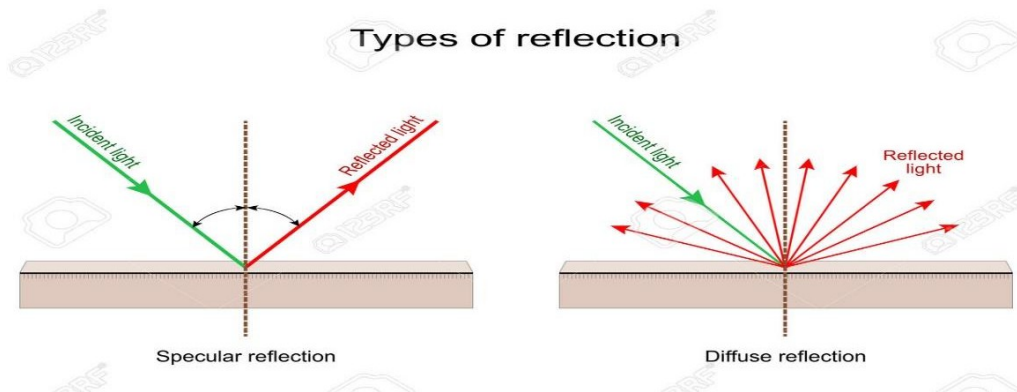


Figure 19 : Les types de réflexion[52]

### III-2-4-Le rayonnement global :

Il représente la somme des trois composantes du rayonnement solaire : direct, diffus et réfléchi. La figure suivante illustre l'ensemble des rayonnements solaires incidents sur une surface terrestre.

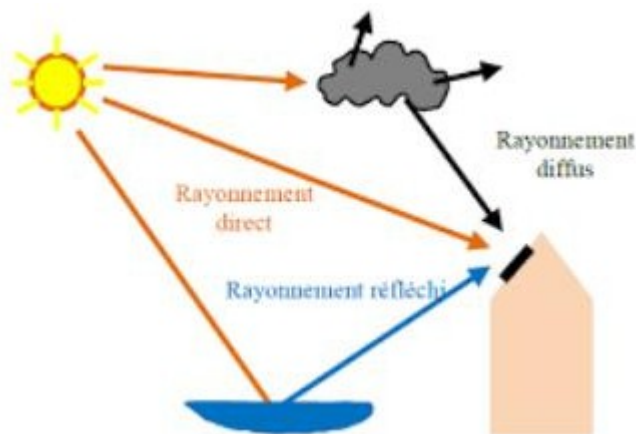


Figure 20 : Les composantes du rayonnement globale[53]

### III-2-5-L'albédo :

L'albédo est défini comme le rapport entre le rayonnement réfléchi par la surface terrestre et le rayonnement global incident. Sa valeur, comprise entre 0 et 1, dépend principalement de la

### Chapitre III : L'IRRADIATION GLOBALE HORIZONTALE

Nature du sol. Par exemple, un sol cultivé présente un albédo variant de 0,1 à 0,25, tandis que celui du sable se situe entre 0,3 et 0,4. La neige, quant à elle, peut atteindre un albédo allant jusqu'à 0,9. En moyenne, l'albédo terrestre, toutes surfaces confondues, est estimé à 0,2.

#### III-3-La position du soleil

La terre suit une trajectoire elliptique autour du Soleil, ce dernier occupant l'un des foyers de cette ellipse. Le plan dans lequel s'inscrit cette trajectoire est désigné sous le nom d'écliptique. L'excentricité de l'orbite terrestre étant relativement faible, la distance entre la terre et le soleil ne fluctue que d'environ  $\pm 1,7\%$  de sa valeur moyenne estimée à 149,675,106 km [54].

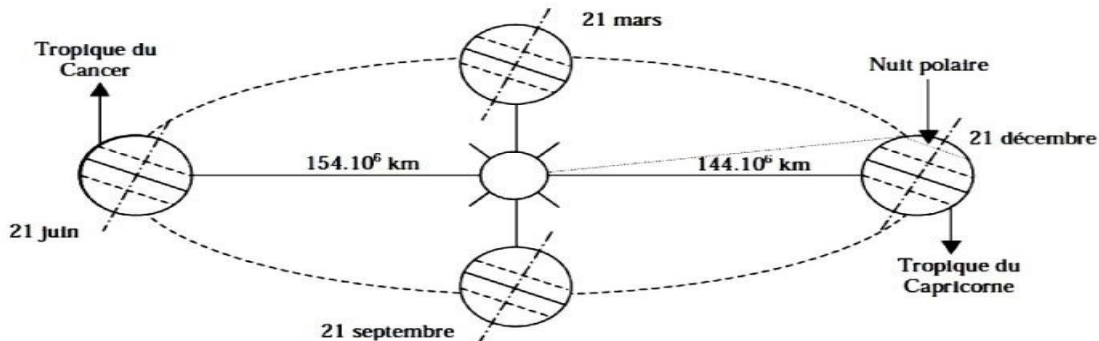


Figure 21 : Mouvement de la terre autour du soleil[55]

La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Cet axe n'est pas perpendiculaire à l'écliptique.

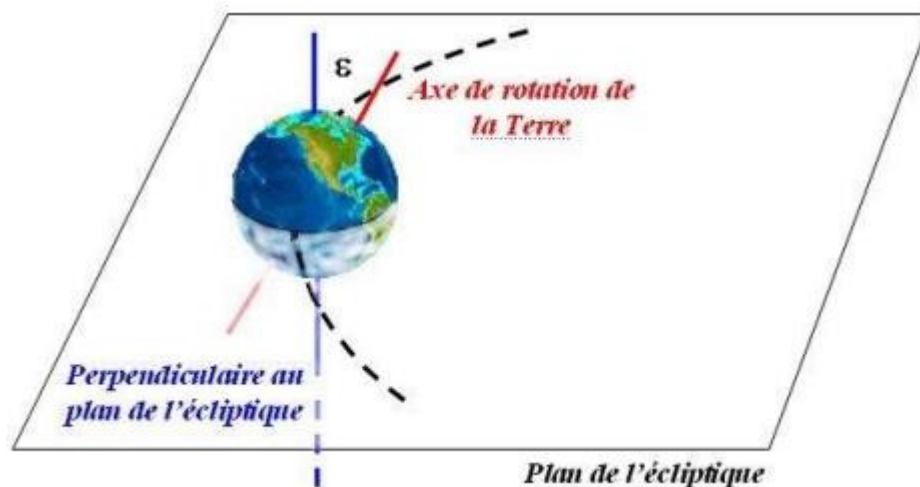


Figure 22 : Le mouvement de la terre autour d'elle-même[56]

La rotation de la terre est un phénomène complexe résultant de la combinaison de trois mouvements distincts [57] :

-**La rotation propre** : un mouvement circulaire de la terre autour de son axe.



### Chapitre III : L'IRRADIATION GLOBALE HORIZONTALE

**-La précession** : un mouvement lent qui entraîne une rotation complète de l'axe terrestre sur une période d'environ 26 000 ans, tout en maintenant une inclinaison relativement constante.

**-La nutation** : un mouvement oscillatoire périodique de faible amplitude, caractérisé par une variation rapide autour d'une position moyenne.

#### III-4-Les angles solaires

##### III-4-1-La déclinaison solaire

La déclinaison solaire correspond à l'angle formé entre la ligne reliant la terre au soleil et le plan équatorial terrestre, avec une valeur positive orientée vers le nord. Elle est nulle lors des équinoxes et oscille entre  $+23,45^\circ$  le 22 juin et  $-23,45^\circ$  le 22 décembre.

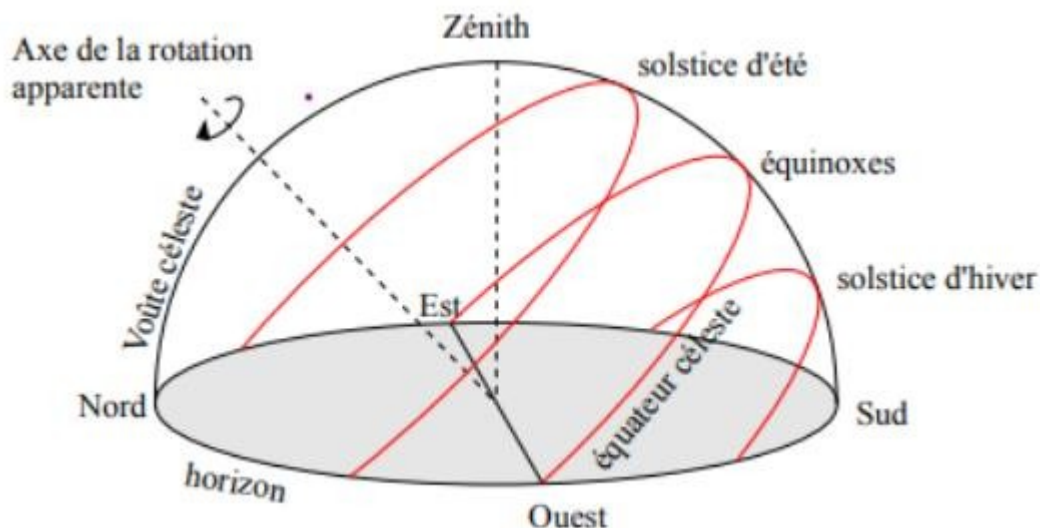
Les équinoxes correspondent aux deux moments de l'année où le Soleil traverse le plan équatorial terrestre. À ces dates, la déclinaison solaire est nulle et la durée du jour est égale à celle de la nuit. L'équinoxe d'automne se produit aux alentours du 22 septembre, tandis que l'équinoxe de printemps survient vers le 22 mars [58].

##### III-4-2-Angle horaire du soleil

L'angle horaire ( $\omega$ ) représente l'arc de la trajectoire solaire situé entre le Soleil et le plan méridien du lieu d'observation. Il augmente de  $15^\circ$  par heure et mesuré Positivement dans le sens rétrograde, de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  [59].

##### III-4-3-Le trajectoire du soleil

Au cours de l'année, la trajectoire quotidienne du soleil dans le ciel subit des variations. Son altitude change, influençant ainsi la durée du jour et la position de son lever et de son coucher. Bien que cette trajectoire évolue quotidiennement, toutes ses courbes restent parallèles entre elles et perpendiculaires à l'axe de rotation de la Terre.



**Figure 23** : Le Trajectoires du Soleil au cours de l'année[60]

### Chapitre III : L'IRRADIATION GLOBALE HORIZONTALE

Lors des équinoxes de printemps et d'automne, le soleil suit la trajectoire de l'équateur céleste. Ces deux jours de l'année sont uniques, car le Soleil se lève exactement à l'Est et se couche précisément à l'Ouest. De plus, ils se caractérisent par une durée égale de 12 heures pour le jour et la nuit [58].

#### III-5-L'irradiation globale extraterrestre :

L'irradiation solaire extraterrestre, située en dehors de l'atmosphère, correspond au rayonnement solaire atteignant la limite supérieure de la couche atmosphérique. Pour un site spécifique situé à une altitude, le flux solaire reçu par une surface horizontale en dehors de l'atmosphère est calculé par la formule [50] :

$$G_0 = G_{sc} (1 + 0.033 \cos(\frac{2\pi.n}{365})) \dots (3)$$

$G_0$ : l'irradiation extraterrestre instantanée ( $\text{W/m}^2$ ).

$G_{sc}$ : constante solaire ( $1361 \text{ W/m}^2$ )

$n$  = nombre de jours de l'année

Et pour calculer l'irradiation quotidienne hors atmosphère, on applique la relation suivante :

$$H_0 = \frac{24 \cdot 3600}{\pi} G_{sc} (1 + 0.3 \cos(\frac{360n}{365})) (\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \omega_s \sin \phi \sin \delta) \dots (4)$$

$H_0$  : l'irradiation quotidienne hors atmosphère en  $\text{kWh/m}^2/\text{jour}$

$\phi$  = latitude

$\delta$  = déclinaison solaire

$\delta = 0.409 \cdot \sin(\frac{2\pi.n}{365} - 1.39)$

0.409 : valeur maximale pour la déclinaison ( $\approx 23.44^\circ$  convertie en radians, correspondant à l'obliquité de l'écliptique).

1.39 : décalage de phase ( $\approx 80$  jours) pour aligner le modèle avec les solstices /équinoxes

$\omega_s$  : angle horaire du coucher du soleil (en radians)

$\omega_s = \arccos(-\tan(\phi) \cdot \tan(\delta))$

$\phi$  : latitude

#### III-6-Instruments de mesure du rayonnement solaire

De manière générale, les mesures solaires réalisées dans les stations météorologiques et radiométriques consistent à collecter, d'une part, les différentes composantes du rayonnement solaire, et d'autre part, les données relatives à l'insolation. Il y a différents types d'instruments pour les mesures au sol, l'instrument dépend de la composante solaire à mesurer et de l'application correspondante [61].

##### III-6-1-Le pyrhéliomètre

Cet instrument est conçu pour mesurer l'éclairement solaire direct. Il est équipé d'une thermopile recouverte d'une peinture noire à fort pouvoir absorbant, intégrée dans un tube monté sur un système de poursuite du disque solaire. Ce dispositif permet d'aligner la surface

## Chapitre III : L'IRRADIATION GLOBALE HORIZONTALE

Réceptrice perpendiculairement aux rayons solaires, garantissant ainsi que seuls les rayonnements directement émis par le soleil soient mesurés.



