UNIVERSITE SIDI MOHAMMED BENABDELLAH
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES FES
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

جامعة الأخوين
AL AKHAWAYN UNIVERSITY

LICENCE SCIENCES ET TECHNIQUES
Génie Electrique

RAPPORT DE FIN D'ETUDES

Intitulé :

Etude Comparative de Panneaux Solaires Photovoltaïques à Ifrane

Réalisé Par :

Moustahsine Smail

Encadré par :

Pr Errahimi Fatima **(FST FES)**

Pr Loudiyi Khalid **(Université Al Akhawayn)**

Soutenu le 16 Juin 2015 devant le jury

Pr Errahimi Fatima **(FST FES)**

Pr Jorio Mohammed **(FST FES)**

Pr Lahbabi Mhammed **(FST FES)**

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier sincèrement toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'études.

Je tiens remercier Mme Errahimi Fatima, professeur à la faculté des sciences et techniques de Fès, Mr Loudiyi Khalid ,professeur à l'Université Al Akhawayn, qui ont accepté de m'encadrer, et je leur exprime particulièrement toute ma reconnaissance pour m'avoir fait bénéficier de leurs compétences scientifiques et leurs qualités humaines .

Je tiens également à remercier les professeurs Jorio Mohammed et Lahbabi Mhammed, qui ont accepté de juger mon travail.

Enfin je remercie tout le corps professoral , administratif et technique de la FST , pour la qualité de l'enseignement qui nous a été dispensé durant ces trois ans d'étude.

Table des matières

Tableau de figures 4
Abréviations 5
Introduction générale 6
Chapitre I 8
L'Energie Solaire et les Systèmes Photovoltaïques 8
1.1. Rayonnement Solaire 9
1.2. Les Différents Types de Systèmes Photovoltaïques 9
1.2.1. Systèmes photovoltaïques autonome 9
1.2.2. Système photovoltaïque raccordé au réseau 10
1.2.3. Les schémas de raccordement au réseau 11
1.3. Avantages et Inconvénients de l'Énergie Photovoltaïque 12
1.3.1. Avantages 12
1.3.2. Inconvénients 12
1.4. Le Potentiel Solaire au Maroc 12
1.5. Conclusion 13
Chapitre II 14
La cellule photovoltaïque 14
2.1. Définition 15
2.2. Historique 15
2.3. Principe de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque 16
2.4. Rendement Photovoltaïque 16
2.5. Les Différents Types de Cellules Photovoltaïques à base du cilisium 17
2.6. Tableau comparatif des différents types de cellules photovoltaïques 18
2.7. Modélisation de la Cellule PV 19
2.7.1. Cellule PV idéale - Modèle simple 19
2.7.2. Cellule PV réelle - Modèle précis 20
2.7.3. La courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque 21
2.8. Effets des Variations Climatiques sur la Cellule Photovoltaïque 22
2.8.1. Variations de l'énergie incidente 22
2.8.2. Variations de la température 22
2.9. Générateur Photovoltaïque 23
2.9.1. Association en série 23
2.9.2. Association en parallèle 23
2.9.3. Association mixte 24
2.10. Conclusion 24
Chapitre III 25

Système photovoltaïque raccordée au réseau installé à l'université Al Akhawayn 25
3.1. Description de l'installation photovoltaïque 26
3.2. Onduleur photovoltaïque 27
3.2.1. Rôle 27
3.2.2. Caractéristiques 27
3.2.3. Méthodes de recherche du point de puissance maximale 28
3.3. Extraction des données de l'installation photovoltaïque 29
3.4. Conclusion 31
Chapitre IV 32
Etude comparative des panneaux photovoltaïques 32
4.1. Logiciel de simulation PVSyst 33
4.1.1. Localisation du site 33
4.1.2. Données météorologiques du site 35
4.1.3. Définition des paramètres du système 35
4.1.4. Résultats de simulation pour l'installation monocristalline 37
4.1.5. Résultats de la simulation pour l'installation polycristalline 40
4.1.6. Résultats de la simulation pour l'installation amorphe 43
4.1.7. Comparaison des résultats de la simulation 46
4.2. Etude comparative expérimentale 46
4.2.1. Données climatiques couvrant la période allant du 10/2014 au 04/2015 46
4.2.2. Résultats et interprétations 47
4.3. Conclusion 57
Conclusion générale 59
Bibliographie 60
Webographie 60
Annexe 61

Tableau de figures

Figure 1: Schéma simplifié d'un système photovoltaïque autonome
Figure 2: Schéma simplifié d'un système photovoltaïque raccordé au réseau
Figure 3: Les schémas de raccordement au réseau électrique
Figure 4: Gisement solaire au Maroc
Figure 5: Cellule photovoltaïque
Figure 6: Effet photovoltaïque dans un panneau photovoltaïque
Figure 7: Cellule monocristalline
Figure 8: Cellule polycristalline
Figure 9: Cellule amorphe
Figure 10: Tableau comparatif des cellules photovoltaïques
Figure 11: Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire idéale connectée à une charge
Figure 12: Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire réelle connectée à une charge
Figure 13: Caractéristique courant-tension et puissance-tension d'une cellule PV
Figure 14: Caractéristique courant-tension d'une cellule PV pour différentes valeurs d'intensité lumineuse
Figure 15: Caractéristique courant-tension d'une cellule PV pour différentes valeurs de température
Figure 16: Caractéristique courant-tension de n cellules PV associées en série
Figure 17: Caractéristique courant-tension de n cellules PV associées en parallèle
Figure 18: Caractéristique courant-tension de n cellules PV associées en mixte
Figure19: Installation photovoltaïque installé à l'Université Al Akhawayn
Figure 20: Principe d'un système photovoltaïque raccordé au réseau
Figure 21: Onduleur Sunny Boy 2100TL
Figure 22: Le Point MPPT pour un onduleur
Figure 23: L'algorithme des méthodes de Hill-Climbing et P&O
Figure 24: Assistant de l'installation du Sunny Explorer
Figure 25: Données générales de l'installation photovoltaïque
Figure 26: Données de l'installation photovoltaïque côté DC
Figure 27: Données de l'installation photovoltaïque côté AC
Figure 28: Les étapes de simulation avec PVsyst
Figure 29: Interface du logiciel PVSyst
Figure 30: carte interactive
Figure 31: Paramètres du site géographique
Figure 32: Définition du projet
Figure 33: Orientation et inclinaison du système PV
Figure 34: Dimensionnement des onduleurs et des panneaux PV
Figure 35: Paramètre de simulation de la chaîne monocristalline
Figure 36: Résultats de la simulation de la chaîne monocristalline
Figure 37: Diagramme des pertes de la chaîne monocristalline
Figure 38: Paramètre de simulation de la chaîne polycristalline
Figure 39: Résultats de la simulation de la chaîne polycristalline
Figure 40: Diagramme des pertes de la chaîne polycristalline
Figure 41: Paramètre de simulation de la chaîne amorphe
Figure 42: Résultats de la simulation de la chaîne amorphe
Figure 43: Diagramme des pertes de la chaîne amorphe
Figure 44: Énergie électrique générée par les trois types de panneaux PV
Figure 45: logiciel RETscreen
Figure 46: Température et rayonnement solaire durant la période allant du 01/10/2014 au 01/05/2015
Figure 47: Énergie électrique générée durant le mois 10/2014 par les trois types de cellule PV
Figure 48: Énergie électrique générée durant le mois 11/2014 par les trois types de cellule PV
Figure 49: Énergie électrique générée durant le mois 12/2014 par les trois types de cellule PV
Figure 50: Énergie électrique générée durant le mois 01/2015 par les trois types de cellule PV

Figure 51: Énergie électrique générée durant le mois 02/2015 par les trois types de cellule PV
Figure 52: Énergie électrique générée durant le mois 03/2015 par les trois types de cellule PV
Figure 53: Énergie électrique générée durant le mois 04/2015 par les trois types de cellule PV
Figure 54: Puissance instantanée en KW générée par les trois types de panneaux PV durant le 10/03/2015
Figure 55: Puissance instantanée en KW générée par les trois types de panneaux PV durant le 09/02/2015
Figure 56: Puissance instantanée en KW générée par les trois types de panneaux PV durant le 08/02/2015
Figure 57: Puissance instantanée en KW générée par les trois types de panneaux PV durant le 24/02/2015
Figure 58: Puissance instantanée en KW générée par les trois types de panneaux PV durant le 04/03/2015
Figure 59: Puissance instantanée en KW générée par les trois types de panneaux PV durant le 07/03/2015
Figure 60: Puissance instantanée en KW générée par les trois types de panneaux PV durant le 16/03/2015
Figure 61: puissance instantanée en KW générée par les trois types de panneaux PV durant le 16/02/2015
Figure 62: puissance instantanée en KW générée par les trois types de panneaux PV durant le 17/02/2015
Figure 63: puissance instantanée en KW générée par les trois types de panneaux PV durant le 19/02/2015
Figure 64: puissance instantanée en KW générée par les trois types de panneaux PV durant le 23/03/2015
Figure 65: puissance instantanée en KW générée par les trois types de panneaux PV durant le 24/03/2015
Figure 66: puissance instantanée en KW générée par les trois types de panneaux PV durant le 25/03/2015

Abréviations

ONE : Office National de l'Électricité.

AIE : l'Agence Internationale de l'Énergie

GPV: Générateur Photovoltaïque .

MPPT : Maximum Power Point Tracking**.**

AM : masse d'air.

P&O: Perturb & Observe.

GAP: Groupe de Physique Appliquée.

Introduction générale

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. L'augmentation des couts énergétiques et les contraintes environnementales poussent vers la mise au point de solutions technologiques permettant une meilleure maitrise des ressources et une meilleure exploitation des énergies renouvelables

Pays non producteur d'énergie fossile, le Maroc est dépendant des pays exportateurs d'énergie fossile à hauteur de 97 % pour ses besoins énergétiques. La provision en électricité du pays devient également problématique ; en effet, la croissance de la demande électrique est une forte contrainte pour l'Office National de l'Electricité (ONE) - 7,5 % en 2008.

Ce contexte énergétique défavorable constitue pourtant une opportunité pour le Maroc de développer le secteur des énergies renouvelables afin de réduire sa dépendance vis-à-vis de l'étranger et de répondre à sa demande énergétique de façon durable et autonome. En effet, le Maroc regorge de potentiel en matière d'énergie renouvelable, notamment l'énergie solaire avec 5,5 kWh/m^2/j ; soit un ensoleillement de 3 000 heures par année.

L'homme consomme, aujourd'hui, une énergie correspondant à 1/8OOO^{eme} de l'énergie solaire qui arrive à la surface de la terre.

L'énergie solaire fait appel à la ressource la mieux partagée : le rayonnement solaire.

L'énergie solaire peut être récupérée par deux procédés:

- Photovoltaïque pour la production d'électricité avec ou sans stockage.
- Thermique pour la production de chaleur.

Notre intérêt porte sur la première forme de conversion.

À l'ère du développement durable, l'énergie photovoltaïque connaît une progression rapide en raison de son potentiel significatif comme source d'énergie renouvelable. En effet, plus de 22GW ont été produite en 2010 contre 0.4 GW en 1998, soit une augmentation de 5500% selon l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE). Cependant, le rendement de la conversion photovoltaïque reste relativement faible. Ceci présuppose l'utilisation et la mise en œuvre de techniques permettant d'optimiser le profit de cette technologie en tirant le maximum de la puissance pouvant être produite.

Les panneaux solaires ou photovoltaïques sont les éléments de base de tout système photovoltaïque. Ils sont constitués de cellules photosensibles reliées entre elles. Chaque cellule convertit les rayons provenant du Soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque.

Il existe plusieurs types de cellules qui se différencient par les matériaux utilisés pour les construire. Actuellement sur le marché, les trois technologies majoritairement présentes et reconnues sont le monocristallin, le polycristallin et l'amorphe. Parfois l'appréciation et le choix d'un type de panneaux pour un système photovoltaïque spécifique est difficile.

C'est dans ce contexte que se situe notre travail réalisé à l'Université Al akhawayn qui s'est dotée d'une installation photovoltaïque hybride raccordé au réseau, composée de trois types de technologies le monocristallin, le polycristallin et l'amorphe. Notre objective consiste à analyser expérimentalement les performances des trois types de générateur photovoltaïque

puis comparer le rendement des différents technologies dans le but de distinguer le mieux adapté aux conditions météorologiques de l'environnement d' Ifrane.