**Figure 24 : Le pyréliomètre[62]**

### III-6-2-Le pyranomètre

Le pyranomètre est un instrument utilisé pour mesurer le rayonnement solaire global. Son élément sensible, une thermopile, est constitué d'une série de thermocouples alternant des soudures chaudes et des soudures froides. Ces dernières sont maintenues à la température ambiante par conduction thermique. Lorsque le rayonnement solaire atteint la surface absorbante (de couleur noire) en contact avec les soudures chaudes, une tension est générée par la thermopile. Cette tension est proportionnelle au flux de rayonnement incident.[63]

### III-6-3-Le Pyréliomètre ombré :

La composante diffuse du rayonnement solaire est mesurée à l'aide d'un pyranomètre équipé d'un pare-soleil. Ce dispositif est constitué d'une bande circulaire centrée sur la thermopile et alignée parallèlement au plan équatorial. Son rôle est d'occulter le rayonnement solaire direct, permettant ainsi au pyranomètre de mesurer exclusivement la composante diffuse du rayonnement. [64]



**Figure 25 : Le pyréliomètre avec panneaux d'ombrage[65]**

## Chapitre III : L'IRRADIATION GLOBALE HORIZONTALE

### III-6-4-L'albédo mètre :

Pour mesurer l'albédo, on utilise deux pyranomètres positionnés horizontalement et orientés en sens opposé : l'un dirigé vers le sol et l'autre vers le ciel. Cette configuration permet de déterminer l'albédo, défini comme le rapport entre le rayonnement réfléchi par le sol et le rayonnement global incident. [66]



**Figure 26 : L'albédo mètre**[67]

### III-7-Les mesures satellitaires

Contrairement aux mesures d'irradiation solaires terrestres, les observations satellitaires permettent de couvrir de vastes régions, garantissant ainsi une évaluation homogène et précise du rayonnement solaire en divers points géographiques à l'aide des mêmes instruments. Cette approche facilite l'analyse de l'évolution spatio-temporelle de la surface terrestre et contribue à l'étude du bilan énergétique global.

Actuellement, les satellites géostationnaires collectent des données toutes les 15 minutes avec une résolution spatiale modérée d'environ 1 km<sup>2</sup>. En parallèle, les satellites en développement offrent une résolution spatiale encore plus fine, bien que leur fréquence d'acquisition se limite à deux images par jour.

Pour effectuer leurs mesures, les satellites météorologiques s'appuient sur des capteurs passifs, tels que les radiomètres, qui captent le rayonnement émis ou réfléchi par la surface terrestre, un principe fondamental de la télémétrie passive [68].

Les satellites peuvent également être équipés de capteurs actifs, tels que les radars (lidars, interféromètres, diffusiomètres). Contrairement aux capteurs passifs, ces dispositifs génèrent leur propre source d'énergie pour émettre un signal en direction de la cible observée, puis captent et analysent le signal réfléchi. Cette technologie présente l'avantage de permettre des mesures indépendamment des conditions lumineuses, que ce soit de jour comme de nuit, et en toute saison. Toutefois, son principal inconvénient réside dans la consommation énergétique élevée nécessaire à l'émission du signal, caractéristique de la télédétection active [69].

Un satellite ne se limite pas à un simple radiomètre ; il est généralement équipé de plusieurs instruments de mesure fonctionnant simultanément. Ces instruments opèrent sur différentes bandes spectrales et offrent des résolutions spatiales et temporelles variées, permettant une analyse plus approfondie des phénomènes atmosphériques et terrestres.

## **Chapitre III : L'IRRADIATION GLOBALE HORIZONTALE**

Au cours des dernières décennies, de nombreuses méthodes ont été développées pour estimer le rayonnement solaire à partir des données satellitaires. La majorité de ces approches repose sur l'exploitation d'images issues de satellites géostationnaires, offrant ainsi une couverture continue et une surveillance efficace des variations du rayonnement solaire [70], [71].

### **III-8-Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les principales composantes du rayonnement globale atteignant la surface terrestre. La mesure de ce rayonnement est indispensable pour estimer et calculer l'énergie PV produite par le système. Nous avons démontré que l'utilisation des bases de données issues des mesures et observations satellitaires demeure la meilleure solution pour couvrir des vastes zones géographiques ou en cas d'absence des stations de mesures terrestres.

La mesure de l'irradiation globale horizontale GHI permet d'estimer la production instantanée de quantifier l'historique de l'énergie produite par le système PV. Cependant dans la plupart des cas, le gestionnaire du système veut bien avoir des prévisions sur l'irradiation solaire pour pouvoir prendre des décisions selon la disponibilité future de l'énergie solaire et anticiper les problèmes liés aux intermittences de la ressource.

Le chapitre suivant traite les modèles classiques statistiques permettant de prédire l'irradiation solaire en utilisant les mesures historiques procurées à partir des mesures terrestres ou bien des bases de données satellitaires afin d'assurer une exploitation optimale de cette ressource.

**Chapitre IV : Les modèles de prédiction de GHI**

### IV-1-Introduction

L'énergie solaire est l'une des ressources renouvelables les plus abondantes et plus respectueuses de l'environnement. Mais son inconvénient majeur est son intermittence et sa variabilité dans le temps. Ce qui rend la prédiction de sa production photovoltaïque une tâche difficile et même un défi.

Dans ce chapitre nous passons en revue les fondements théoriques des modèles de prédiction de l'irradiation solaire et l'influence la variabilité, la situation géographique et les conditions météorologiques sur la production du système photovoltaïque.

Un modèle simple de prédiction à base de la persistance de l'irradiation globale horizontale GHI est étudié et pris comme modèle de référence, ensuite des modèles statistiques de séries temporelles plus complexes sont réalisés afin de comparer la précision de la prédiction.

Les performances de chaque modèle réalisé sont évaluées à l'aide des indicateurs de performance tels que RMSE et MAE. Le défi principal est de trouver un compromis entre la précision des prédictions et la complexité du modèle.

### IV-2-Caractéristiques des ressources solaires

Parmi les caractéristiques principales de la ressource solaire, sa variabilité temporelle et spatiale, ces variabilités sont des aspects clés à considérer lors de la prédiction du GHI :

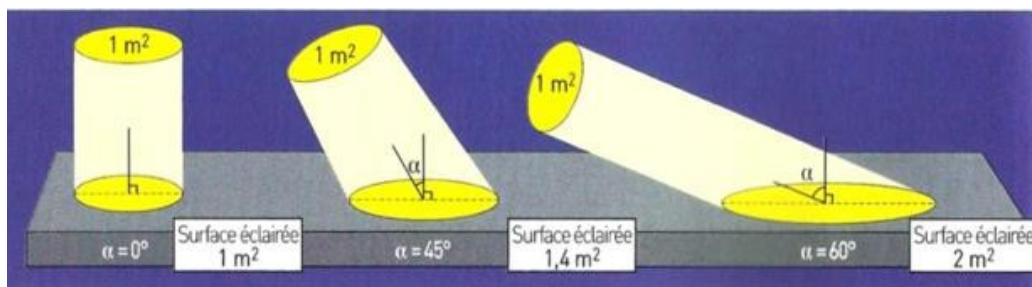
#### IV-2-1-Variabilité temporelle

Nous pouvons la diviser en trois classes selon la périodicité

##### a) Variabilité journalière

Au cours de la journée et avec la rotation de la terre, la puissance solaire reçue par mètre carré augmente du lever du soleil jusqu'à midi solaire, puis diminue jusqu'au coucher du soleil.

La variation de l'inclinaison du rayonnement solaire incident pour un point donné à la surface terrestre est responsable des variations diurnes de la puissance solaire reçue en ce point. Plus cette inclinaison est importante (angle  $\alpha$  de la figure 30 suivant), plus l'aire de la surface éclairée est grande et plus la puissance solaire reçue par mètre carré diminue [72].

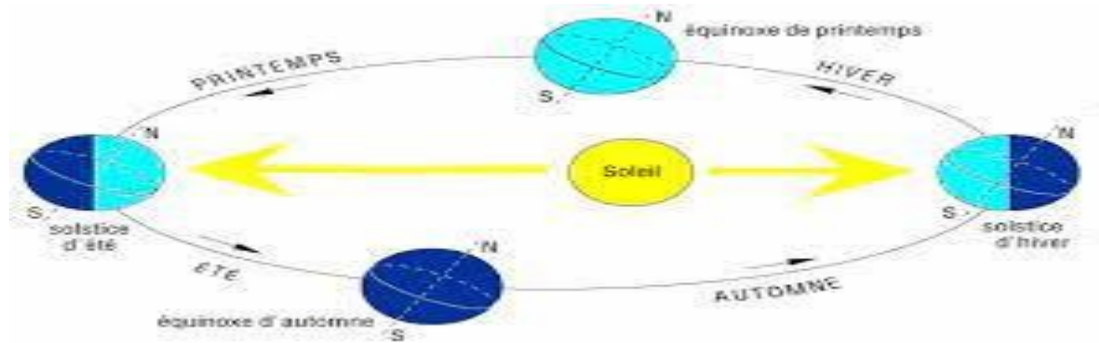


**Figure 27 :** Inclinaison du rayonnement incident et aire de la surface[73]

## Chapitre IV : LES MODELES DE PREDICTION DE GHI

### b) Variation saisonnière

Le rayonnement solaire reçu au sol varie dans le temps, d'une part en fonction des variations de l'activité solaire, et d'autre part en fonction des saisons (selon inclinaison de la terre) et au sein de chaque saison en fonction des variations naturelles [74]. La position de soleil varie au cours de l'année, ce qui affecte la quantité d'énergie solaire disponible a différent de saison.



**Figure 28 :** La position du soleil au cours de l'année[75]

### c) Variation annuelle

Des facteurs comme cycle solaire peuvent affecter légèrement l'intensité du rayonnement solaire sur un échelle annuelle. Le niveau de rayonnement varie au cours de l'année. La variation annuelle du niveau de rayonnement solaire extraterrestre est illustrée par la figure suivante [76].

### d) Variabilité à court terme

Les condition métrologiques (nuage, pluie, brouillard) peuvent causer des fluctuations rapide et imprévisibles de l'ensoleillement, ils bloqueront en effet les rayons solaires [77].

### IV-2-2-Variation spatiale

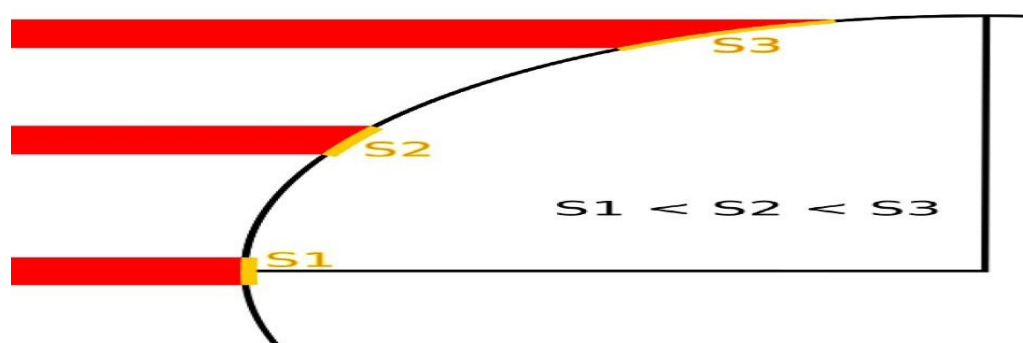
La ressource solaire varie également en fonction de la localisation géographique

#### a) La latitude

Les régions proches de l'équateur reçoivent généralement plus d'énergie solaire tout au long de l'année en raison de l'angle d'incidence plus direct des rayons solaires. Les régions polaires reçoivent moins d'énergie solaire, surtout en hiver.

La figure 33 illustre que pour un faisceau solaire de puissance donnée, plus on monte en latitude plus la surface éclairée augmente, donc la puissance par unité de surface diminue. Ainsi, une même énergie est répartie sur une surface plus grande au sol aux pôles qu'à l'équateur. Aux pôles, le rayonnement est tangent [78]. La puissance radiative reçue du soleil dépend de l'angle entre la normale et la direction du soleil. Ainsi on aura un maximum de puissance solaire reçue au niveau de l'équateur [79].





**Figure 29** : Puissance solaire reçue au sol en fonction de la latitude[80]

### a) L'altitude

Les zones en haute altitude reçoivent souvent plus de rayonnement solaire car l'atmosphère est moins épaisse, ce qui réduit la diffusion et l'absorption du rayonnement. Le rayonnement ultraviolet UV solaire augmente avec l'altitude dans l'atmosphère, en raison de la diminution des quantités de molécules d'air, d'ozone, d'aérosols et de nuages au-dessus de la surface concernée [81].

### c) Les conditions locales

Les caractéristiques géographiques locales, comme la présence des montagnes, des vallées ou des plans d'eau, peuvent influencer la quantité de rayonnement solaire reçue. Par exemple, les zones désertiques ont tendance à avoir un ensoleillement plus élevé en raison de la faible couverture nuageuse [82].

### d) Les microclimats

Certaines régions peuvent avoir des microclimats spécifiques qui affectent l'ensoleillement. Par exemple, les zones côtières peuvent avoir plus de brouillard, réduisant l'ensoleillement [46].

## IV-3-Extraction des données

Les données de mesures météorologiques sont l'élément clé de l'étude de prédiction. La disponibilité d'une base de données fiable et précise est fondamentale pour élaborer des modèles de prédiction d'énergie solaire. Dans notre étude, la base de données "National Solar Radiation Database (NSRDB) du laboratoire national américain des énergies renouvelables

(NREL)" a été choisie comme principale source de données météorologiques, en particulier celles relatives au rayonnement solaire, en vue de développer des modèles de prédictions.

### IV-3-1-National Solar Radiation Database (NSRDB) NREL :

National Solar Radiation Database (NSRDB) est une base de données gratuites qui fournit des mesures précises de rayonnement solaire et des paramètres météorologiques associées pour toutes les régions du monde. Cette base est développée et gérée par le laboratoire national des énergies renouvelables NREL (son siège social est à Golden Colorado, USA). La plateforme NSRDB est parmi les sources de données de GHI les plus fiables disponibles gratuitement et avec une couverture spatiale globale [83].

## Chapitre IV : LES MODELES DE PREDICTION DE GHI

### IV-4-Cas d'étude

Nous avons téléchargé les données météorologiques de la région de Blida (Algérie) correspondantes aux coordonnées géographiques de 36.49° nord et 2.82° à partir de la plateforme de NSRDB dataviewer. Il s'agit d'une série temporelle des paramètres météorologiques : angle zénithal solaire, GHI ciel claire, type de nuage, température, vitesse du vent et l'irradiance horizontale globale GHI. Cette dernière est la variable la plus important pour faire la prédiction de l'énergie photovoltaïque. Les données utilisées sont une série temporelle qui correspond à l'année 2022 avec une résolution temporelle de 15 min.

### IV-5-Outils informatiques de développement

Nous avons utilisé l'environnement de développement intégré spyder (inclus avec la distribution anaconda Navigator), pour développer et implémenter les codes d'analyse et traitement des donnée, spyder est considéré comme l'un des outils les plus puissants dédiés à la programmation avec le langage python, il fournit une interface facile à utiliser qui répond aux besoins d'analyse de données, et de l'intelligence artificielle.

Développé initialement par Pierre Raybaut en 2008. Depuis 2012, Spyder et un environnement de développement intégré (IDE) open source gratuit utilisé pour l'analyse statistique et l'apprentissage automatique. Nous avons utilisé dans cette étude, la version du logiciel intégrée au navigateur de développement Anaconda. Ce navigateur est une interface graphique simple qui permet de gérer des environnements logiciels et d'exécuter des applications scientifiques [84].

### IV-6-Les indicateurs de performance

Les indicateurs de performance sont des paramètres très importants pour évaluer les modèles de prédiction. Dans notre étude nous avons utilisé deux métriques d'évaluation : RMSE et MAE

#### IV-6-1-Erreur Quadratique Moyenne (RMSE - Root Mean Square Error) :

L'écart quadratique moyen (RMSE) est l'écart-type des résidus (erreurs de prévision). Les résidus sont la mesure de l'écart entre les points de données et la ligne de régression. La métrique RMSE est la mesure de la ventilation de ces résidus[85]. En d'autres termes, elle indique la concentration des données autour de la ligne du meilleur ajustement il est déterminé par la formule mathématique suivant [86].

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}}{n} \dots (5)$$

$\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n$  : valeurs prévisionnelles

$y_1, y_2, \dots, y_n$  : valeurs observées

n : les nombre des observation

#### IV-6-2- Erreur Absolu moyenne (MAE – Mean Absolute Error) :

Mesure la moyenne des valeurs absolues des erreurs. Elle est moins sensible aux valeurs extrêmes que le RMSE, L'erreur absolue moyenne (MAE) est une mesure qui mesure l'ampleur moyenne des erreurs entre les valeurs prédites et les valeurs réelles. Elle est calculée comme la somme des différences absolues entre les prévisions et les observations, divisée par le nombre d'échantillons.

## Chapitre IV : LES MODELES DE PREDICTION DE GHI

La formule de la MAE est la suivante [87] :

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_t - \hat{y}_i| \dots (6)$$

Où  $y_i$  est la valeur réelle,  $\hat{y}_i$  est la valeur prédite et  $n$  est la taille de l'échantillon.

### IV-7-Modèles de prévision de l'irradiation solaire

La prédiction de l'irradiation solaire est indispensable pour améliorer la fiabilité des systèmes PV et optimiser leur gestion [88].

Nous avons traité quelques modèles de prédiction classiques en étudiant leurs fondements théoriques et en réalisant et implémentant les programmes Python correspondants.

#### IV-7-1-Modèle de persistance

C'est un modèle de prédiction simple généralement utilisé pour les séries temporelles comme modèle de référence. Ce modèle suppose que la valeur future de la série sera égale à la valeur actuelle. Autrement dit, la valeur actuelle restera inchangée durant la durée d'échantillonnage de la série temporelle [62]. Nous pouvons écrire ce modèle mathématiquement sous la forme :

$$\hat{y}_{T+1} = y_t \dots (7)$$

$\hat{y}_{T+1}$  : représente la prédiction à l'instante future

D'une manière générale pour n'importe quel horizon de prévision  $h$  :

$$\hat{y}_{T+h} = y_T \dots (8)$$

C'est à dire que le modèle suppose que l'irradiation ne change pas de valeur avec le temps.

#### IV-7-2-Implémentation du modèle de persistance

##### 1-Importer les bibliothèques nécessaires

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import os
from sklearn.metrics import mean_squared_error, mean_absolute_error
```

##### 2- Chargement des données

Pour lire les données du rayonnement précédemment téléchargées à partir d'un fichier csv

```
file_path = '435440_36.49_2.82_2022.csv'
data = pd.read_csv(file_path, skiprows=2)
```

##### 3-Prétraitement

Pour convertir les données GHI en valeurs numérique, et le traitement des dates et heures, et faire la suppression des valeurs non validées.

## Chapitre IV : LES MODELES DE PREDICTION DE GHI

```
GHI = pd.to_numeric(data['GHI'], errors='coerce')
if 'Date' in data.columns and 'Time' in data.columns:
    datetime = pd.to_datetime(data['Date'] + ' ' + data['Time'],
    errors='coerce')
else:
    datetime = pd.date_range(start='2022-01-01', periods=len(data),
    freq='15min')

valid = (GHI >= 0) & datetime.notna()
GHI = GHI[valid].reset_index(drop=True)
datetime = pd.Series(datetime)[valid].reset_index(drop=True)
```

### 4-Modèle de persistance

Pour prédire la valeur de l'irradiation solaire GHI à un instant donné comme étant égale à sa valeur à l'instant précédent.

```
predicted = GHI.shift(1)
predicted.iloc[0] = np.nan
residuals = GHI - predicted
```

### 5-Calcul des erreurs

Pour mesurer la performance du modèle en calculant la prédiction du modèle (GHI prédit) et la valeur réelle (GHI observé).

```
true_values = GHI[1:]
predicted_values = predicted[1:]
rmse = np.sqrt(mean_squared_error(true_values, predicted_values))
mae = mean_absolute_error(true_values, predicted_values)
rmse_pct = (rmse / true_values.mean()) * 100
mae_pct = (mae / true_values.mean()) * 100

print(f"\nRMSE : {rmse:.2f} ({rmse_pct:.2f}%)")
print(f"MAE : {mae:.2f} ({mae_pct:.2f}%)")
```

Les résultats obtenus sur la console :

RMSE : 48.73 W/m<sup>2</sup> (25.02%)

MAE : 22.96 W/m<sup>2</sup> (11.79%)

### 6-Exportation des résultats dans fichier CSV

Enregistrer les résultats calculés (valeurs observées, valeurs prédites et le résidu de prédiction) dans un fichier csv externe afin qu'ils puissent être consultés ultérieurement.

```
results_df = pd.DataFrame({
    'Datetime': datetime,
    'GHI_Observée': GHI,

    'GHI_Prédite_Persistance': predicted,
    'Résidu': residuals
})

save_dir = os.path.dirname(file_path)
save_path = os.path.join(save_dir,
    'resultats_Persistance_GHI_avec_Residus.csv')
results_df.to_csv(save_path, index=False)
print(f"\nFichier CSV sauvegardé ici : {save_path}")
```

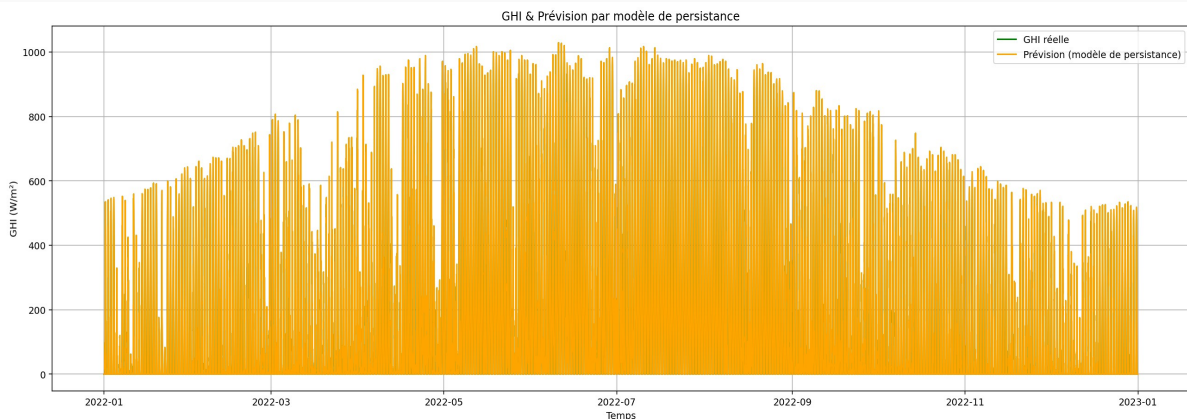
Fichier CSV sauvegardé à : resultats\_Persistance\_GHI\_avec\_Residus.csv

### 7-Représentation des résultats

Pour donner un aperçu visuel claire des performances du modèle, nous allons tracer les résultats obtenus sous forme de courbes.

```
plt.figure(figsize=(18, 6))
plt.plot(datetime, GHI, label="GHI réelle", color='green')
plt.plot(datetime, predicted, label="Prévision (modèle de persistance)",
    color='orange')
plt.title("GHI & Prévision par modèle de persistance")
plt.xlabel("Temps")

plt.ylabel("GHI (W/m²) ")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()
```



**Figure 30 :** Courbe GHI par le modèle de persistance

Vue le grand nombre de données (d'échantillons), les performances de prédiction du modèle

## Chapitre IV : LES MODELES DE PREDICTION DE GHI

ne sont pas claires. Nous procédons donc à afficher des petites périodes de 5 jours de chaque mois afin de mieux représenter la correspondance entre les valeurs réelles et les valeurs prédit

```
for mois, nom_mois in [(1, 'Janvier'), (3, 'Mars'), (6, 'Juin'), (9, 'Septembre')]:

    debut = pd.Timestamp(f'2022-{mois:02d}-01')

    fin = debut + pd.Timedelta(days=5)

    mask = (datetime >= debut) & (datetime < fin)

    # Résidus avec unités

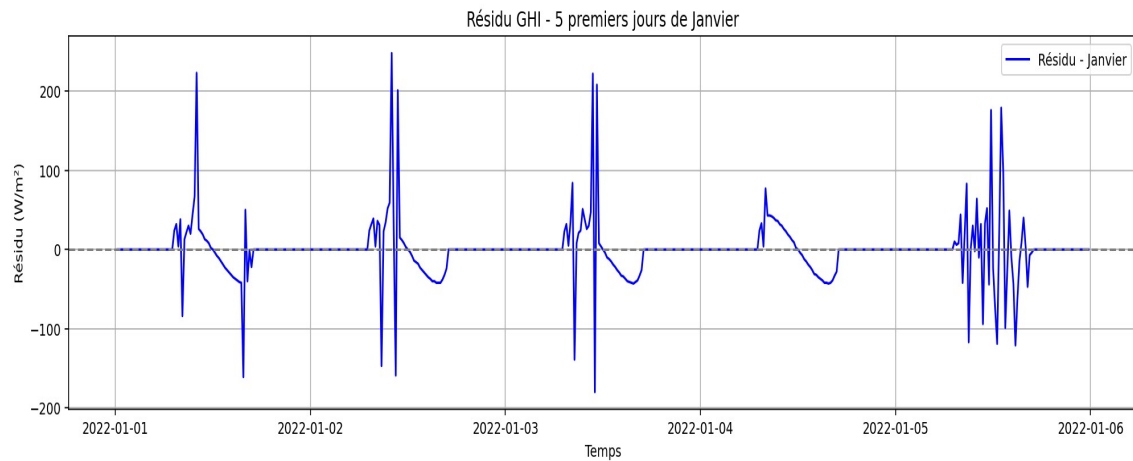
    plt.figure(figsize=(14, 4))

    plt.plot(datetime[mask], residuals[mask], label=f"Résidu - {nom_mois}", color='blue')
    plt.title(f"Résidu GHI - 5 premiers jours de {nom_mois}")
    plt.xlabel("Temps")
    plt.ylabel("Résidu (W/m²)")
    plt.grid(True)
    plt.legend()
    plt.tight_layout()
    plt.show()