Dans cette optique, ce rapport est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre donne des notions sur l'énergie solaire et ses caractéristiques, l'énergie photovoltaïque ainsi que les différents types de systèmes photovoltaïques existants. Les avantages et les inconvénients du photovoltaïque sont cités et enfin le potentiel solaire au Maroc est décrit.

Le deuxième chapitre présente la définition et le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque, son rendement, les différents types de cellules disponibles, la modélisation mathématique de la cellule, l'effet des variations climatiques. Enfin, Les différents groupements possibles des cellules sont décrits ainsi que la modélisation du panneau ou générateur photovoltaïque (GPV).

Le troisième chapitre est consacré à l'étude du système photovoltaïque raccordé au réseau installé à l'Université Al Akhawayn . Une attention particulière a été dédiée à l'onduleur photovoltaïque

Le quatrième chapitre est dédié à l'étude comparative des performances des trois types de cellules photovoltaïques installé à Ifrane. En premier lieu la comparaison est effectuée par simulation via le logiciel Pvsyst, ensuite par analyse expérimentale du système photovoltaïque pour définir le type de panneau photovoltaïque le mieux adapté à la région d'Ifrane.

Finalement une conclusion générale achèvera notre rapport.

Chapitre I

L'Energie Solaire et les Systèmes Photovoltaïques

Vu le souci d'épuisement des réserves mondiales connues (pétrole, charbon, gaz, etc.), les crises économiques (flambée des prix du pétrole), les accidents des centrales nucléaires tels que ceux de Three Mile Island (USA, 1979) ou de Tchernobyl (URSS, 1986), le souci de pollution, le besoin sans cesse croissant en énergie, toutes ces perspectives renforcèrent l'intérêt du grand public envers les énergies renouvelables, en particulier l'énergie photovoltaïque, qui s'impose comme une des sources d'énergies renouvelables les plus prometteuses.
De par sa situation géographique, le Maroc dispose d'un important gisement solaire surtout dans le Sud du pays

1.1. Rayonnement Solaire

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à 1367W/m². La partie d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM. Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m2 et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m². En résumé, la constante solaire est le flux énergétique reçu par une surface unité. Dans notre cas, la valeur qui a été retenue en 1980 est: I0 = 1367 W/m²

1.2. Les Différents Types de Systèmes Photovoltaïques

1.2.1. Systèmes photovoltaïques autonomes

Une installation photovoltaïque autonome est une installation qui produit de l'électricité, mais qui fonctionne indépendamment du réseau électrique. Dans la majorité des cas, ce système est utilisé dans les sites isolés où il serait beaucoup trop coûteux de raccorder l'habitation ou le local que l'on souhaite alimenter en électricité. La différence majeure avec une installation photovoltaïque standard (raccordée au réseau), c'est la présence de batteries. Une installation photovoltaïque autonome doit être capable de fournir de l'énergie, y compris lorsqu'il n'y a plus de soleil. Il faut donc qu'une partie de la production journalière des modules photovoltaïques soit stockée.

Le système photovoltaïque du site isolé est composé de :

- **Panneau Photovoltaïque** : produire de l'énergie électrique à partir de la lumière.
- **Parafoudre *:*** protéger le système contre les surtensions d'origine atmosphérique comme la foudre.
- **Régulateur charge/décharge *:*** Il est installé entre la batterie et le panneau Photovoltaïque; Il sert à contrôler le courant qui rentre ou qui sort de la batterie afin d'éviter qu'elle ne soit endommagée par un excès de charge ou de décharge.

- **Onduleur :** L'onduleur convertit le courant continu sortant de la batterie en courant alternatif nécessaire au fonctionnement de la majorité des appareils électriques domestiques.
- **Batterie :** permet le stockage de l'énergie électrique à fin de garantir une autonomie du système dans les jours non ensoleillés.
- **Disjoncteur de protection :** C'est un disjoncteur à courant continu qui est installé entre le panneau Photovoltaïque et le régulateur pour isoler et protéger le système lors de la maintenance du panneau ou quand survient un défaut électrique.

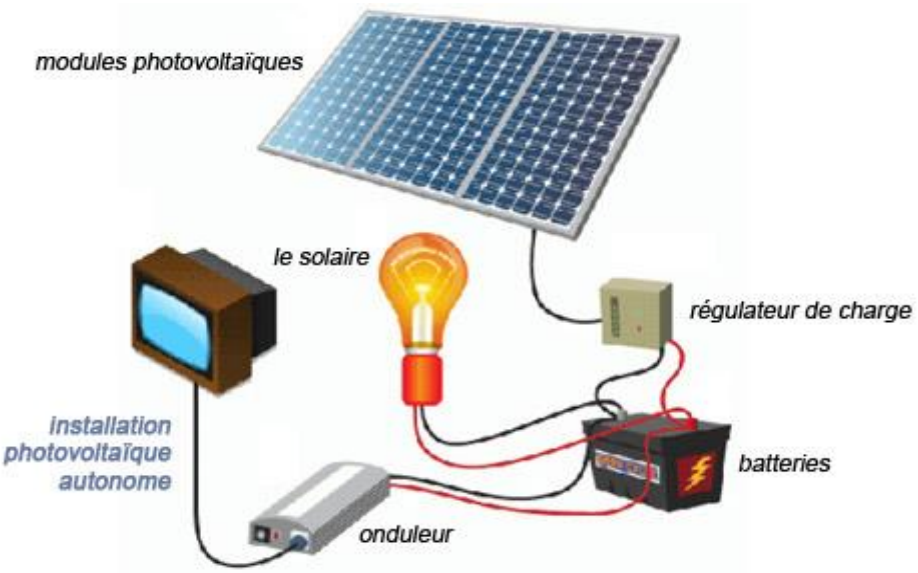


Figure 1: Schéma simplifié d'un système photovoltaïque autonome

1.2.2. Système photovoltaïque raccordé au réseau

Le système de production d'électricité photovoltaïque raccordé au réseau se compose de :

- **Les modules photovoltaïques** : C'est l'élément qui permet de convertir l'énergie du soleil en énergie électrique.
- **Les onduleurs** : Le rôle de l'onduleur est donc de convertir le courant continu CC fourni par les modules en courant alternatif CA utilisable par ces appareils. Le processus de conversion entraîne une perte d'énergie. Par conséquence, il convient de choisir un onduleur ayant une faible perte d'énergie (moins de 10%).
- **Dispositifs de protection** *:* Une application photovoltaïque exige des protections électriques. Cependant, elles doivent être conforment aux normes applicables à une installation électrique photovoltaïque. Les appareils électriques doivent être protégés par une mise à la terre, par des fusibles, disjoncteurs, parafoudres, interrupteurs, sectionneurs contre tous les défauts électriques pouvant survenir dans les circuits de l'application (surtension, surcharge, fuite de courant, court-circuit etc...).
- **Câblage électrique** *:* Câble en cuivre, connecteurs DC, boite de jonction ou boitier de raccordement constituent le câblage électrique du système photovoltaïque à raccorder à l'application. Le câblage doit faire l'objet d'une attention particulière car en basse tension toute chute de tension peut être préjudiciable au système. Il doit respecter les normes applicables aux installations photovoltaïques et être dimensionné en fonction du courant maximum admissible et de la chute de tension admissible.

- **Dispositifs de comptage** *:* Ces éléments permettent de quantifier la quantité d'énergie électrique injectée dans le réseau publique. On peut trouver à deux niveaux:

- Général, sur le tableau d'abonné.
- Individuel, après chaque onduleur ou groupe d'onduleurs ce qui permet une surveillance de la production, et par comparaisons, un bon fonctionnement de chaque zone.

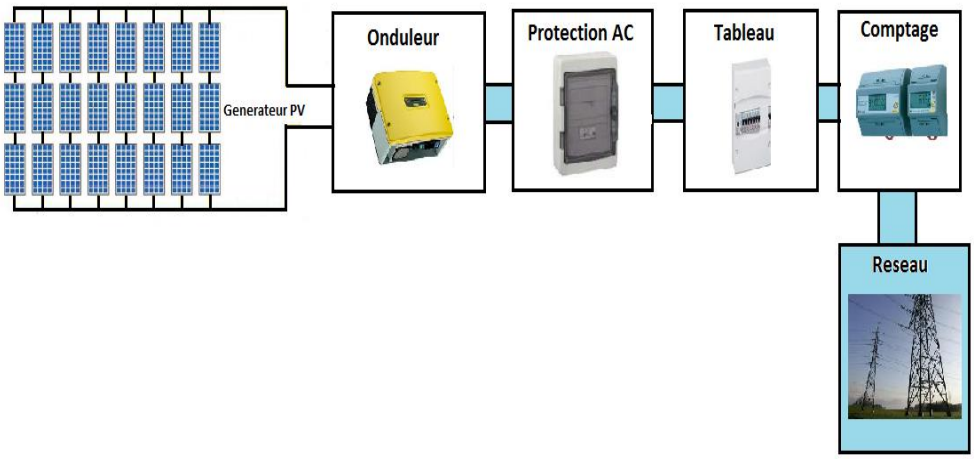


Figure 2: Schéma simplifié d'un système photovoltaïque raccordé au réseau

1.2.3. Les schémas de raccordement au réseau

Pour raccorder un système photovoltaïque au réseau de distribution électrique, il faut recourir à une des deux configurations suivantes :

- Injecter dans le réseau public, seulement l'excédent de la production non consommé pour ses besoins propres. Ainsi, ses utilisations seront directement alimentées par son générateur photovoltaïque.
- Injecter l'intégralité de l'électricité produite au réseau public. Le besoin en électricité sera alors couvert par la fourniture d'électricité par le distributeur.

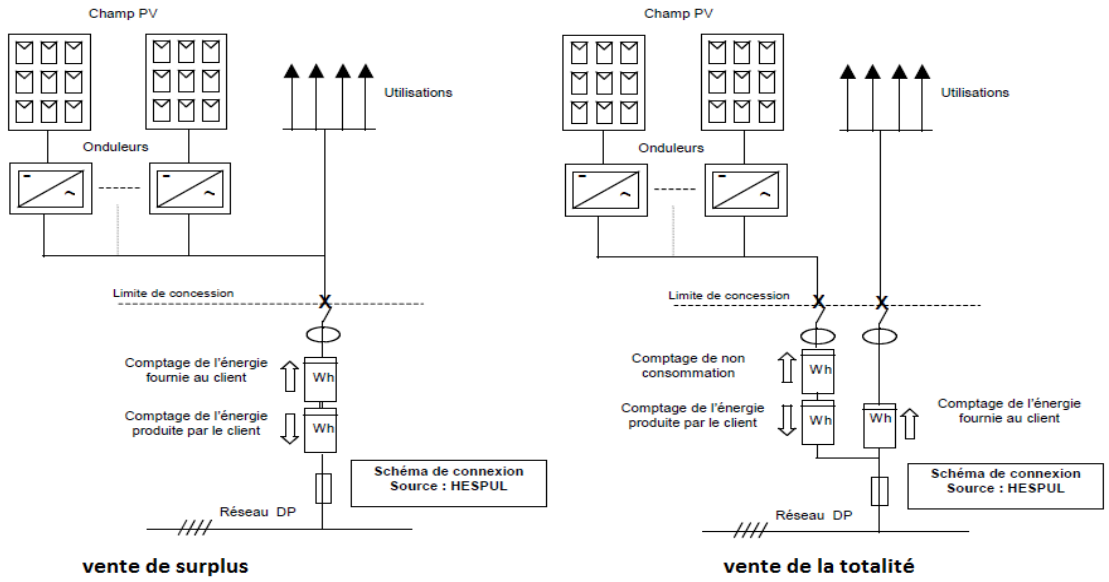


Figure 3: Les schémas de raccordement au réseau électrique

1.3. Avantages et Inconvénients de l'Énergie Photovoltaïque

1.3.1. Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

- une haute fiabilité (elle ne comporte pas de pièces mobiles), qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

- le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.

- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

- la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

1.3.2. Inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologique et requiert des investissements d'un coût élevé.

- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).

- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru.