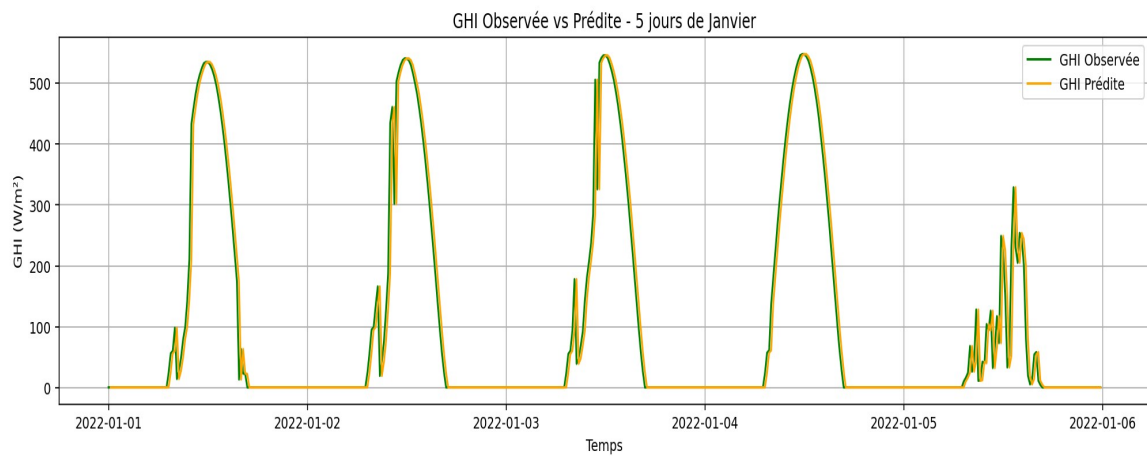
    # Observée vs Prédite avec unités
    plt.figure(figsize=(14, 4))
    plt.plot(datetime[mask], GHI[mask], label="GHI Observée", color='green')
    plt.plot(datetime[mask], predicted[mask], label="GHI Prédite", color='orange')
    plt.title(f"GHI Observée vs Prédite - 5 jours de {nom_mois}")
    plt.xlabel("Temps")
    plt.ylabel("GHI (W/m²)")
    plt.grid(True)

    plt.legend()
    plt.tight_layout()
    plt.show()
```

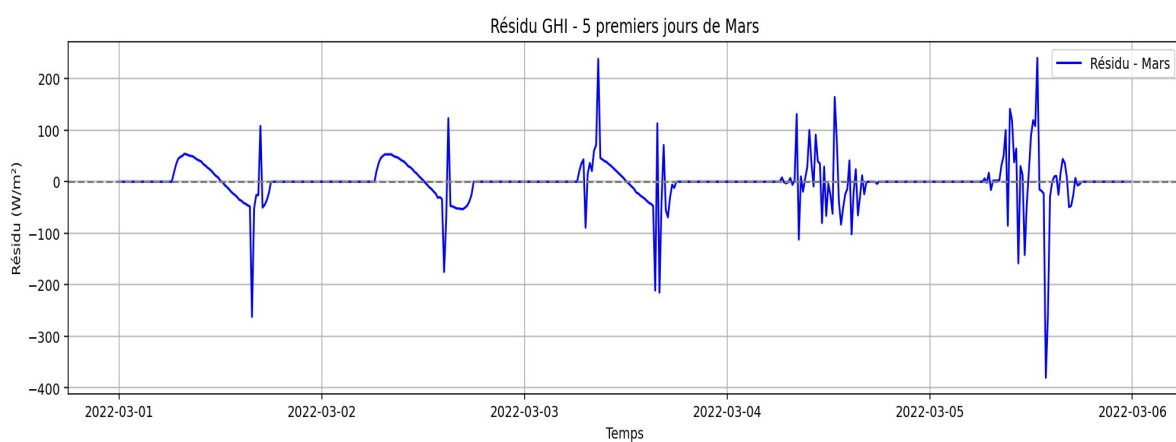
## Chapitre IV : LES MODELES DE PREDICTION DE GHI



**Figure 31 : Résidu de prédiction GHI mois de janvier**

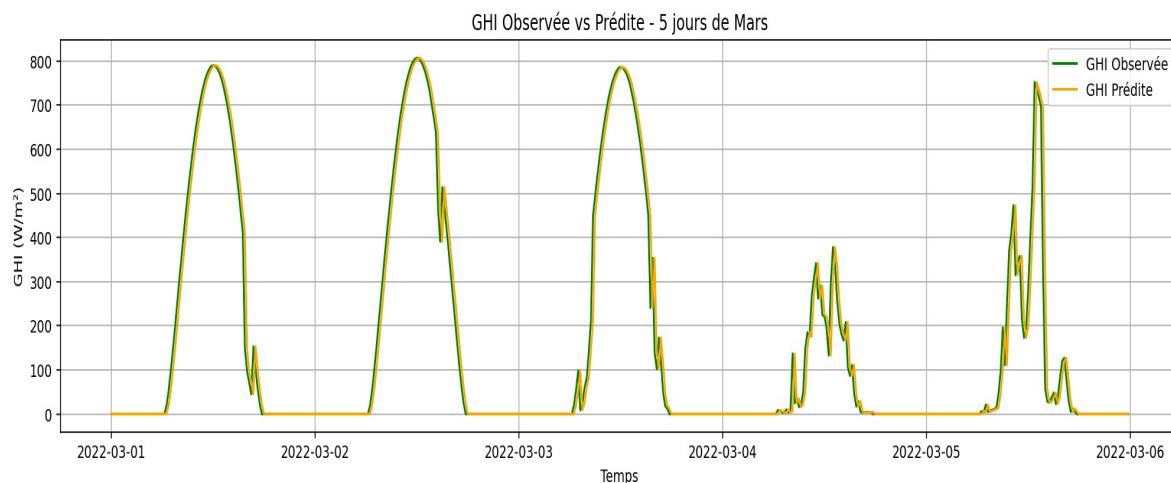


**Figure 32 : Prédiction GHI mois de janvier**

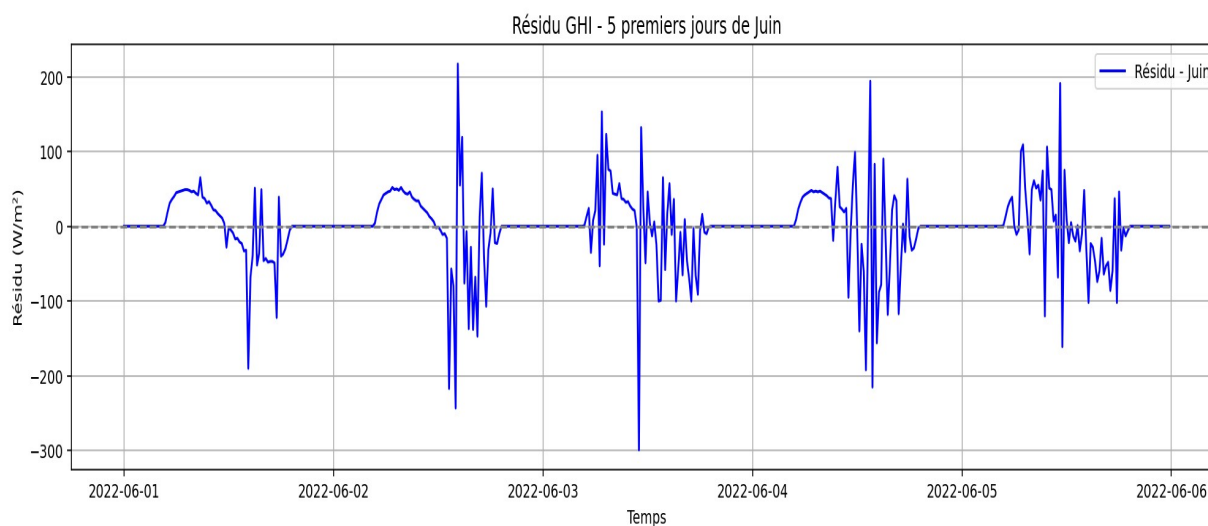


**Figure 33 : Résidu de prédiction GHI mois de Mars**

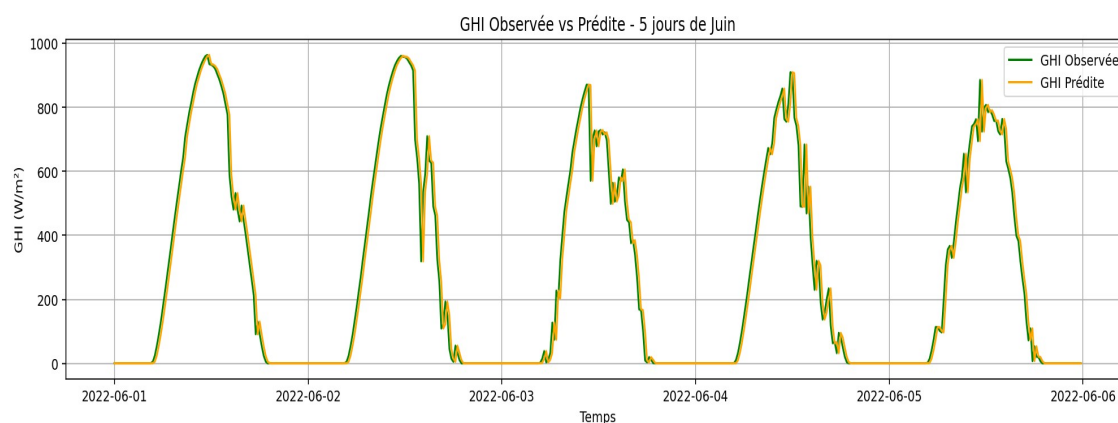
## Chapitre IV : LES MODELES DE PREDICTION DE GHI



**Figure 34 : Prédiction GHI mois de Mars**



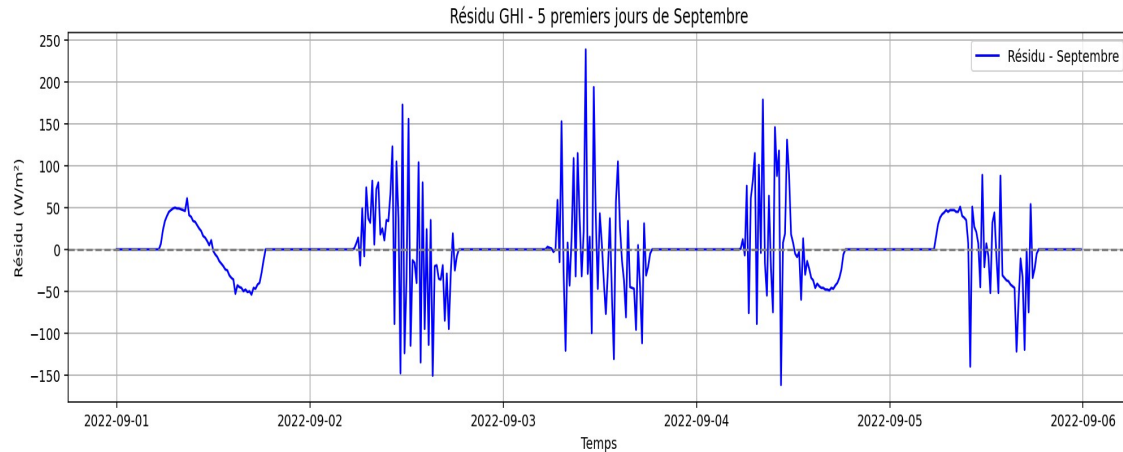
**Figure 35 : Résidu de prédiction GHI mois de juin**



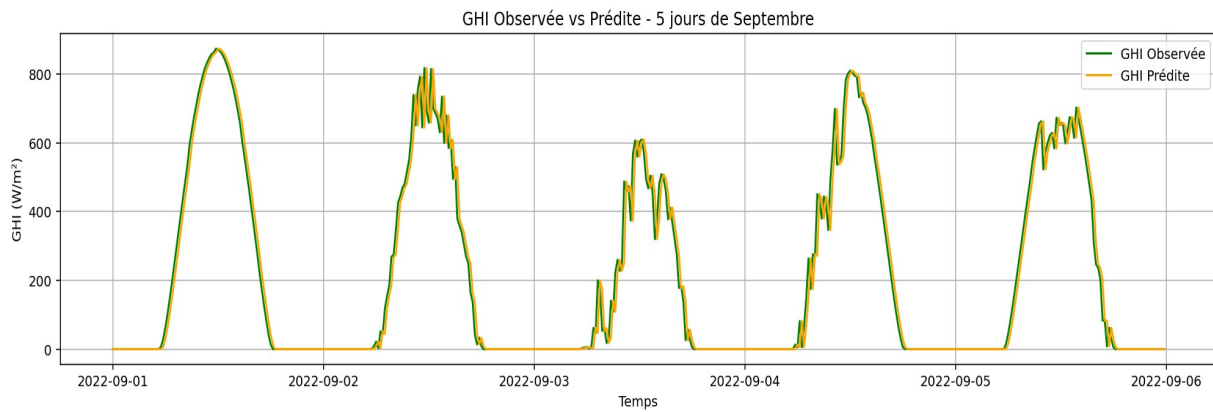
**Figure 36 : Prédiction GHI mois de juin**



## Chapitre IV : LES MODELES DE PREDICTION DE GHI



**Figure 37 : Résidu de prédiction GHI mois de septembre**



**Figure 38 : Prédiction GHI mois de septembre**

### IV-7-3-Interpretation des résultats

#### 1- Fenêtre De Consol

RMSE : 48.73 (25.02%) :

MAE : 22.96 (11.79%)

Le taux d'erreur quadratique est de 25% peut être considéré comme acceptable. Cette erreur du modèle de persistance est due à la variabilité de l'irradiation solaire à la région de Blida qui est plus rapide que le pas de mesure de la base de données. Généralement, le modèle de persistance donne des bons résultats pour les petits horizons de prédiction et cette Performance se détériore en augmentant l'horizon.

### 2-Interprétation de la courbe annuelle :

La ligne verte représente les valeurs réelles du rayonnement solaire (GHI observée), et la ligne orange représente la prévision utilisant de modèle de persistance (GHI prédite). On remarque une bonne adéquation durant la période de la nuit, lorsque les valeurs sont basses ou nulles ce qui signifie que le modèle donne des résultats précis dans ces périodes, pendant la journée, l'écart entre les valeurs réelles et prévues augmente, en particulier lorsqu'il y a des changements rapides dans le rayonnement solaire surtout dans le cas de couverture nuageuse.

### 3-Interprétation des courbes journalières

#### 1-Mois de janvier

Les résidus présentent des pics, on remarque un changement de signe des résidus indiquant des séquences de surestimation de l'irradiation et d'autre périodes de sous-estimation.

Les valeurs prédit suivant la même allure de l'irradiation solaire mesurée.

#### 2-Mois de Mars

Même motif oscillant, mais les résidu la précision est meilleur qu'en janvier, cela est peut-être dû à des conditions météorologiques plus stables

Nous remarquons qu'il y a une bonne coïncidence durant la matinée, mais qui se perturbe avec les changements soudains de l'irradiation.

#### 3-Mois de Juin

Nous remarquons que le mois de juin possède des niveaux de rayonnement élevés ce qui mène à avoir des résidus considérables notamment à midi solaire.

Le modèle donne une bonne prédiction de la tendance générale, mais on observe un net décalage entre l'irradiation prédite et mesurée.

#### 4-Mois De Septembre

Les résidus du modèle sont à ceux du mois de mars avec une oscillation modérée des résidus qui montre que les performances sont relativement meilleures.

Les performances du modèle en septembre sont relativement bonnes par rapport à juin et janvier, peut-être en raison de conditions climatiques plus stables.

### IV-7-4-Modèles de prédiction statistiques des séries temporelles

#### IV-7-4-1- Modèle MA(q) (Moyenne Mobile) :

La méthode de prévision MA est une technique simple et couramment utilisée en analyse de séries temporelles pour lisser les fluctuations à court terme et identifier les tendances à plus long terme. Elle est particulièrement utile pour éliminer le bruit dans les données et fournir une estimation plus stable de l'évolution d'une variable. [89]

On appelle processus moyennes mobiles d'ordre  $q$  MA( $q$ ) un processus linéaire  $(X_t) \in Z$  vérifiant la relation :

$$X = \sum_{j=0}^q \theta_j \varepsilon_t \quad \forall t \in Z \quad \dots (9)$$

## Chapitre IV : LES MODELES DE PREDICTION DE GHI

Où  $\varepsilon(t) \sim \text{bb}(0, \sigma^2)$ ,  $\theta_0 = 1$  et  $\theta_i (i = 1, \dots, q)$  sont des réels.

En introduisant l'opérateur de retard B défini par :

$$BX_t = X_{t-1}$$

La relation peut encore s'écrire :

$$X_t = \Theta(B)\varepsilon(t) \dots (10)$$

Où  $\Theta(B) = 1 + \sum_{i=1}^q \theta_i B^i$  est appelé polynôme caractéristique (polynôme de retard) en B de degré q du processus  $X_t$

La moyenne mobile consiste à calculer une moyenne sur un nombre fixe de périodes passées (appelé "ordre" ou "fenêtre") et à l'utiliser comme prévision pour la période suivante. Plus la fenêtre est grande, plus le lissage est important, mais moins le modèle est réactif aux changements récents [90].

### IV-7-4-2-Modèle AR(p) (Auto Regressive) :

Le processus de prévision AR est un modèle de série temporelle utilisé pour prédire les valeurs futures d'une variable en fonction de ses valeurs passées.

Un processus stationnaire  $(X_t) t \in \mathbb{Z}$  sera appelé processus autorégressif linéaire d'ordre p, AR(p) s'il existe un bruit blanc  $\varepsilon_t$ , et des réels  $\varphi_i, i = 1, \dots, p$  tel qu'une relation de récurrence :

$$X_t = \sum_{i=1}^p \varphi_i X_{t-i} + \varepsilon_t, \forall t \in \mathbb{Z} \dots (11)$$

$$\text{Es} \quad \text{vé} \quad . \\ \text{t} \quad \text{rifi}$$

La notation des polynômes de retard ramène à la forme :  $\Phi(B)_t = \varepsilon_t$

Où  $\Phi(B) = 1 - \sum_{i=1}^p \varphi_i B^i$  est le polynôme caractéristique en B de degré p du processus .

### IV-7-4-3-Modèle ARIMA (p,d,q) (Auto Regressive Integrated Moving Average)

Est un modèle puissant pour la prévision de série temporelle,

p : ordre de la partie AR

d : degré de différenciation

q : ordre de la partie MA

Un processus  $X_t$  suit un ARIMA(p,d,q) s'il vérifie la relation suivante [91] :

$$\Phi(B)(1-B)^d X_t = \Theta(B)\varepsilon_t \\ \Phi(B) \nabla^d X_t = \Theta(B)\varepsilon_t \dots (12)$$

$\nabla^d$  : opérateur de différenciation d'ordre

Avec :  $\Phi(B) = 1 - \varphi_1 B - \dots - \varphi_p B^p$ ,  $\Theta(B) = 1 + \theta_1 B + \dots + \theta_q B^q$ , et d est un entier positif appelé paramètre d'intégration ou de différenciation, et  $\varepsilon_t \sim \text{bb}(0, \sigma^2)$ .

$B^q$  : opérateur de retard [92].

Nous avons utilisé un algorithme automatisé à partir des bibliothèque Python afin de déterminer l'ordre optimale de ARIMA au lieu de faire des essais. La fonction

## Chapitre IV : LES MODELES DE PREDICTION DE GHI

AUTOARIMA Calcule les coefficients optimales pour plusieurs combinaisons d'ordre des modèles ARIMA et sélectionne l'ordre qui donne les meilleur résultats selon les critères de AIC (Akaike Information Criterion), BIC (Byesian Information Criterion) [93].

### IV-7-5-Implémentation du modèle ARIMA

#### 1-Importer des bibliothèques nécessaires

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from statsmodels.tsa.seasonal import STL
from statsmodels.tsa.stattools import adfuller
from statsmodels.graphics.tsaplots import plot_acf, plot_pacf
from pmdarima import auto_arima
from sklearn.metrics import mean_squared_error, mean_absolute_error
import os
```

#### 2-Chargement des données

```
file_path = '435440_36.49_2.82_2022.csv'
data = pd.read_csv(file_path, skiprows=2)
```

#### 3-Prétraitement :

Pour convertir les données GHI en valeurs numérique, et le traitement des dates et heures, et faire la suppression des valeurs non validées.

```
GHI = pd.to_numeric(data['GHI'], errors='coerce')
if 'Date' in data.columns and 'Time' in data.columns:
    datetime = pd.to_datetime(data['Date'] + ' ' + data['Time'],
errors='coerce')
else:
    datetime = pd.date_range(start='2022-01-01', periods=len(data),
freq='15min')
valid = (GHI >= 0) & datetime.notna()
GHI = GHI[valid].reset_index(drop=True)
datetime = pd.Series(datetime)[valid].reset_index(drop=True)
```

#### 4-Test De stationnarité

```
adf_result = adfuller(GHI)
print("\n--- Test de stationnarité ADF ---")
print(f"Statistique ADF : {adf_result[0]:.4f}")
print(f"p-value : {adf_result[1]:.4f}")
print(f"=> Série stationnaire." if adf_result[1] < 0.05 else "=> Série NON stationnaire.")
```

--- Test de stationnarité ADF ---

Statistique ADF : -36.1101

p-value : 0.0000

=> Série stationnaire.

#### 5-STL améliorée

Séparez la série chronologique en composants principaux pour mieux comprendre ses

## Chapitre IV : LES MODELES DE PREDICTION DE GHI

Propriétés et améliorer la précision des prévisions.

```
stl = STL(GHI, period=96, robust=True, seasonal=13)
res = stl.fit()
residuals_scaled = res.resid / 10
fig, axs = plt.subplots(4, 1, figsize=(14, 8), sharex=True)
axs[0].plot(GHI)
axs[0].set_ylabel("GHI (W/m²)")
axs[0].set_title("Décomposition STL")
axs[1].plot(res.trend)
axs[1].set_ylabel("Trend (W/m²)")
axs[2].plot(res.seasonal)
axs[2].set_ylabel("Season (W/m²)")
axs[3].plot(residuals_scaled)
axs[3].set_ylabel("Residus (W/m², échelle réduite)")
axs[3].set_xlabel("Index")
plt.tight_layout()
plt.show()
```

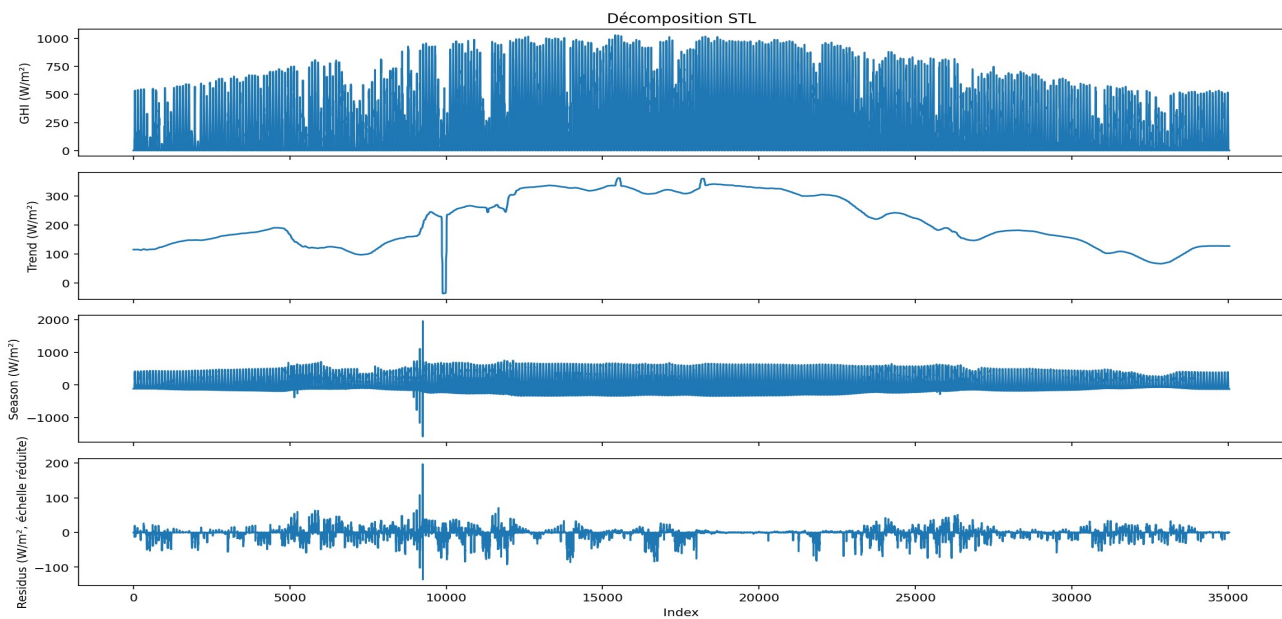


Figure 39 : Décomposition STL

### 6-ACF / PACF :

Les fonctions d'autocorrélation ACF et d'autocorrélation partielle PACF permettent de déterminer l'ordre du modèle ARIMA.

## Chapitre IV : LES MODELES DE PREDICTION DE GHI

```
plot_acf(GHI, lags=40)
plt.title("ACF - GHI")
plt.xlabel("Décalage (lags)")
plt.ylabel("Autocorrélation")
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()

plot_pacf(GHI, lags=40,
method='ywm')
plt.title("PACF - GHI")
plt.xlabel("Décalage (lags)")
plt.ylabel("Autocorrélation partielle")

plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()
```

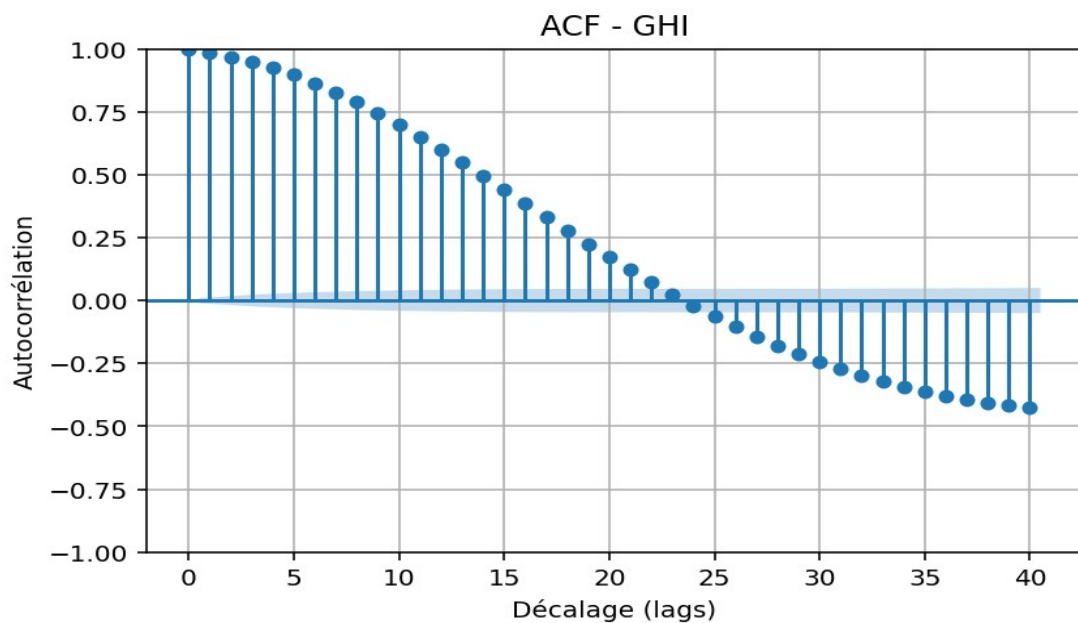
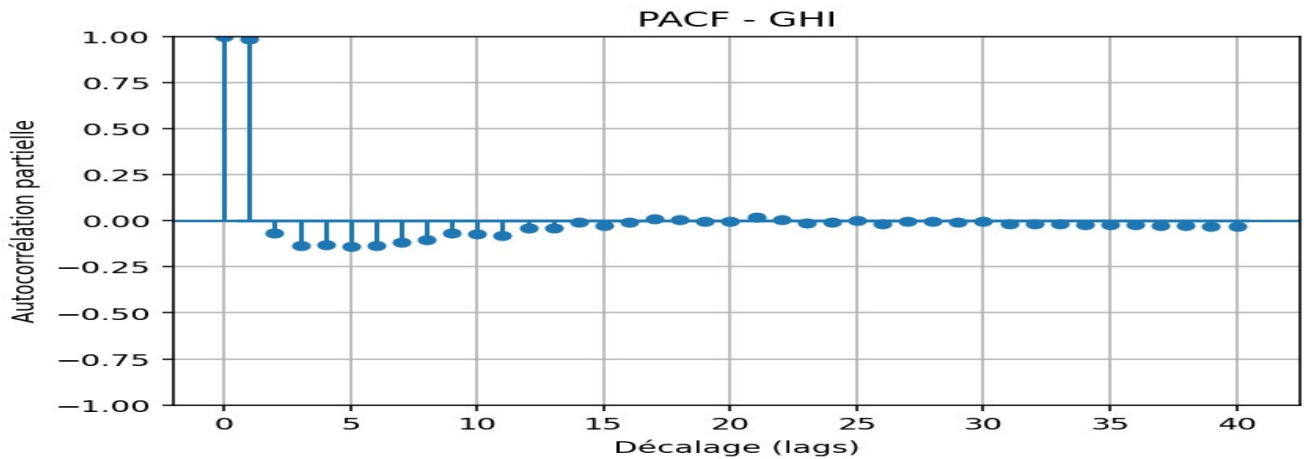