1.4. Le Potentiel Solaire au Maroc

Le solaire est certainement la source d'énergie renouvelable la plus importante au Maroc. Avec plus de 3000 h/an d'ensoleillement, soit une irradiation de ~ 5 kWh/m2/jour, le Maroc jouit d'un gisement solaire considérable. Cette source d'énergie constitue un potentiel particulièrement important surtout dans les régions mal desservies en capacités de production électrique.

.

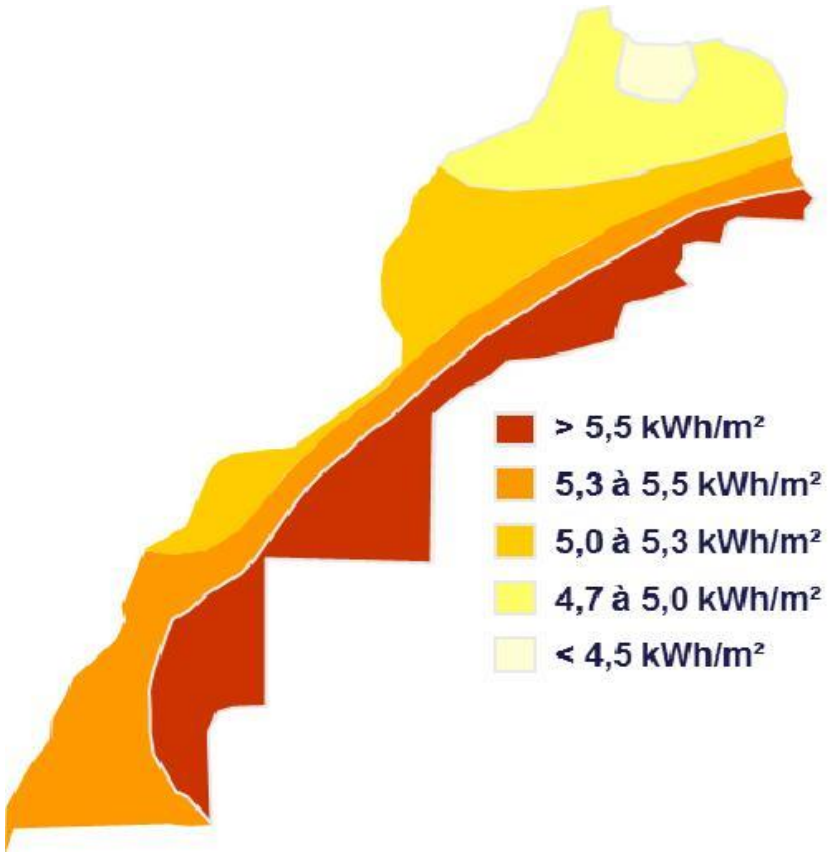


Figure 4 : Gisement solaire au Maroc

Les énergies renouvelables font partie des objectifs du millénaire que s'est fixé le Maroc: en 2020, le Maroc prévoit que la part de la puissance électrique installée en énergie renouvelable (éolien, solaire, hydraulique) s'établira à 42% du parc de production électrique total. L'Office National de l'électricité au Maroc a donc lancé un vaste projet faisant appel à l'énergie éolienne et au solaire, le but étant d'augmenter la production d'électricité pour le Maroc, mais aussi de vendre à l'Europe cette électricité verte. Le Plan Solaire Marocain, axe majeur de ce projet prévoit la construction d'une capacité de production électrique utilisant l'énergie solaire de 2 GW entre 2015 et 2019. Ce projet devrait permettre annuellement d'économiser en combustibles 1 million de tonne équivalent pétrole et d'éviter l'émission de 3,7 millions de tonnes de CO_2. Le projet marocain, comportera 5 complexes solaires répartis sur le territoire. Les 2 GW prévus correspondent à 38% de la puissance électrique totale installée actuellement au Maroc et l'objectif de la capacité de production de 4 500 GWh de ces 5 sites solaires correspond à 18% de la production nationale actuelle.

1.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu des notions sur l'énergie solaire et ses caractéristiques ainsi que les différents types de systèmes d'alimentations photovoltaïques existants et enfin le potentiel solaire au Maroc.

Chapitre II

La cellule photovoltaïque

Le Soleil fournit chaque année suffisamment d'énergie pour répondre plus de 7.500 fois aux besoins de la population mondiale. Progressivement, de nouvelles installations solaires voient le jour au Maroc pour tirer profit de cette ressource. La production d'électricité est assurée par des structures parfois épaisses de quelques micromètres seulement : les cellules photovoltaïques, cœur des panneaux solaires.

2.1. Définition

Les cellules photovoltaïques (photon : grain de lumière et volt : unité de tension) sont des composants électroniques à semi-conducteurs (généralement faites de silicium sous ses différentes formes). Elles convertissent directement l'énergie lumineuse en électricité courant continu basse tension (effet photovoltaïque). Comme l'énergie lumineuse est le soleil, on parle alors de cellules solaires.

Figure 5: Cellule photovoltaïque

2.2. Historique

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil. Les dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque sont :

1839:Découverte de l'effet photovoltaïque par le physicien français Edmond Becquerel.

1875:Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

1954:Trois chercheurs américains mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des nouvelles solutions pour l'alimentation des satellites.

1958:Une cellule avec un rendement de 9% est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973: La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

1983: La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000km en Australie.

Années 80: Exploitation des systèmes PV pour l'électrification et le pompage d'eau dans les zones isolées.

Fin des années 90: Exploitation du PV pour la production de l'électricité injectée au réseau dans plusieurs pays développés (Japon, Allemagne).

Années2000: Mise en place des politiques favorables pour le PV et la réalisation des centrales PV ayant des puissances de dizaines de MW.

2.3. Principe de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction PN a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel: le courant électrique circule . L'effet repose donc à la base sur les propriétés semi-conductrices du matériau et son dopage afin d'en améliorer la conductivité.

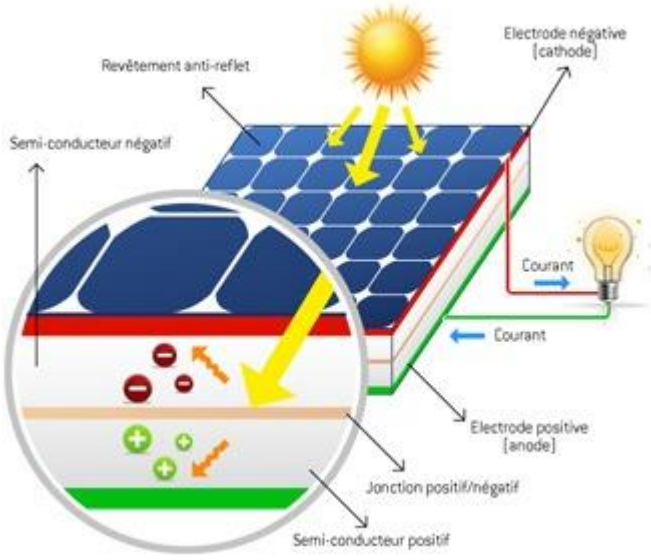


Figure 6 : Effet photovoltaïque dans un panneau photovoltaïque

2.4. Rendement Photovoltaïque

Le rendement photovoltaïque est un facteur très important pour les composants photovoltaïques, il se définie comme étant le taux de conversion d'énergie des cellules PV. Le rendement est aussi le pourcentage de l'énergie solaire qui est convertie en électricité par l'intermédiaire d'une cellule solaire. Il caractérise ces composants et définit leur performance.

Le rendement est fonction du type de semiconducteur utilisé et est directement lié au «band gap». Pour le silicium cristallin, le rendement théorique maximum est de 44 % . Le silicium n'est pas le meilleur matériau, son «band gap» est de 1.10 eV, celui de l'arséniure de gallium (GaAs) a un «band gap» quasi optimal de 1.4 eV. Le rendement commercial des cellules monocristallines est de l'ordre de 12 à 17 % maximum.

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre l'énergie électrique qu'elle fournit et l'énergie du rayonnement reçue, c'est-a-dire le rapport :

$$\eta = \frac{E\ électrique}{E\ lumineuse}$$

2.5. Les Différents Types de Cellules Photovoltaïques à base du cilisium

- **Cellules monocristallines** :ce sont des cellules élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal.

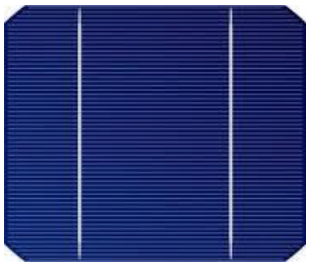


Figure 7: Cellule monocristalline

- **Cellules poly cristallines** : ce sont des cellules élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples, les cristaux sont orientés d'une manière aléatoire,

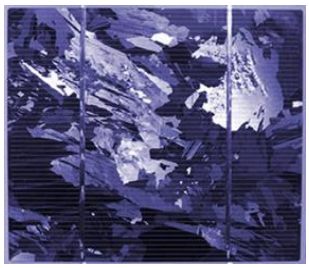


Figure 8: Cellule polycristalline

- **Cellules amorphes** : Ces cellules sont composées d'un support en verre ou en matière synthétique sur lequel est disposé une fine couche de silicium (l'organisation des atomes n'est plus régulière comme dans un cristal).

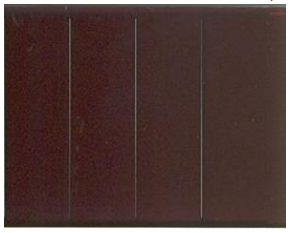


Figure 9: Cellule amorphe

2.6. Tableau comparatif des différents types de cellules photovoltaïques

Technologie	Monocristallin	Polycristallin	Amorphe
Rendement	Très bon rendement : 14 à 20 %.	Bon rendement : 11 à 15 %.	Rendement faible : 5 à 9 %.
Durée de vie	importante (30 ans)	importante (30 ans)	importante (20 ans)
Coût de fabrication	élevé.	meilleur marché que les panneaux monocristallins	peu onéreux par rapport aux autres technologies
Puissance	100 à 150 Wc/m². 7 m²/kWc	100 Wc/m². 8 m²/kWc.	50 Wc/m². 16 m²/kWc.
Caractéristiques	-Rendement faible sous un faible éclairement. - Perte de rendement avec l'élévation de la température.	- Rendement faible sous un faible éclairement. - Perte de rendement avec l'élévation de la température.	- Fonctionnement correct avec un éclairement faible. - Peu sensible aux températures élevées. -Rendement faible en plein soleil. -Performances diminuant avec le temps.
Fabrication	-Elaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal - Couleur bleue uniforme.	-Elaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux. - Ces cellules sont bleues, mais non uniforme : on distingue des motifs créés par les différents cristaux.	Couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.
Par du marché	43 %	47 %	10 %

Figure 10 : Tableau comparatif des cellules photovoltaïques

Le tableau comparatif (figure 10) révèle que le monocristallin a un très bon rendement, mais aussi le plus chère, le polycristallin a un bon rendement et moins chère que le monocristallin, et enfin l'amorphe a un rendement faible en plein soleil mais son fonctionnement n'est pas sensible aux faibles éclairements.