Figure 40 : Courbe d'autocorrélation ACF de GHI



**Figure 41 : Courbe d'autocorrélation partiel PACF de GHI**

### 7-Auto ARIMA :

Cette fonction permet la sélection directe de l'ordre  $p, d, q$  optimal sans avoir recours à analyser les fonctions d'autocorrélation ACF et PACF.

```
print("\nLancement de Auto ARIMA ...")
auto_model = auto_arima(GHI, seasonal=False, stepwise=True,
                        suppress_warnings=True, trace=True)
print(f"\nModèle ARIMA optimal trouvé : {auto_model.order}")
```

Best model: ARIMA(2,1,5)(0,0,0)[0]

Total fit time: 1141.321 seconds

Modèle ARIMA optimal trouvé : (2, 1, 5)

### 8-Prédiction

Pour comparer les valeurs réelles avec les valeurs prédites par le modèle sur les mêmes données sur lesquelles il a été formé, pour évaluer sa précision et sa capacité à représenter l'irradiation solaire.

```
model_fit = auto_model.fit(GHI)
fitted_values = model_fit.predict_in_sample()
fitted_values = np.maximum(fitted_values, 0)
```

### 9-Calcul des erreurs de prédiction

```
offset = max(auto_model.order[0],
             auto_model.order[2])
true_values = GHI[offset:]
predicted_values = fitted_values[offset:]
residus = true_values - predicted_values
```

### 10-Calcul des indicateurs de performance

```
rmse = np.sqrt(mean_squared_error(true_values, predicted_values))
mae = mean_absolute_error(true_values, predicted_values)
mean_ghi = np.mean(true_values)
print(f"\nRMSE : {rmse:.2f} W/m² ({(rmse/mean_ghi)*100:.2f}%)")
print(f"MAE : {mae:.2f} W/m² ({(mae/mean_ghi)*100:.2f}%)")
```

RMSE : 46.20 W/m² (23.72%)

MAE : 19.74 W/m² (10.14%)

### 11-Export des résultats

Stocker les résultats imports sous forme .csv

```
results_df = pd.DataFrame({
    'Datetime': datetime[offset:],

    'GHI_Observée': true_values,
    'GHI_Prédite_AutoARIMA': predicted_values,
    'Résidu': residus
})
save_path = os.path.join(os.path.dirname(file_path),
    'resultats_AutoARIMA_STL.csv')
results_df.to_csv(save_path, index=False)
print(f"\nFichier CSV sauvegardé ici : {save_path}")
```

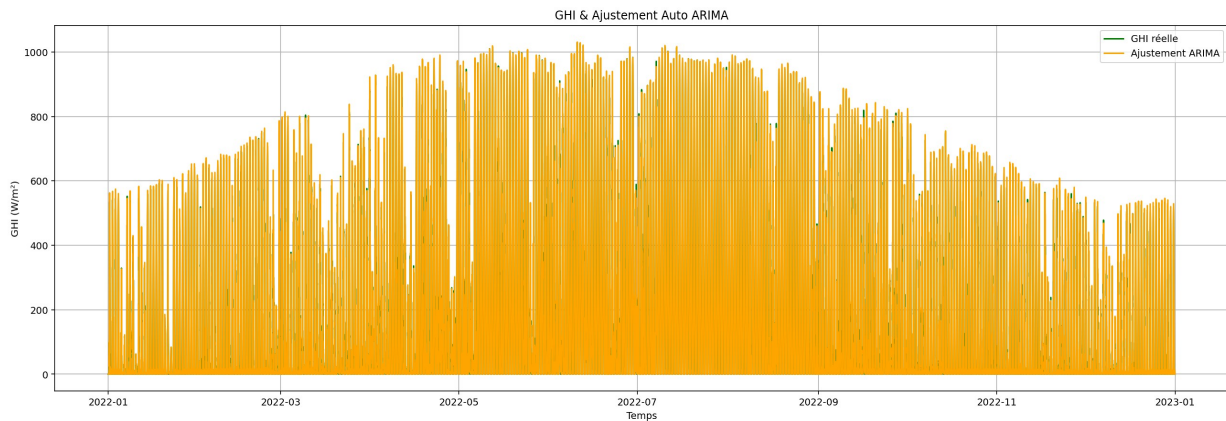
resultats\_AutoARIMA\_STL\_SansPrevision.csv

### 12-Représentation des résultats

```
plt.figure(figsize=(18,
6))
plt.plot(datetime, GHI,
label="GHI réelle",
color='green')
plt.plot(datetime[offset
:],
fitted_values[offset:],
label="Ajustement ARIMA"
color='orange')
plt.title("GHI &
Ajustement Auto ARIMA")
plt.xlabel("Temps")
plt.ylabel("GHI (W/m²) ")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()
```



## Chapitre IV : LES MODELES DE PREDICTION DE GHI



**Figure 42 :** Graphe de GHI avec le graphe de prédiction Auto ARIMA

```
mois_noms = {1:
'Janvier', 3: 'Mars', 6:
'Juin', 9: 'Septembre'}
for mois, nom in
mois_noms.items():
    debut =
pd.Timestamp(f'2022-
{mois:02d}-01')
    fin = debut +
pd.Timedelta(days=5)
    mask =
(datetime[offset:] >=
debut) &
(datetime[offset:] <
fin)

    # Résidu

plt.figure(figsize=(14,
4))

plt.plot(datetime[offset
:][mask], residus[mask],
label=f"Résidu - {nom}",
color='purple')
    plt.axhline(0,
color='gray',
linestyle='--')
    plt.title(f"Résidu
(Observée - Prédite) - 5
premiers jours de
{nom}")
```

## Chapitre IV : LES MODELES DE PREDICTION DE GHI

```
plt.xlabel("Temps")
plt.ylabel("Résidu  
(W/m²) ")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()

# Valeurs observée vs
prédite

plt.figure(figsize=(14,
4))

plt.plot(datetime[offset
:][mask],
true_values[mask],
label="GHI Observée",
color='green')

plt.plot(datetime[offset
:][mask],
predicted_values[mask],
label="GHI Prédite",
color='orange')
plt.title(f"GHI
Observée vs Prédite - 5
premiers jours de
{nom}")

plt.xlabel("Temps")
plt.ylabel("GHI  
(W/m²) ")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()
```

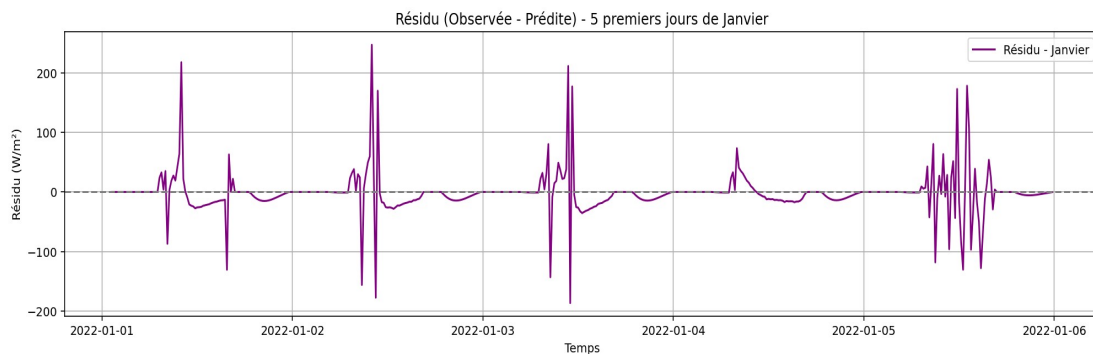
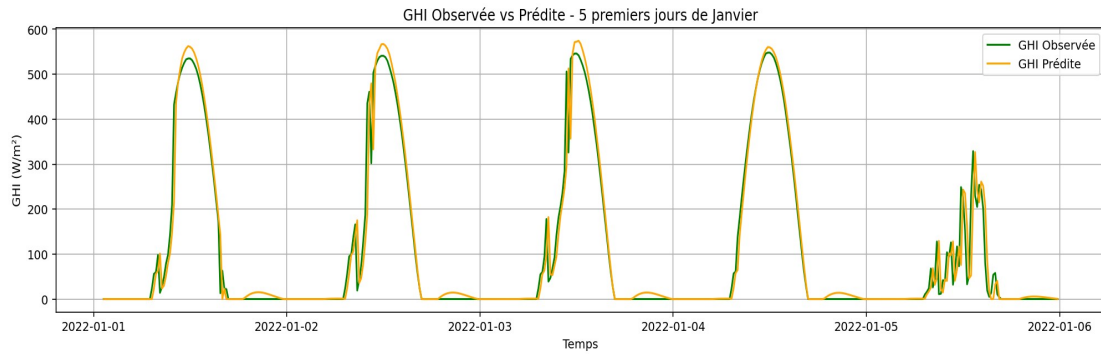
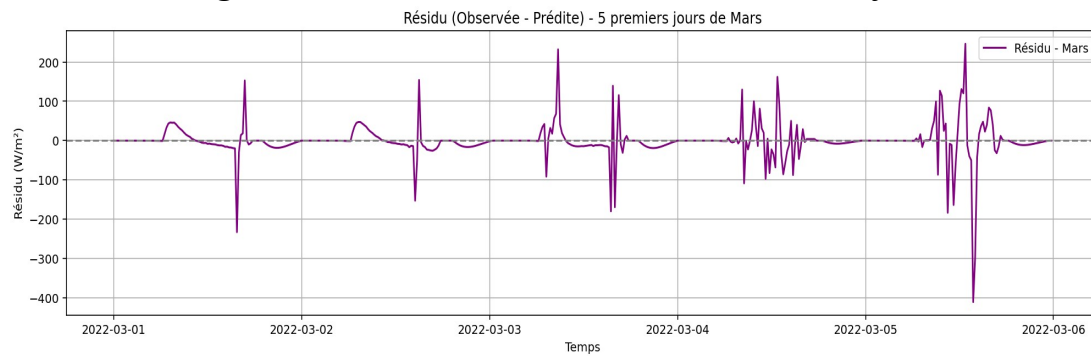


Figure 43 : Résidu GHI mois de janvier

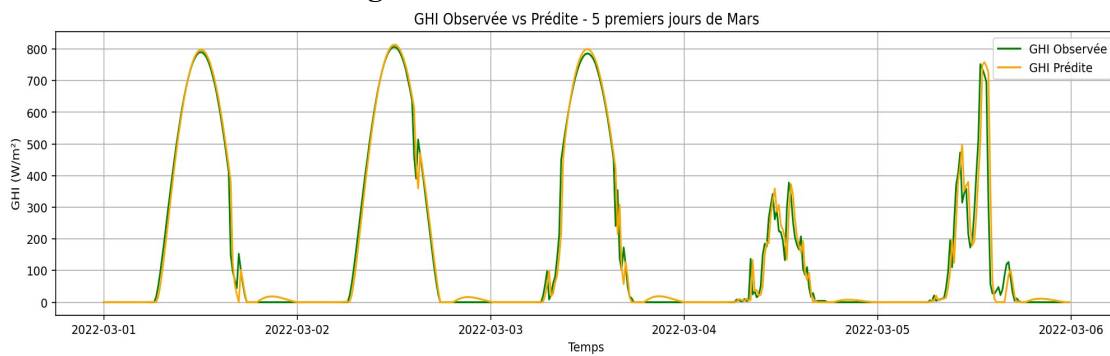
## Chapitre IV : LES MODELES DE PREDICTION DE GHI



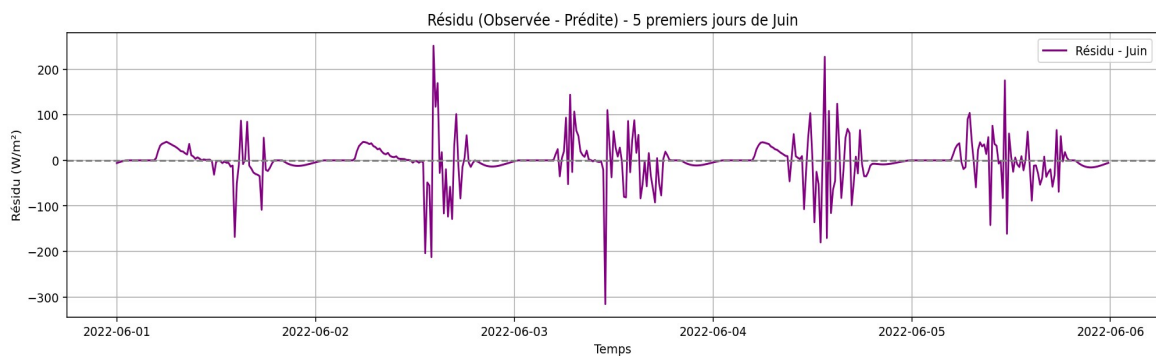
**Figure 44 : Prédiction GHI modèle ARIMA mois de janvier**