2.7. Modélisation de la Cellule PV

2.7.1. Cellule PV idéale - Modèle simple

Dans une cellule solaire illuminée, il se crée des porteurs de charges libres. Le nombre de ces porteurs de charge est proportionnel à l'intensité du rayonnement incident. Il en est de même pour la photo courant à l'intérieur de la cellule. Par conséquent, une cellule PV idéale peut être représentée par le circuit électrique équivalent illustré sur la figure 11. Ce circuit est constitué d'une diode qui représente la jonction P-N de la cellule, et d'une source de courant constant dont l'amplitude du courant dépend de l'intensité du rayonnement. Une résistance ajustable est connectée à la cellule en guise de charge. L'utilisation du circuit électrique équivalent permet de modéliser les caractéristiques ou le comportement de la cellule PV

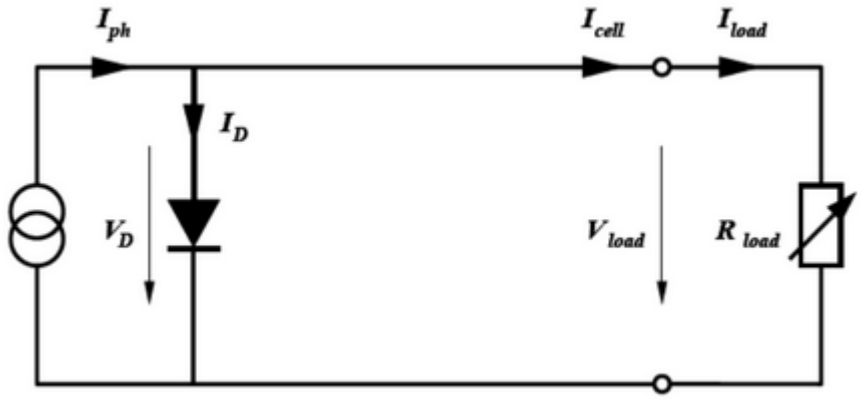


Figure 11: Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire idéale connectée à une charge.

avec :

I_{ph} : photo-courant — V_{cell} : tension aux bornes de la cellule

I_D : courant à travers la diode — I_{cell} : courant délivré par la cellule

I_{load} : courant à travers la charge — V_{load} : tension aux bornes de la charge

Le modèle mathématique d'une cellule PV idéale illuminée est donné par (Loi de Kirchoff)

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_s\left(e^{\left(\frac{q\,V_{cell}}{nkT}\right)} - 1\right) \qquad (2.1)$$

Icell : courant fourni par la cellule [A]

Vcell : tension aux bornes de la cellule [V]

q : charge électrique élémentaire [$1{,}6.10^{-19}$As]

k : constante de Boltzmann [$8{,}65.10^{-5}$eV/K = $1{:}381.10^{-23}$J/K]

T : température absolue de la cellule [K]

Is : courant de saturation de la jonction non éclairée [A]

n : facteur d'idéalité de la jonction

Le courant de saturation Is caractérise le phénomène de diffusion des porteurs minoritaires dans la zone de déplétion.

Lorsque les bornes du circuit sont court-circuité (Rload = 0), la tension de sortie est nulle et, d'après l'équation (2.1) , le courant fournit par la cellule est à son maximum. Ce courant est appelé courant de court-circuit Isc (short-circuit)

$$Isc = Iph \qquad (2.2)$$

Pour une charge infiniment grande (circuit ouvert), le courant de sortie est nul et la tension aux bornes de la cellule est maximale. Cette tension est appelée tension de circuit ouvert Voc (open circuit). A partir de l'équation (2.1), on peut écrire :

$$Voc = \frac{nkT}{q} ln\left(\frac{Iph}{Is} + 1\right) = Vth\, ln\left(\frac{Iph}{Is} + 1\right) \qquad (2.3)$$

$Vth = \frac{nkT}{q}$, est appelée tension thermique

Voc est déterminé par les propriétés du semi-conducteur, car il dépend de Is qui lui-même dépend de la densité de courant de saturation du matériau utilisé.

2.7.2. Cellule PV réelle - Modèle précis

En ce qui concerne le comportement d'une cellule solaire réelle, deux résistances parasites sont prises en considération pour une description plus exacte

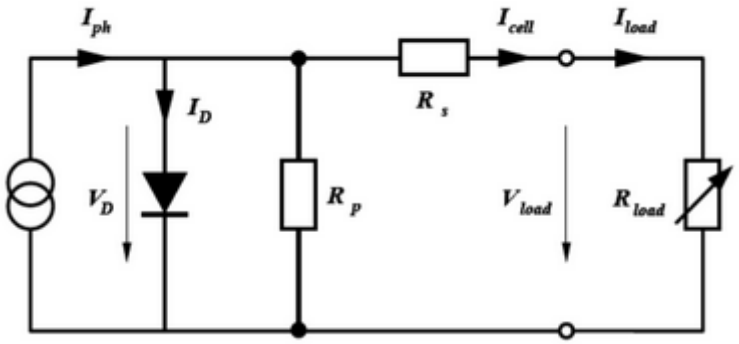


Figure12 : Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire réelle connectée à une charge

avec :

Rp résistance parallèle caractérisant le courant de fuite à la surface de la cellule dû au non idéalité de la jonction P-N et des impuretés près de la jonction.

Rs résistance série représentant les diverses résistances de contact et la résistance du semi-conducteur. En pratique, la résistance parallèle Rp est très importante (de l'ordre du méga Ohm) et la résistance série Rs est très faible (de l'ordre de quelques milli-ohms). Avec un tel circuit électrique équivalent, on peut écrire :

$$Icell = Iph - I_D - \frac{V_D}{Rp} \qquad (2.4)$$

$$I_D = Is\left(e^{\frac{V_D}{Vth}} - 1\right) \qquad (2.5)$$

$$V_D = V_{cell} + RsI_{cell} \quad (2.6)$$

$$D'où \quad Icell = Iph - Is(e^{\frac{(V_{cell} + RsI_{cell})}{Vth}} - 1) - \frac{V_{cell} + RsI_{cell}}{Rp} \quad (2.7)$$

2.7.3. La courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque

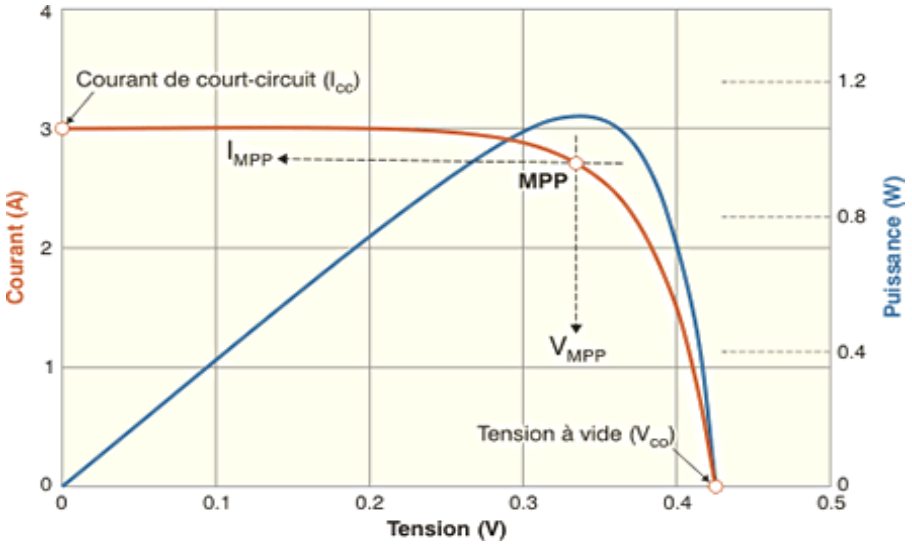


Figure 13 : Caractéristique courant-tension et puissance-tension d'une cellule PV

La cellule photovoltaïque peut être caractérisée par une courbe courant-tension qui représente les différentes configurations électriques que peut prendre la cellule.

On peut tirer trois grandeurs physiques de cette courbe :

- La tension à vide Vco : c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'il ne débite aucun courant.

- Le courant de court-circuit Icc : c'est le courant généré par la cellule lorsqu'elle est court-circuitée.

- Le point de puissance maximal MPP : (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimaux : Vopt, Iopt (parfois appelés aussi Vmpp, Impp).

Cette courbe nous permet de comparer l'efficacité de différentes cellules sous les conditions standard de test.

2.8. Effets des Variations Climatiques sur la Cellule Photovoltaïque

2.8.1. Variations de l'énergie incidente

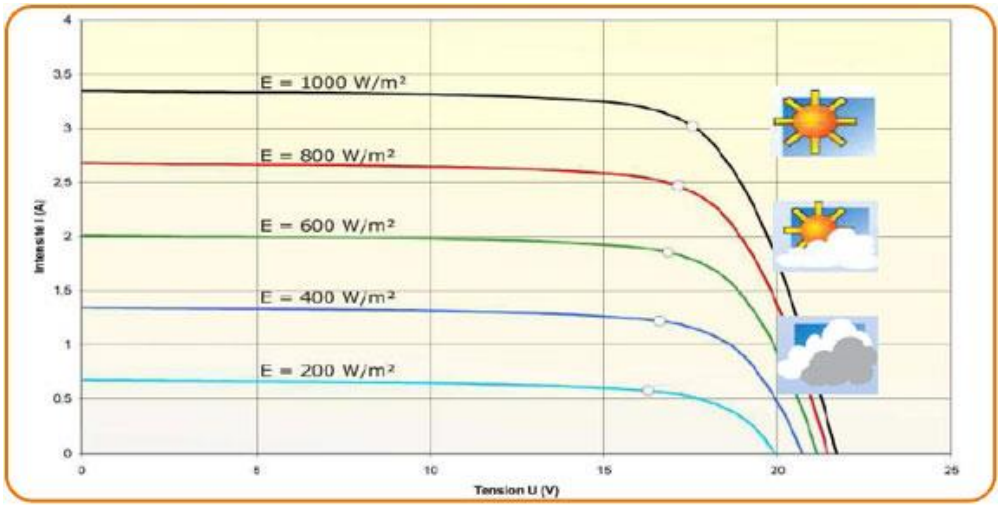


Figure14: Caractéristique courant-tension d'une cellule PV pour différentes valeurs d'intensité lumineuse

L'éclairement correspond à l'intensité lumineuse captée par le module photovoltaïque, et se mesure en W/m². La nuit, il est nul (0 W/m²), et il varie au cours de la journée entre 0 et 1 000 W/m² (valeur maximum), en fonction de la saison.

L'éclairement a une nette incidence sur la valeur de Icc. Lorsqu'il double, Icc double aussi. Il a très peu d'incidence sur la tension à vide Vco.

2.8.2. Variations de la température

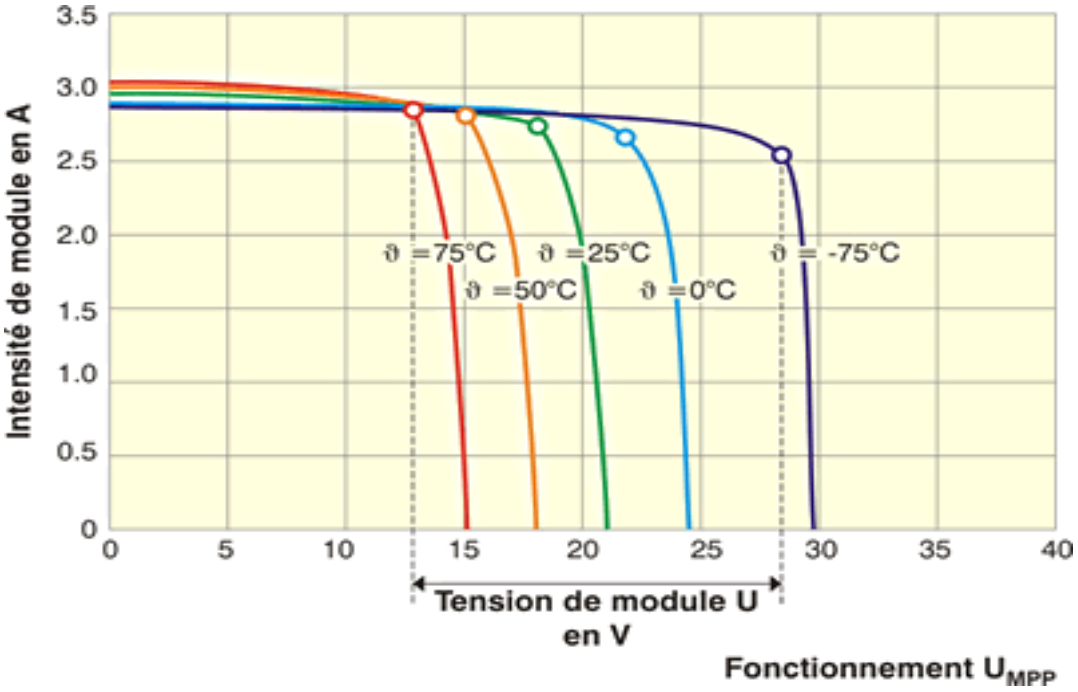


Figure 15 : Caractéristique courant-tension d'une cellule PV pour différentes valeurs de température

La température du module a une forte influence sur la tension à vide du module. Plus elle augmente, plus la tension à vide Vco diminue. Par contre, elle influence très peu le courant de court-circuit Icc. (Figure 15)

2.9. Générateur Photovoltaïque

Le terme générateur photovoltaïque GPV est utilisé pour désigner, selon l'application considérée, un module ou un panneau PV. Le générateur photovoltaïque est un ensemble de cellules photovoltaïques associées en série , en parallèle ou mixte.