**Figure 45 : Résidu GHI mois de mars**

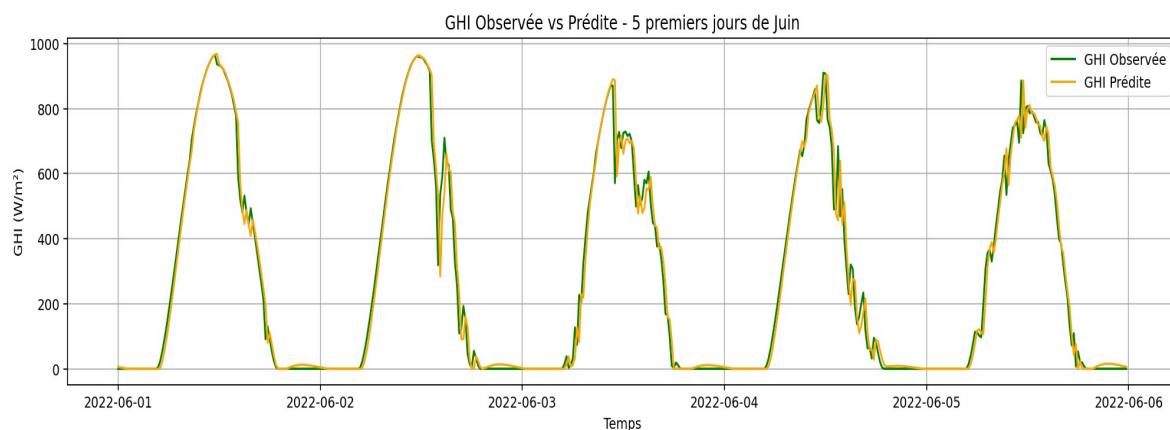


**Figure 46 : Prédiction GHI modèle ARIMA mois de Mars**

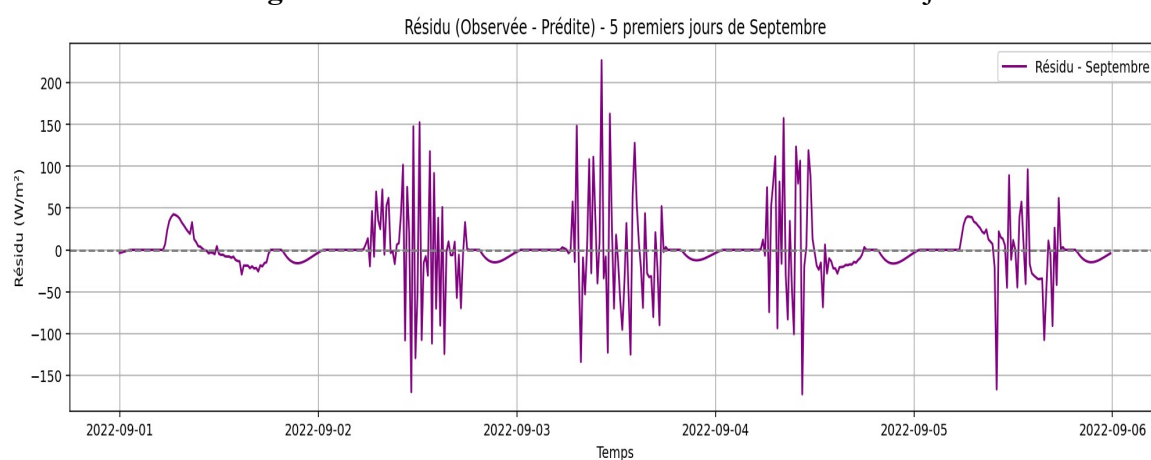


**Figure 47 : Résidu GHI mois de Juin**

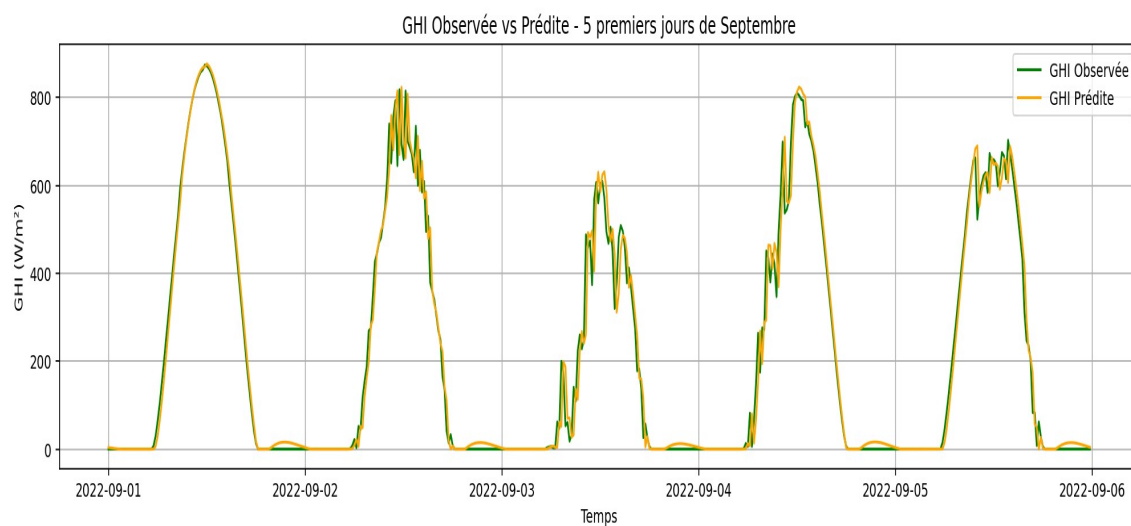
## Chapitre IV : LES MODELES DE PREDICTION DE GHI



**Figure 48 : Prédiction GHI modèle ARIMA mois de juin**



**Figure 49 : Résidu GHI mois de septembre**



**Figure 50 : Prédiction GHI modèle ARIMA mois de septembre**

## Chapitre IV : LES MODELES DE PREDICTION DE GHI

### IV-7-6-Interpretation des résultats

#### 1-Analyse du teste de stationnarité

Le teste ADF (augmentation dickey-fuller) est un teste statistique utiliser pour examiner la stationnarité d'une série temporelle, et déterminé si une série temporelle nécessite une différenciation avant d'appliquer des modèles tels qu'ARIMA. Et évité les régressions erronées dans les analyses statistique.

ADF = -36.1101

p-value = 0.0000

Comme p-value < 0.05 donc l'hypothèse nulle est rejetée, ça veut dire que la série est stationnaire

#### 2-Modèle ARIMA Sélectionné

Le AIC (Akaike Information Criterion) est une mesure de la qualité d'un modèle statistique qui équilibre adéquation du modèle aux données (qualité de l'ajustement) et complexité du modèle (nombre de paramètres). Et le BIC (Bayesian Information Criterion) c'est une mesure similaire à AIC mais plus pénaliser les modèles complexes, en particulier avec de grands échantillons.

Après la recherche à travers l'algorithme ARIMA le modèle optimal a été obtenu pour (p=2, d=1, q=5)

ARIMA (2,1,5) avec AIC = 368372.46

Nous remarquons que l'ordre d=1 donc une différenciation a été effectué malgré que le test de stationnarité ADF ait indiqué que la série est stationnaire. Le choix de d=1 ne signifie pas nécessairement que la série est non stationnaire mais plutôt que l'utilisation de la première différenciation améliore considérablement les performances du modèle selon le test AIC et BIC sur lesquels est basée la fonction AUTOARIMA.

#### 3- Analyse des indicateurs de performance

RMSE (Root Mean Squared Error) : 46.20 (23.72%) MAE

(Mean Absolute Error) : 19.74 (10.14%)

Le modèle arima choisi prédit l'irradiation solaire avec une précision légèrement meilleur que le modèle de persistance simple.

#### 4-Interprétations des courbes de prédiction

La décomposition STL (Seasonale-Trend decomposition using loess) il s'agit d'une méthode statistique puissante permettant d'analyser les séries temporelles en la décomposition en quatre composantes principales :

**GHI** la courbe du rayonnement solaire au fil du temps

**Trend** l'évolution de la tendance générale du rayonnement solaire est représentée sur le long terme sans fluctuation journalières.

**Seasonal** représente les changements quotidiens (24 heures), qui reflètent le comportement du rayonnement solaire au cours de la journée.

**Residus** résidus entre la série originale et les composants précédents.

Utilisé la régression locale (LOSS) qui permet d'estimer les composantes non linéaires, et fonctionné avec des données irrégulières (telle que des données manquantes ou également espacées), et prend en charge la saisonnalité complexe (comme plusieurs cycles différentes simultanés).

## Chapitre IV : LES MODELES DE PREDICTION DE GHI

La courbe ACF il mesure la corrélation entre une Seri temporelle et une version ultérieure d'elle mémé (avec un certain décalage temporel).il utilisé pour détecter la saisonnalité et les tendances des données et PACF indiquent la corrélation des valeurs actuelles avec les valeurs précédentes. La présence pics significatifs progressivement décroissants indique la présence d'une autocorrélation à long terme dans les données, cela confirme la nécessité d'utiliser des modèles ARIMA avec des coefficients AR ou MA pour capturer cette corrélation.

Le modèle utilisé (STL +ARIMA) a montré des performances stables et équilibrées sur différents mois et saisons, les erreurs restent dans des limites acceptables et les prévisions ont maintenu la forme générale des cycles quotidiens, aucune indication d'écart ou de rupture dans les prévisions n'a été observée sur différents mois.

### IV-7-7-Comparaison des deux modèles étudiés

Le modèle de persistance est moins performant que le modèle ARIMA, cependant il a l'avantage d'être très simple à implémenter rapide à exécuter et ne nécessite pas des ressources de calcul considérables.

Le tableau 7 fait une comparaison entre les deux modèles de prédiction.

**Tableau 6 :** comparaison les résultats entre les deux modèles de prédiction étudier

| Critère de comparaison       | ARIMA                                                           | Persistance                                        | Remarques                                 |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Précision (RMSE)             | 46.20(23.72%)                                                   | 48.73(25.02%)                                      | ARIMA meilleur de 1.3%                    |
| Précision (MAE)              | 19.74(10.14%)                                                   | 22.96(11.79%)                                      | ARIMA meilleur de 1.65%                   |
| Le modèle idéale             | (2,1,5)                                                         | Rien (utilisé directement la valeur précédente)    | ARIMA plus complexe                       |
| Complexité computationnelle  | Haut (nécessite un réglage des paramètres)                      | Faible (aucun entraînement requis)                 | Persistance plus simple à mettre en œuvre |
| Interprétation des résultats | Capture les modèles et les tendances saisonnières               | Suppose une valeur constante de l'étape précédente | ARIMA plus intelligent dans l'analyse     |
| Meilleure utilisation        | Pour des prévisions a moyenne terme avec des calculs suffisants | Pour des prévisions court ou très court terme      | Cela dépend des exigences du système      |

### IV-8-Conclusion

Ce chapitre examine les fondements théorique et pratiques des modèles de prévision du rayonnement solaire (GHI), en mettent l'accent sur l'analyse de l'impact des variations temporelles et spatiales et des conditions météorologiques sur la production des systèmes photovoltaïques. Deux modèles principaux sont étudiés un modèle de référence simple, et le modèle ARIMA, plus complexe, qui s'appuie sur l'analyse de séries temporelle.

En conclusion, le choix du modèle optimal dépende de l'équilibre entre la précision requis et la complexité de calcule. Si e modèle de ARIMA reste un excellent choix pour les études avancées,

#### **Chapitre IV : LES MODELES DE PREDICTION DE GHI**

le modèle de persistance offre une solution pratique et rapide pour les prédictions immédiates. Ces résultats ouvrent la voie à de futures recherches qui pourraient explorer des modèles hybrides ou des techniques d'apprentissage automatique pour améliorer encore la précision des prédictions.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce mémoire souligne l'importance de l'énergie solaire photovoltaïque comme pilier fondamentale de la transition énergétique vers la durabilité, notamment dans un pays comme l'Algérie, qui dispose d'un potentiel solaire important. L'étude analyse le programme national des énergies renouvelables, en se concentrant sur des projets majeurs qui reflètent l'engagement de l'Algérie à accroître la part des énergies propres dans son mix énergétique.

Les principaux composants des systèmes solaires photovoltaïque ont été analysés, des cellules solaires aux systèmes de stockage et aux onduleurs, mettent en évidence les facteurs affectant leur efficacité et leur productivité. De plus, l'irradiation horizontale globale (GHI) et ses outils de mesure via des stations terrestres et des satellites ont été étudiés, soulignant l'importance de données précises pour optimiser les performances des systèmes solaires.

Concernant la prévision du rayonnement solaire, des modèles simples de référence telle que le modèle de persistance et des modèles statistiques tels que le modèle ARIMA ont été appliqués à des données réelles, démontrant une précision acceptable. Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives pour l'utilisation de technologies plus avancées, comme l'intelligence artificielle, afin d'améliorer la précision des prévisions et d'assurer une meilleure intégration de l'énergie solaire dans les réseaux électrique.