2.9.1. Association en série

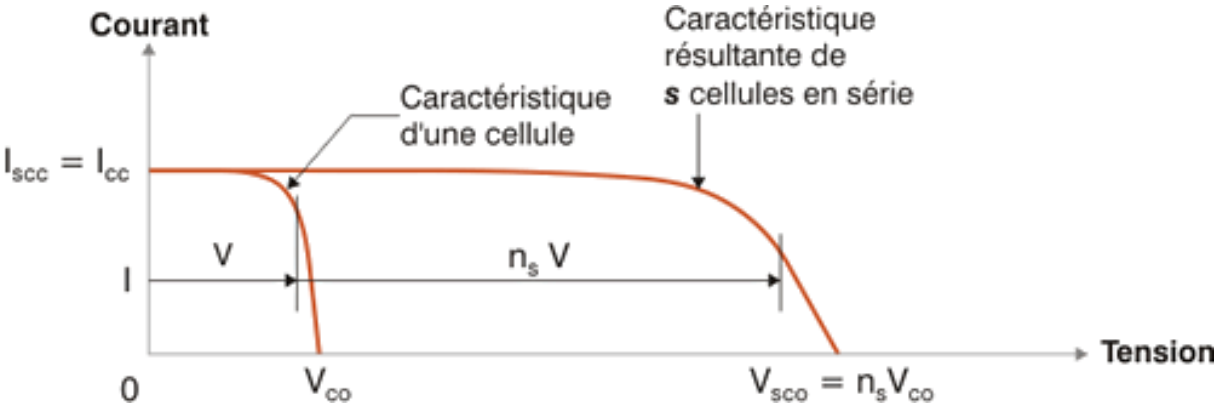


Figure 16: Caractéristique courant-tension de n cellules PV associées en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné.

2.9.2. Association en parallèle

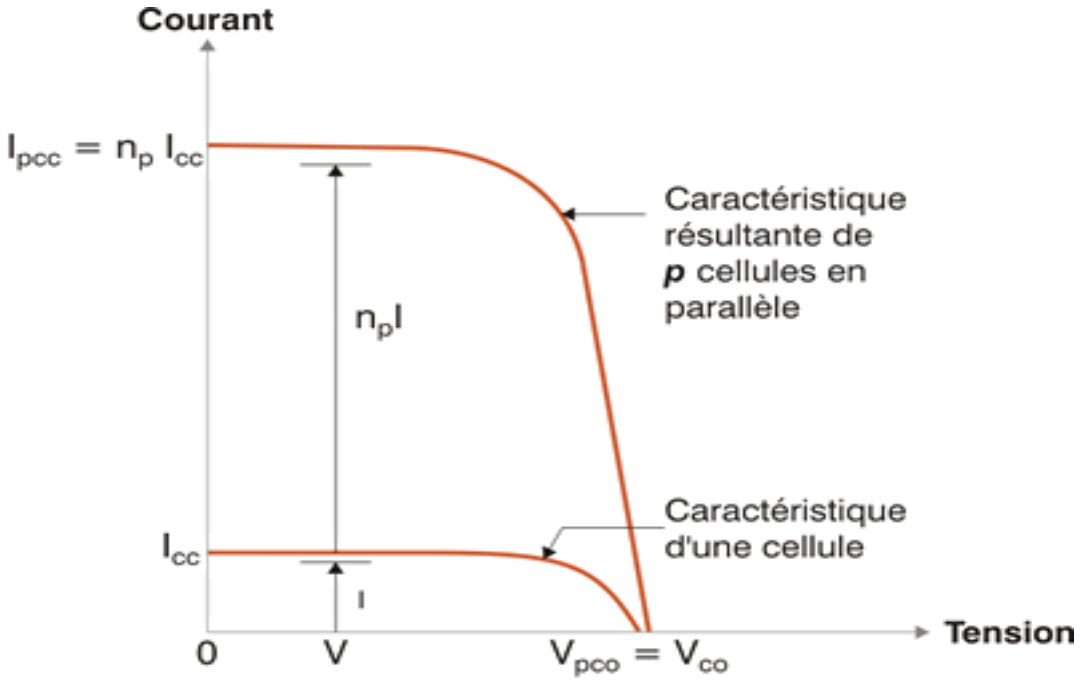


Figure 17: Caractéristique courant-tension de n cellules PV associées en parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle figure (17),les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée.

2.9.3. Association mixte

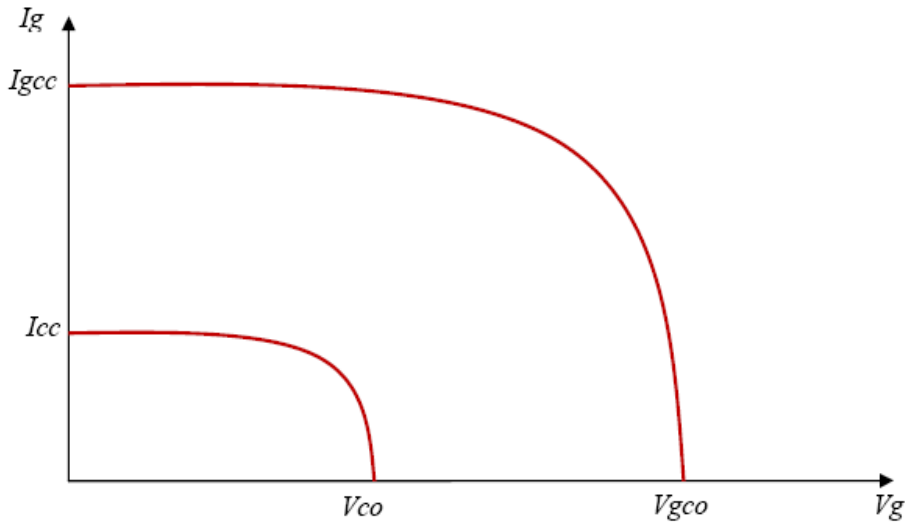


Figure18: Caractéristique courant-tension de n cellules PV associées en mixte

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules électrique globale courant/tension du GPV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport *ns* parallèlement à l'axe des tensions et de rapport np parallèlement à l'axe des courants, ainsi que l'illustre la figure **(**18**)**, ns *et* np étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et en parallèle.

Les générateurs photovoltaïques sont alors réalisés en vue d'augmenter la tension (Groupement en série**)** ou augmenter le courant (Groupement en parallèle) par l'association d'un grand nombre de cellules élémentaires de même technologie et de caractéristiques identiques. Le câblage série-parallèle est donc utilisé pour obtenir un module PV (ou panneau PV) aux caractéristiques souhaitées (courant et tension suffisants)

2.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vus la définition et le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque, son rendement, les différents types de cellules disponibles, la modélisation mathématique de la cellule, l'effet des variations climatiques. Enfin, Les différents groupements possibles des cellules sont décrits ainsi que le générateur photovoltaïque (GPV).

Chapitre III

Système photovoltaïque raccordée au réseau installé à l'université Al Akhawayn

Dans le cadre de sa formation en énergie renouvelable, L'Université Al Akhawayn dispose de différentes stations expérimentales dédiées à la recherche de pointe dans le domaine de l'énergie solaire, éolienne, biomasse, stockage d'énergie et efficacité énergétique, parmi lesquelles, une installation photovoltaïque expérimentale qui fera l'objet de notre étude.

Figure19 : Installation photovoltaïque installé à l'Université Al Akhawayn

3.1. Description de l'installation photovoltaïque

L'Université Al Akhawayn s'est équipé récemment d'une installation photovoltaïque au sol connectée au réseau, d'une puissance installée de 6KWc.
L'installation est orientée en plein sud et l'angle d'inclinaison des panneaux est de 32°. Elle est composée de trois chaînes de panneaux solaires, chacune de ces chaînes représente un type de cellules photovoltaïques: monocristallin, polycristallin et amorphe. La puissance installée de chaque chaîne est de 2KWc.
L'électricité est produite en courant continu par les modules, puis transformée en courant alternatif via trois onduleurs photovoltaïques connectés à chacune des chaînes. L'électricité, produite et injectée sur le réseau, est comptabilisée par un compteur de production électrique. L'intégralité de la production est injectée au réseau, l'électricité produite sera consommée sur place. En effet, comme l'électricité emprunte toujours le chemin le plus court, c'est l'utilisateur le plus proche qui bénéficie de l'électricité produite.

Cette installation photovoltaïque est dédiée à l'étude des performances des trois technologies; monocristalline, polycristalline et amorphe dans les conditions climatiques de la ville d'Ifrane, afin de repérer le type de panneaux solaire le mieux adapté à cette région.

3.2. Onduleur photovoltaïque

Les performances techniques et la fiabilité des onduleurs utilisés pour le raccordement des modules photovoltaïques systèmes au réseau de distribution d'électricité, sont des paramètres qui ont contribué très fortement à faire varier la production d'énergie électrique annuelle et donc la rentabilité financière du système.

Figure 20 : Principe d'un système photovoltaïque raccordé au réseau

3.2.1. Rôle

Cet appareil électronique, géré par un microprocesseur, garantit que le courant produit répond exactement aux normes fixées par le gestionnaire du réseau. Il est responsable de la stabilité du courant (voltage, fréquence, émission d'harmoniques, etc.) et assure la sécurité du système (protection de découplage

3.2.2. Caractéristiques

L'onduleur se présente sous la forme d'un boîtier métallique de petite dimension, muni d'un radiateur ou d'un ventilateur. Il doit être placé sur un support vertical dans un espace ventilé et le plus près possible des modules photovoltaïques afin de limiter les pertes d'électricité en ligne. Il n'émet aucun bruit et le champ électromagnétique est très faible, inférieur à celui d'une plaque à induction. L'onduleur a une durée de vie limitée de 8 à 10 ans,

Figure 21 : Onduleur Sunny Boy 2100TL

On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW).

Les onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques sont différents des onduleurs classiques utilisés en électrotechnique. En effet, en plus de l'objectif de conversion DC/AC, la principale caractéristique de l'onduleur photovoltaïque est la recherche du meilleur point de fonctionnement du système, appelé MPPT.

MPPT est l'abréviation de "Maximal Power Point Tracking", qui signifie en Français « Recherche du Point de Puissance Maximum». Les onduleurs photovoltaïques disposent d'un système intégré permettant de détecter et de se caler sur le point de puissance maximum du groupe photovoltaïque. Le MPPT force donc le générateur à travailler à son Maximum Power Point (MPP), induisant une amélioration globale du rendement du système de conversion

électrique. Cependant, le système MPPT ne fonctionne que pour une plage de tension d'entrée d'onduleur définie par le fabricant. Lorsque la tension d'entrée de l'onduleur côté DC est inférieure à la tension minimale MPPT, l'onduleur continue de fonctionner mais fournit au réseau la puissance correspondante à la tension minimale MPPT.
La figure 20 illustre la notion de point de puissance maximum d'un groupe photovoltaïque

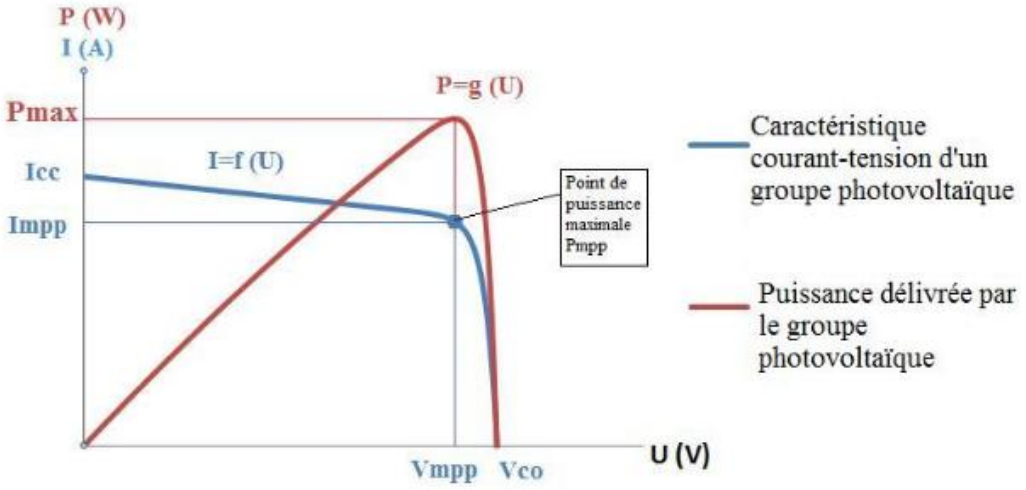


Figure 22 : Le Point MPPT pour un onduleur

3.2.3. Méthodes de recherche du point de puissance maximale

L'unité de régulation de l'onduleur assure un fonctionnement du générateur PV au point de fonctionnement optimal (point de puissance maximale ou MPP) pour garantir une production de puissance électrique maximale. Il existe environ une vingtaine de méthodes de recherche du point de puissance maximale d'un champ de modules (Maximum Power Point Tracking), dont l'efficacité et la rapidité varient.

Les deux méthodes les plus couramment rencontrées sont celles dites du **Hill-Climbing** et du **P&O (Perturb and Observe)**. Ces deux méthodes fonctionnent sur le même principe qui consiste à perturber le fonctionnement du système et à analyser ensuite comment le système réagit à cette perturbation : modification du rapport cyclique de hachage pour la méthode de Hill-Climbing, modification de la tension aux bornes du champ de modules photovoltaïques pour la méthode P&O. Le fait de modifier le rendement de conversion de l'onduleur perturbe le courant continu issu des modules et par conséquent la tension à leurs bornes et la puissance instantanée délivrée.

Ces deux méthodes sont donc basées sur le contrôle de la puissance instantanée délivrée par le champ de modules PV en fonction de variations de la tension continue aux bornes du champ PV.

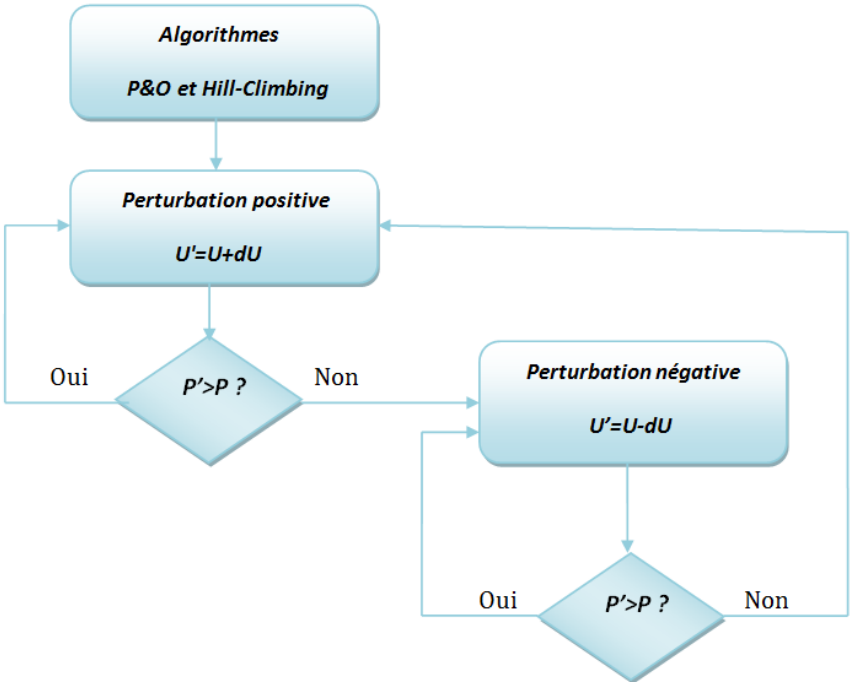


Figure 23: L'algorithme des méthodes de Hill-Climbing et P&O

3.3. Extraction des données de l'installation photovoltaïque

Pour analyser les performances de l'installation photovoltaïque, il faut avoir les données concernant la puissance et l'énergie électrique générée par cette installation, ces données résident dans l'onduleur, l'extraction de ces données se fait via une connexion Bluetooth et un logiciel appelé « SUNNY EXPLORER ».

Pour avoir accès aux données de l'installation photovoltaïque, on doit se positionner au voisinage de l'installation photovoltaïque pour garantir la connexion avec les onduleurs, puis on ouvre le logiciel « SUNNY EXPLORER ». La fenêtre **Assistant de l'installation** s'affiche

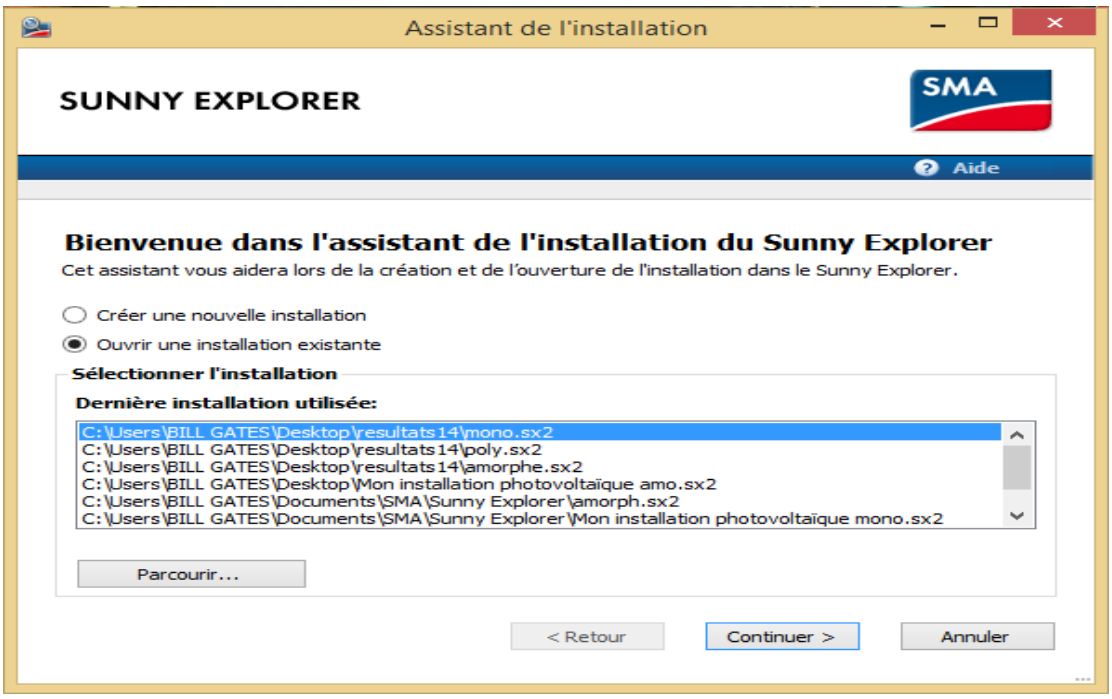


Figure 24: Assistant de l'installation du Sunny Explorer

Deux cas se présentent :

- Créer une nouvelle installation si on veut extraire les données pour la première fois, sinon
- Ouvrir une installation existante.

Après avoir choisir l'une des options précédentes, on clique sur le bouton « continuer » ; le logiciel cherche à détecter les onduleurs se trouvant à son voisinage.
Une fois les onduleurs sont détectés, une nouvelle fenêtre s'affiche indiquant les numéros de séries de ces onduleurs, on choisit le numéro de série de l'onduleur spécifié, puis on saisit le mot de passe qui permet d'accéder aux données résidant dans l'onduleur, et on clique sur le bouton « continuer ». La fenêtre suivante s'affiche :

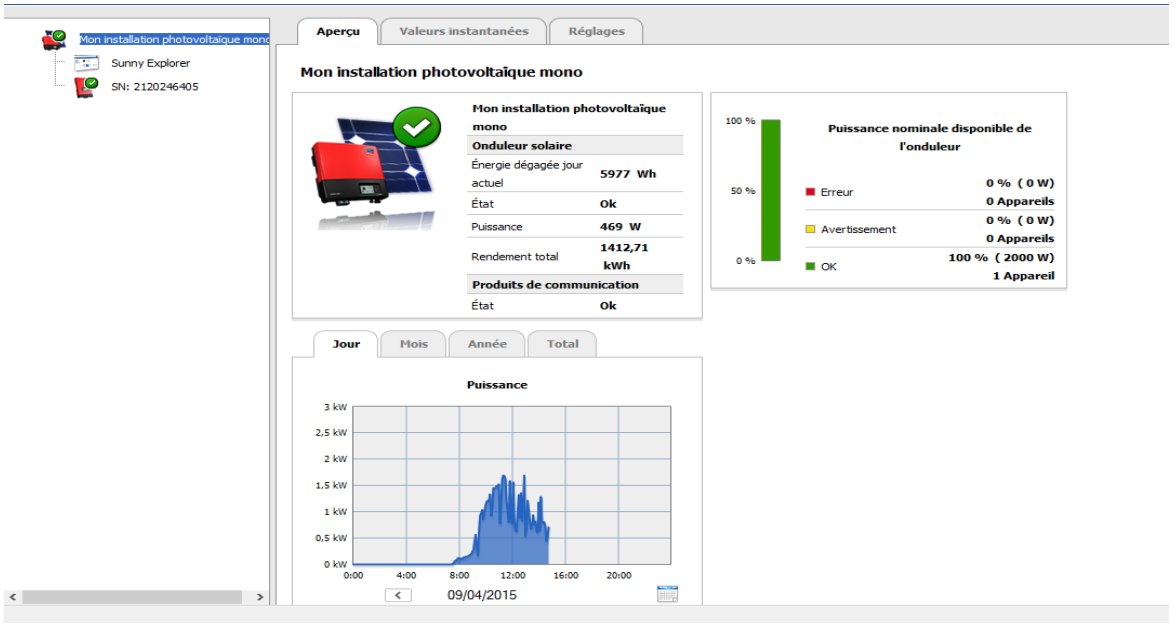


Figure 25: Données générales de l'installation photovoltaïque

Sur cette fenêtre, nous observons l'évolution de la puissance électrique instantanée générée par la chaîne photovoltaïque spécifiée durant une journée ainsi que l'énergie électrique produit pendant cette journée et celle produit depuis le premier jour du fonctionnement.

Nous avons accès aussi aux valeurs instantanés du courant, tension et de la puissance électrique avant et après l'onduleur comme illustrés dans les deux fenêtres suivantes :