## Références

- [1] John Campbell Wilson, 2012 « A history of the UK renewable energy programme, 1974-88: some social, political, and economic aspects » Thèse de doctorat, Université de Glasgow, UK
- [2] AKKOUCHE Nabil, OUCHIHA Mohamed, 2020, « L'investissement dans les énergies renouvelable en Algerie.pdf ». Mémoire de master université de Bejaia.
- [3] Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA). (s.d.). Essentiel sur l'énergie solaire.
- [4] EDF Renouvelables. (s.d.). Énergie éolienne terrestre.
- [5] EDF. (s.d.). Énergie hydraulique
- [6] Sabrin Korichi, 2022, « Etude du gisement géothermique et l'exploitation de la géothermie pour les diverses applications dans les régions arides et semi-arides », thèse de doctorat OUARGLA.
- [7] rapport technique, Junginger, M., van Dam, J., Marchal, D., Faaij, A., Zarrilli, S., & Ali Mohamed, F. (2011). IEA Bioenergy Task 40
- [8] LAKHDARA Amira, 13 octobre 2022 « Contribution à la gestion d'énergie dans un système hybride à énergies renouvelables », thèse de doctorat université de Guelma
- [9] Ministère de l'Energie des mines et des Energies renouvelables, 2023 « Secteur des Energies Nouvelles et Energies Renouvelables-AR – AAPI ».
- [10] article scientifique Benelkadi, Kaabeche, et Bakelli, vol. 21, no 2, p. 181-198, juin 2018. « Etude de faisabilité technico-économique des centrales photovoltaïques en Algérie ».
- [11] SAIHI Hocine, Juillet 2023, Contribution à la réalisation d'une centrale photovoltaïque de 300MW à « El-Foulia », Wilaya d'El-Oued, mémoire de master université blida 1. « HMemoire FINALE .pdf ».
- [12] Ministère de l'Energie des mines et des Energies renouvelables, Énergies Nouvelles, Renouvelables et Maîtrise de l'Energie, 2019. « MINISTRY OF ENERGY ».
- [13] « Liste des centrales solaires en Algérie », juillet 2024.
- [14] Centre de développement des énergies renouvelables cder, 2020, « Réalisation d'une centrale solaire d'un montant de 3,6 mds de dollars : Promotion des énergies renouvelables et propres – Portail algérien ».
- [15] Centre de développement des énergies renouvelables cder, 2024, « 1er village en Algérie alimenté à 100 % par l'énergie solaire : on connaît les détails du projet – Portail algérien ».
- [16] energynews, en 2024 « L'expansion solaire en Algérie : les projets Chinois au premier plan »
- [17] LAKEHAL Dounia, 03/07/2022, Les intervenants dans les Energies renouvelables (cas du Photovoltaïque) en Algérie, mémoire de master université blida 1.
- [18] Groupe de Cosider, COSIDER CANALISATIONS - GROUPE SONELGAZ, 2024 « Cosider groupe »
- [19] AMARI GHIES ET BENCHENIA YACINE, 13/07/2021, « Critères de choix des composants photovoltaïques pour application en Algérie », mémoire de master université blida 1.
- [20] « Power Electronics for Renewable Energy Systems – Unit 3 » cours universitaire, Inde.
- [21] Kalt, G., Kranzl, L., & Matzenberger, J., Novembre 2011 « Grid-connected photovoltaic systems based on nonlinear control. », Thèse de doctorat, Université de Louisville USA
- [22] CHERKI. Souheil\_LABRAOUI. Mohamed, 2013, « Détection et diagnostic des défauts dans les systèmes photovoltaïques par réseaux de neurones », mémoire de fin d'études école nationale de polytechnique.
- [23] Hélène HORSIN MOLINARO et Bernard MULTON, 20 janvier 2020 « Énergie électrique : génération photovoltaïque » cours France portail Éduscol.
- [24] « Chapitre 5 : Capteurs solaires photovoltaïques » cours universitaire, université de Sénégal
- [25] Guan Kian Ernest Sng, 2023 « Modelling and characterisation of industrial bifacial solar cells for high efficiency modules », PhD, thèse de doctorat, University of Glasgow UK.
- [26] rédaction interne de France Eco-Logis «

Les différents types de panneaux solaires : monocristallin, polycristallin et couche mince » article public entreprise française, France Eco-Logis.

- [27] iSunergy, 25 février 2021 « EPEVER 30 A MPPT Solar Charge Controller 12 V/24 V Auto, Max PV 100 V » Fiche produit e-commerce (Ubuy DZ), Algérie (plateforme locale), produit fabriqué en Chine.
- [28] Dong Dong, 6 mai 2009 « Modeling and Control Design of a Bidirectional PWM Converter for Single

- phase Energy Systems », thèse, Université polytechnique de Virginie (Virginia Tech) USA
- [29] généré par le fabricant, avril 2018 «
- Victron Energy BlueSolar PWM Duo 12/24 V – 20 A (LCD & USB, SCC010020060) » fiche technique, Pays-Bas.
- [30] créateur du fil décembre 2016 « Problème Pompage Solaire en 220 V » Discussion technique, France (forum francophone, utilisateur en Alsace)
- [31] Fyali Jibji-Bukar, May 2020 « Enhanced Active Power Control of Photovoltaic Systems ». thèse de doctorat, université de Strathclyde Glasgow UK.
- [32] « Régulateur solaire 48 V (page produit/marketing) » France .
- [33] «
- MPPT photovoltaïque » cours universitaire
- [34] AMIOUR DJIHEN, HAMZA ABIR, Septembre 2021 « Commande MPPT Pour les systèmes photovoltaïques en utilisant l'optimisation par essaim des particules PSO », mémoire de master université blida 1
- [35] Oumaima Chaouachi, 2021 « Méthodologie de remontée d'échelle pour la modélisation des batteries Li ions », thèse de doctorant CEA
- [36] C. Prapanukool , 2020 « Optimal sizing of battery energy storage system with rooftop PV generation system », Thesis de doctorat, université de Chulalongkorn Thaïlande
- [37] Yumeng Gao, juill 2015 « Online Monitoring of State of Health for AGM Lead Acid Batteries », thèse de doctorant université de Auburn USA.
- [38] Ali Alkorbi, 2020 « Design and synthesis of efficient polymers for photovoltaic applications », thèse de 58 doctorant, université Sheffield UK.
- [39] Lu Yun Wang, 2024 « Novel inverter topologies for energy storage and photovoltaic applications », thèse de doctorat, université de Colombie-Britannique canada
- [40] équipe entreprise SRMGT «
- Types et modèles d'onduleurs solaires » article explicatif Belgique
- [41] 17 janvier 2025 « quel est le rôle de l'onduleur et quel intérêt ? » Guide explicatif.
- [42] Md Jan-E Alam, 2014 « Grid integration of solar photovoltaic resources: impact analysis and mitigation strategies », Thèse de doctorat, université de Wollongong Australie
- [43] Ghiles Amari et Yacine Benchenina, 2021 « Critères de choix des composants photovoltaïques pour application en Algérie » Mémoire de Master, université de Blida 1.
- [44] Ali Chamseddine, 2018 « Off-grid PV systems for rural electrification: Optimizing the sizing methodology for off-grid PV systems », mémoire de master, Université de technologie de Delft, Pays Bas
- [45] Ahmed Aseeri, 2012 « Modelling and simulation of fuel cell/photovoltaic hybrid power system », thèse de doctorant, université de Cranfield UK
- [46] BOUZID HADJER BEKKOUCHE Abdelilah, 2020, « MODÉLISATION ET OPTIMISATION D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE D'UNE MOSQUÉE », mémoire de master université Tiaret.
- [47] BEN KHELIFA Zahia DEROUICHE Wafa, 23/05/2017, « Etude de l'irrigation d'un champ agricole par

- le pompage photovoltaïque dans la région de Hassi Ben Abdallah OUARGLA », mémoire de master université Ouargla.
- [48] LOUNIS Massyia, 2022, « Etude de l'impact du changement climatique sur le rendement énergétique des panneaux solaires photovoltaïques. », Mémoire de projet de fin d'études Ecole Nationale Polytechnique.
- [49] OULHADJ IBRAHIM, MESKINE MOHAMED, juin 2014, « Réalisation d'un régulateur de charge pour un système solaire photovoltaïque PDF.pdf », mémoire de master université adrar.
- [50] TAKILAL Abdellatif, 12/04/2021, « Modélisation et prédiction des rayonnement solaire reçu au sol », thèse de doctorat université Algérie. - Recherche Google.
- [51] A. M'Rouï S. Mouhous, A. Malek, B. Benyoucef, 10 novembre 2011 « Étude statistique du rayonnement solaire à Alger » mémoire de master université de Tlemcen .
- [52] « Types of reflection – Specular and Diffuse »
- [53] l'équipe de **CoolRoof** « Cool Roof Solar Booster – Le rendement photovoltaïque grâce au revêtement réfléchissant Cool Roof » entreprise privée France .
- [54] HADJ BELKACEMI Mohammed, 06 juillet 2011, « Modélisation et Étude Expérimentation d'un Capteur Solaire non Vitré et Perforé », mémoire de master université de Tlemcen.
- [55] Illiassou Naroua, Abdoukadi Laouali, et Abdoulsalam Koroney, décembre 2022 « Mouvement de la terre autour du soleil – Déclinaison du soleil (fig. 4) » Article scientifique, Niger
- [56] 1 octobre 2004 « Cycles de Milankovitch et variations climatiques » cours, Université Claude Bernard Lyon 1, France .
- [57] « Rotation de la Terre », Wikipédia. 26 avril 2025.
- [58] KADRI IBTISSEM 25 juin 2018 « Étude, Conception et Réalisation d'un Suiveur de Soleil. », mémoire de master université de Tlemcen.
- [59] W. BELAÏD, 2014 « Analyse des pertes thermiques de l'utilisation des matériaux sélectifs des convertisseurs de l'énergie solaire », thèse de doctorat, Université Tlemcen.
- [60] 29 avril 2018 « Au fil de l'an – questions » Article de blog, Groupe d'Enseignement Mathématique, Belgique.
- [61] BENKACIALI Saïd, 2019, « Prédiction du DNI en Algérie cas des modèles hybrides », thèse de doctorat École Nationale Polytechnique.
- [62] Ernest Matagne, 15 avril 2004 « les formules du mouvement apparent du Soleil, en particulier sur la déclinaison du Soleil et l'équation du temps, dans le cadre du module de la Semaine 8 – Énergie solaire » support de travaux pratiques, Université catholique de Louvain, Belgique.
- [63] Volume 133, Numéro 3 du Journal of Solar Energy Engineering de l'ASME, août 2011, USA
- [64] I. Reda et D. Myers, 16 août 1999 « Calculating the Diffuse Responsivity of Solar Pyranometers », Rapport technique.
- [65] Météo France « Pyranomètre du rayonnement diffus », l'Université Toulouse III, France
- [66] Jamie Martin Wilson, 2020 « The role of surface albedo changes in tropical forest loss and its climate impact », Université de Leeds UK .
- [67] Todor Pavlovic, 2020 « Solar Energy » Chapitre de livre The Sun and Photovoltaic Technologies, Suisse.

- [68] « Verification of some very simple clear and cloudy sky models to evaluate global solar irradiance », *Energy* 16 (1997) 251e264.
- [69] A. Qasaimeh, M. Qasaimeh, Z. Abu-Salem, et M. Momani, « Solar Energy Sustainability in Jordan », *Comput. Water Energy Environ. Eng.*, vol. 03, no 02, p. 41-47, 2014
- [70] article de revue, C. A. Gueymard, « A review of validation methodologies and statistical performance indicators for modeled solar radiation data: Towards a better bankability of solar projects », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 39, no C, p. 1024-1034, 2014.
- [71] F. Kasten, « The linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness », *Sol. Energy*, vol. 56, no 3, p. 239-244, mars 1996, doi: 10.1016/0038 092X(95)00114-7.
- [72] Vincent Voisin ,2021 « variation-rayonnement-solaire-aide-3-2.pdf » École Normale Supérieure de Lyon (ENS Lyon).
- [73] Vincent Voisin, 15 mai 2021 « Atelier 3 – Aide n°2 : Les variations diurnes d'énergie solaire reçue »supporte travaux pratiques, ENS Lyon, France.
  
- [74] Contributeurs anonymes de Wikipédia, 2025 « Rayonnement solaire » (article collaboratif en ligne).
- [75] « Solstice d'hiver et d'été » Article de vulgarisation scientifique. association bénévole, France
  
- [76] Akif Karafil, Août 2016 « Annual variation of the extraterrestrial solar radiation » Université de Selçuk, Turquie .
- [77] Carina Louart , 2023 « Les nuages, amplificateurs du réchauffement »
- [78] Jacques Laskar, Juillet 1999 « The limits of Earth orbital calculations for geological time-scale use » *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 357, No. 1757, pp. 1735–1759, Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides, France.
- [79] équipe pédagogique interne « La puissance solaire » plateforme éducative en ligne.
- [80] Vincent Lucchese, 22 décembre 2023 « Pourquoi l'hiver démarre- t- il au moment même où le soleil revient ? » Article scientifique, journal en ligne, France
- [81] N. J. K. Tiwari, A. Mishra, Février 1999 « MODELING THE ALTITUDE EFFECT ON SOLAR UV RADIATION » *Solar Energy (Sol. Energy)*, Vol. 65, No. 3, pages 181–187.
- [82] Antoine, 28 février 2025 « Quels sont les facteurs qui influencent ma production photovoltaïque ? » entreprise de rénovation énergétique, France.
- [83] M. Sengupta, Y. Xie, A. Lopez, A. Habte, G. Maclaurin, J. Shelby, Juin 2018 « The National Solar Radiation Data Base (NSRDB) » *Renewable and Sustainable Energy Reviews (Renew. Sustain. Energy Rev.)*, volume 89, pages 51–60.
- [84] Wikipédia étant une encyclopédie collaborative, 13 avril 2025 « Spyder (logiciel) ».
- [85] M. Cherqui, A. Baamar, et P. Benatallah, 2021 « Application de réseaux de neurones artificiels pour la prévision de l'énergie solaire » Mémoire de Master, Université de Adrar.
- [86] Équipe de développement de la documentation EPM d'Oracle, 2024 « RMSE (erreur quadratique moyenne) » Documentation technique en ligne, Oracle Corporation.
- [87] Ayush Gupta, 2023« Understanding Machine Learning Model Evaluation Metrics » Article technique en ligne.
- [88] Kamel Abdeladim, Abdelhak Razagui, Smail Semaoui, Salim Bouchakour, Amar Hadj Arab, Saliha Boulahchiche, Septembre 2017« Méthodologie de prévision du rayonnement solaire » *Revue des Énergies Renouvelables*, Volume 20, Numéro 3, Pages 505–510, Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER).
- [89] Sujun Ghimire, 2019 « Predictive Modelling of Global Solar Radiation with Artificial Intelligence Approaches using MODIS Satellites and Atmospheric Reanalysis Data for Australia » Thèse de doctorat,

- université de Southern Queensland (USQ), Australie.
- [90] Yannig Goude, 2021 « Les processus AR et MA » cours universitaire, Université Paris-Saclay
- [91] Pierre Duchesne, 2018 « Séries chronologiques univariées, Chapitre 2 : Construction des modèles ARIMA » Support de cours pour le programme de maîtrise en statistique, Université de Montréal, Canada.
- [92] Osamah Basheer Shukur, 2015« ARTIFICIAL NEURAL NETWORK AND KALMAN FILTER APPROACHES BASED ON ARIMA FOR DAILY WIND SPEED FORECASTING » Thèse de doctorat Universiti Teknologi, Malaysia.
- [93] OUADFEUL ADEL et OLIDIO JOSE LUIS DOS SANTOS, 2024 « Time Series Forecasting Using Hybrid AutoRegressive Integrated Moving Average (ARIMA) and Artificial Neural Network (ANN) Model » Mémoire de master, université de blida 1.