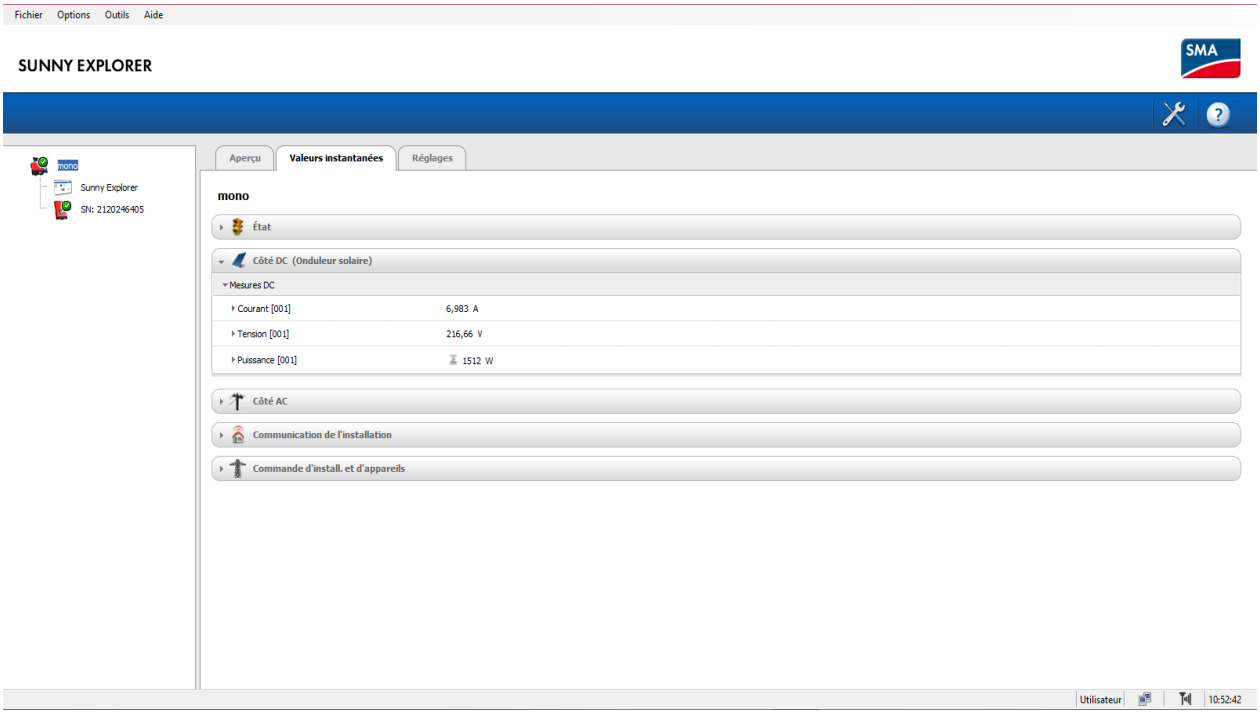


Figure 26: Données de l'installation photovoltaïque côté DC

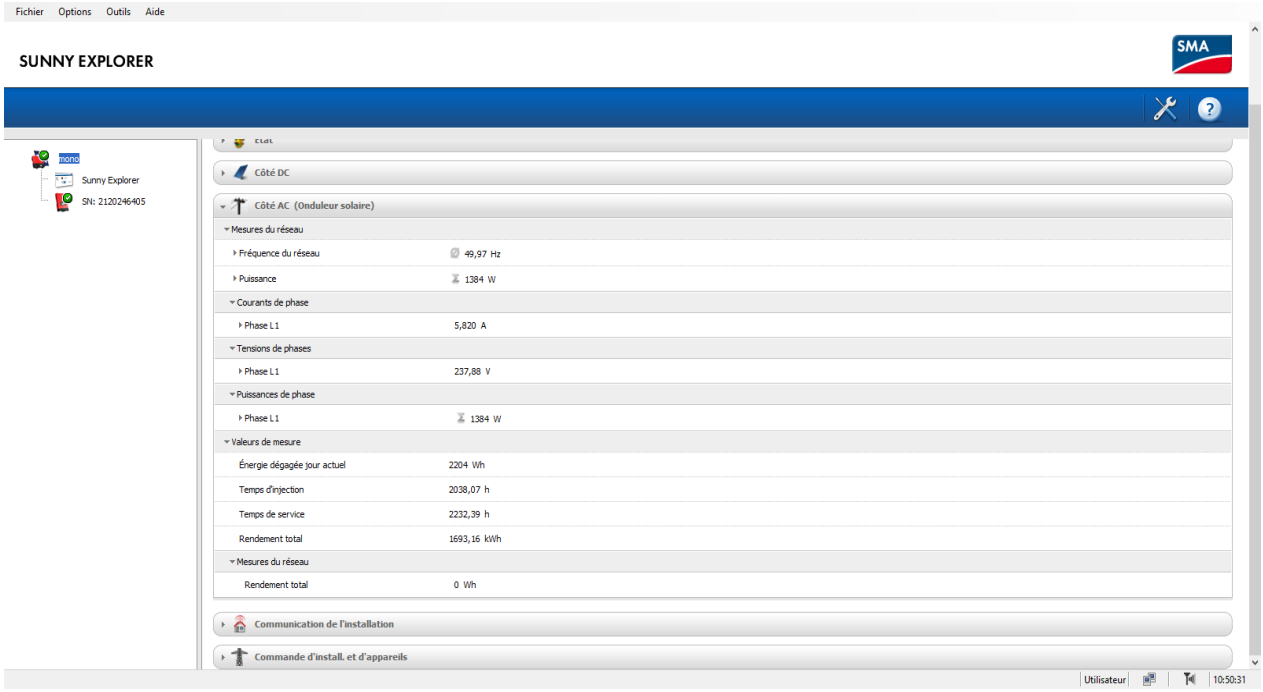


Figure 27: Données de l'installation photovoltaïque côté AC

3.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'installation photovoltaïque implantée à l'Université Al Akhawayn. Nous avons exposé aussi le principe de fonctionnement de l'onduleur photovoltaïque, ainsi que la méthode d'extraction des données permettant l'analyse les performances de l'installation photovoltaïque, qui fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre IV

Etude comparative des panneaux photovoltaïques à Ifrane

Ce chapitre est destiné à l'étude comparative des performances des panneaux monocristallins, polycristallins et amorphe du système photovoltaïque installé à l'université Al Akhawayn. En premier lieu la comparaison est effectuée par simulation via le logiciel Pvsyst, ensuite par analyse expérimentale du système photovoltaïque pour déterminer le type de panneau photovoltaïque le mieux adapté à la région d'Ifrane.

4.1. Logiciel de simulation PVSyst

Le programme PVSyst est un logiciel de simulation de systèmes photovoltaïques, développé initialement par le Groupe de Physique Appliquée (GAP) de l'Université de Genève. Ce logiciel intègre des fonctions dont les qualités scientifiques sont largement reconnues, simple à utiliser ce qui le rend accessible à un large public (architectes, étudiants, installateurs).

La simulation à base du logiciel PVSyst suit l'organigramme suivant :

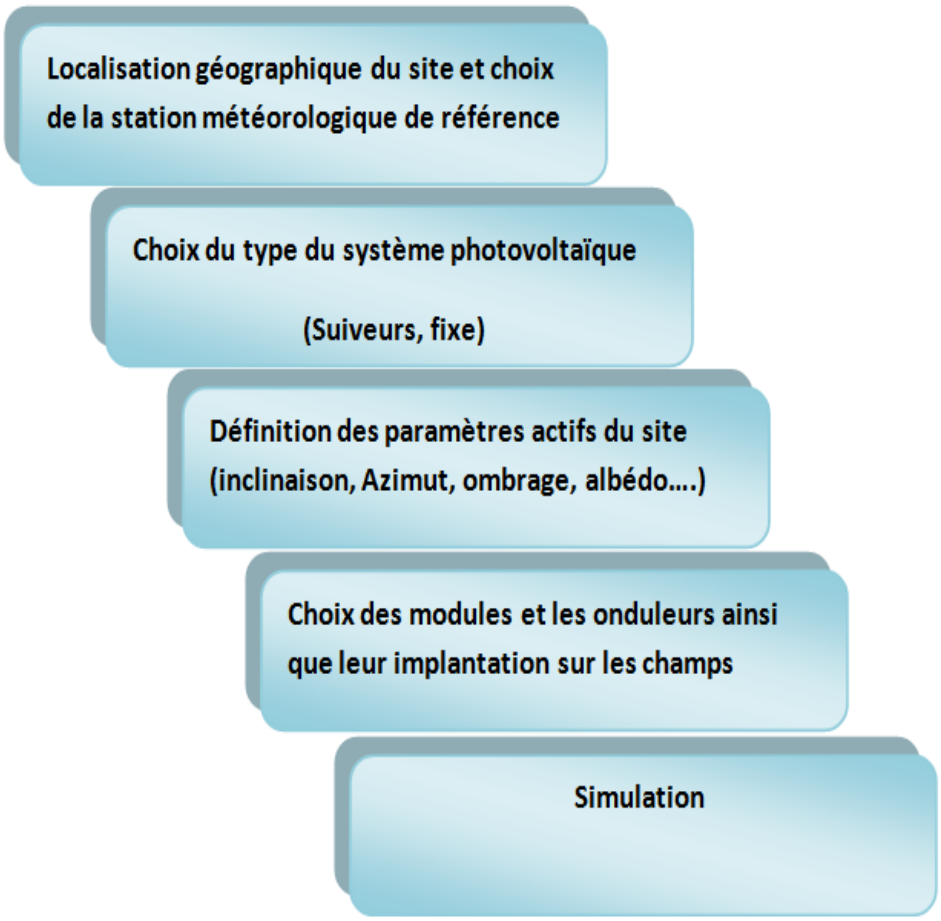


Figure 28 : Les étapes de simulation avec PVsyst

4.1.1. Localisation du site

Les données météorologiques du site du projet lors de la simulation avec le logiciel PVSyst sont obligatoires. Il faut donc localiser au préalable le site géographique du projet, la région d'Ifrane dans notre cas, afin de lui associer les données climatiques appropriés.

On lance le logiciel PVSyst, l'interface suivante s'affiche :

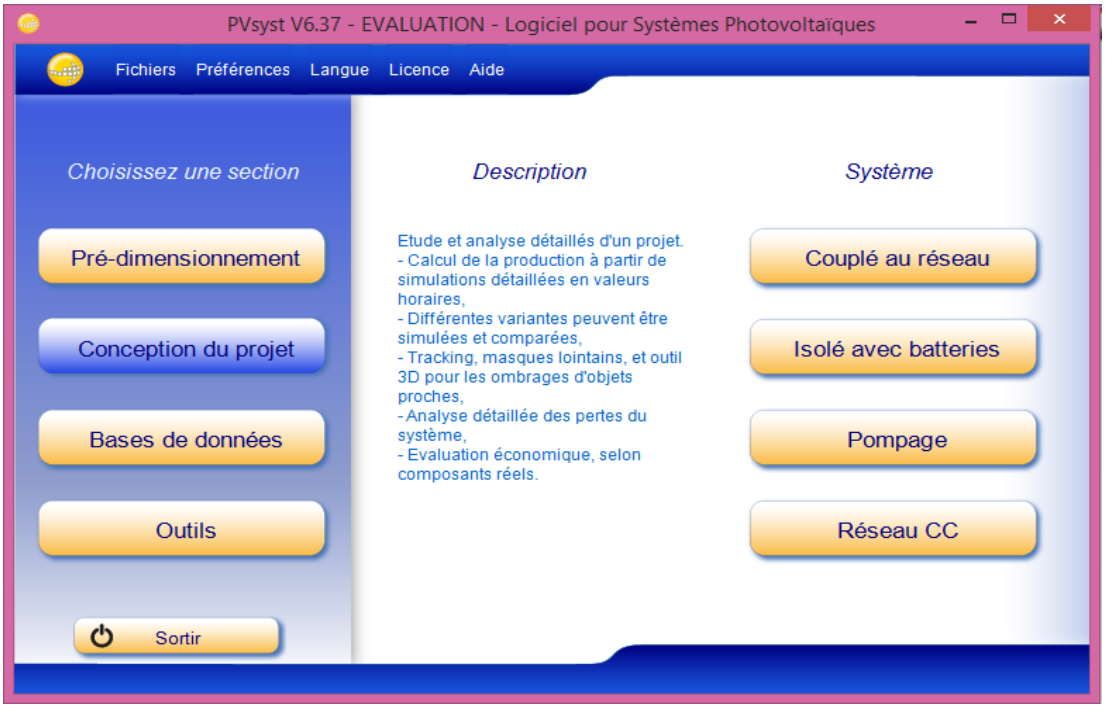


Figure 29: Interface du logiciel PVSyst

L'interface offre plusieurs possibilités, on choisit la conception du projet.

Puisque le système étudié est connecté au réseau, on choisit l'option « Couplé au réseau » ensuite on localise le site du projet en utilisant la carte interactive, une fois le site est localisé ses coordonnées géographiques s'affichent à côté de la carte comme illustré sur la fenêtre suivante :

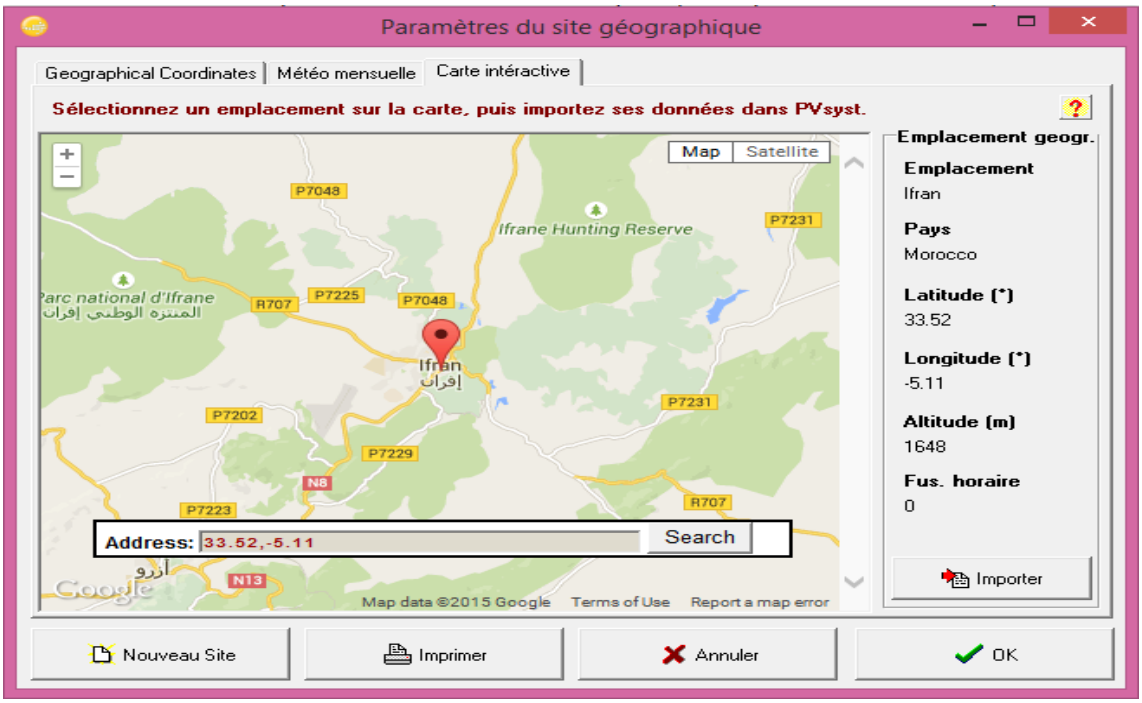


Figure 30: Carte interactive

4.1.2. Données météorologiques du site

Apres avoir localisé le site, on clique sur le bouton « importer » pour importer les données météorologiques du site dans PVSyst, ces données mensuelles représentent l'irradiation et la température moyenne :

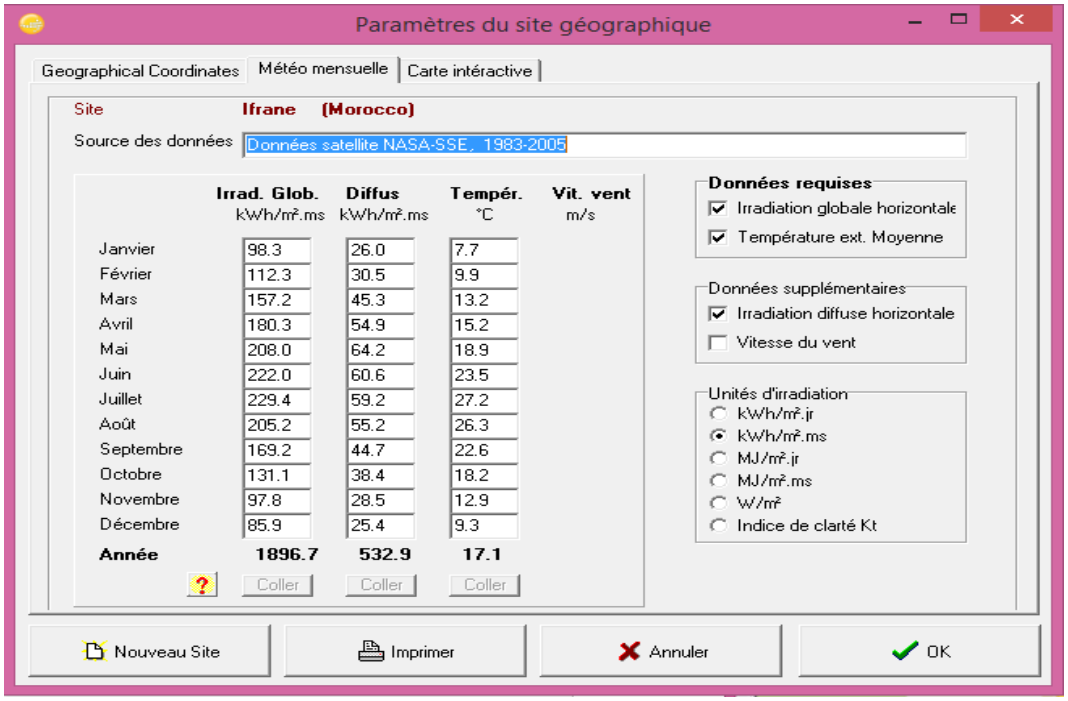


Figure 31: Paramètres du site géographique

4.1.3. Définition des paramètres du système

Après la définition des paramètres géographiques du site, on précise les paramètres actifs du site (inclinaison, Azimut,…) :

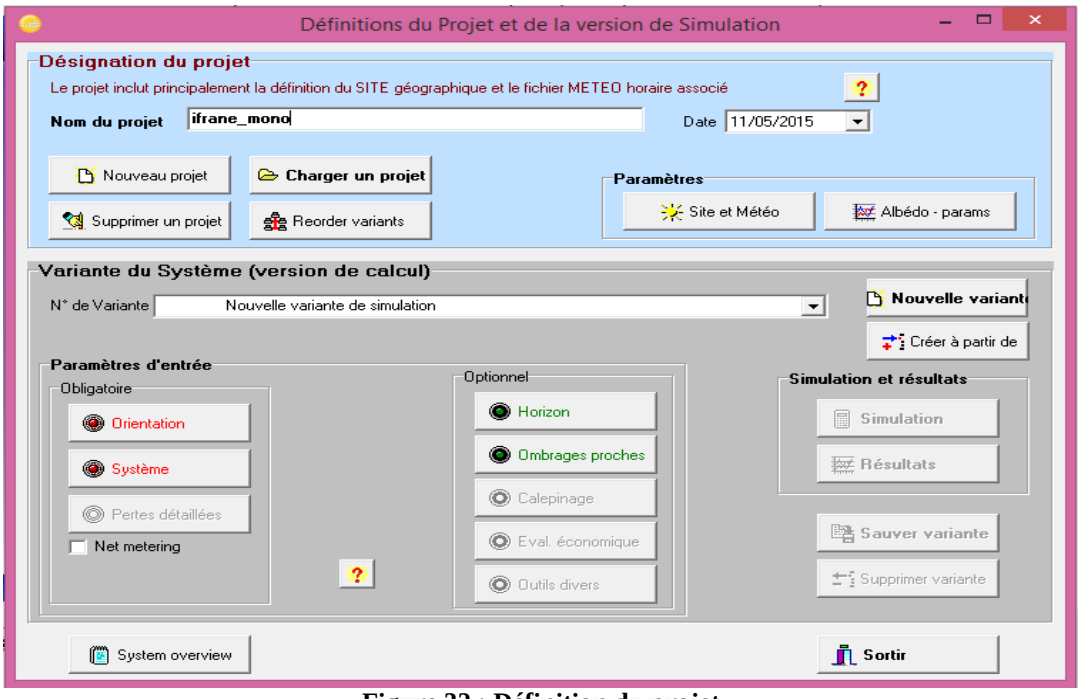


Figure 32 : Définition du projet

Le système PV installé à Alkawayn est orienté en plein sud (Azimut=0°) , l'angle d'inclinaison est de 32 ° et la période considéré pour la simulation est « Hiver(oct-Mars) ».

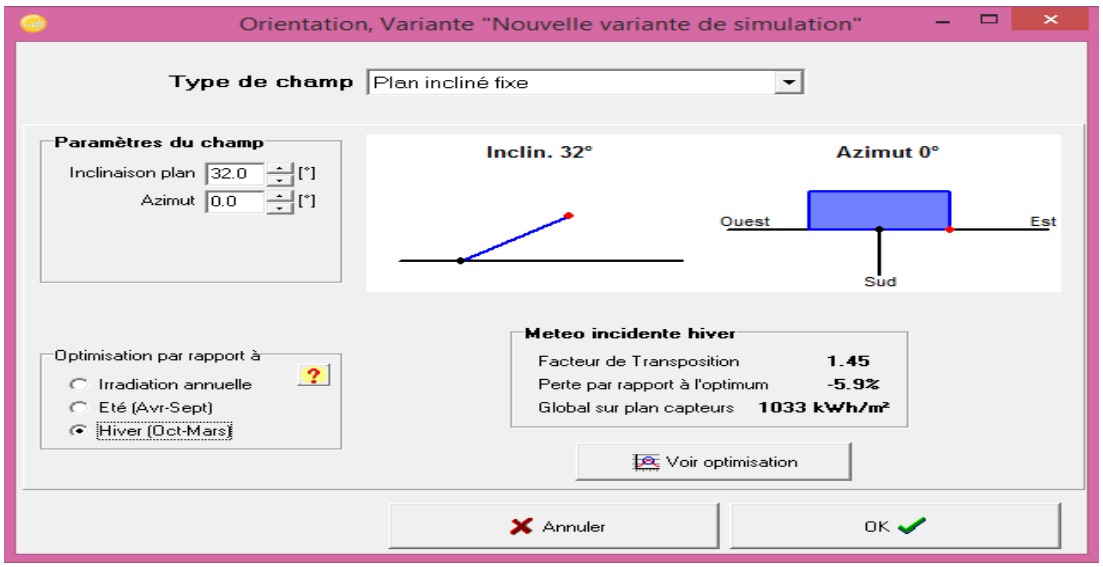


Figure 33: Orientation et inclinaison du système PV

Ensuite, on précise les caractéristiques des panneaux solaires de système PV :

- Marque de panneau : SolarWorld
- Nombre de modules : 8
- Surface modules : 13m^2
- Puissance PV nominale : 2 kWp.
- …….

On caractérise également les onduleurs,

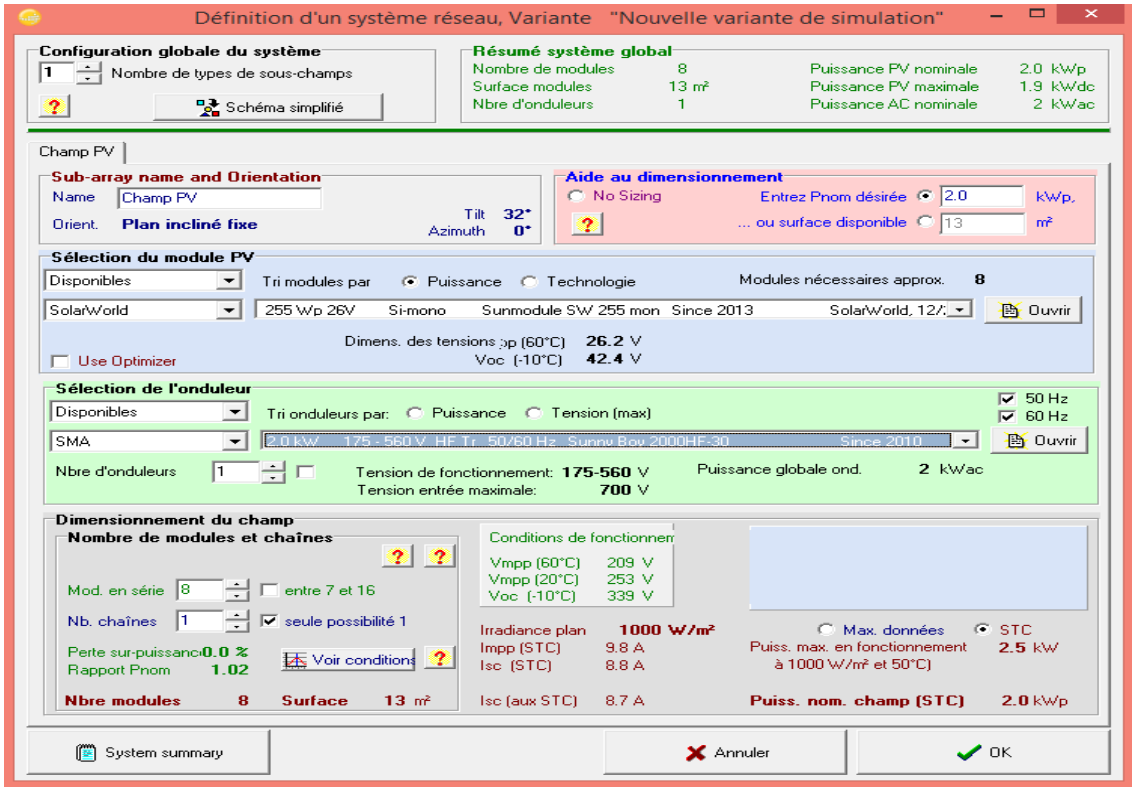


Figure 34: Dimensionnement des onduleurs et des panneaux PV

Après avoir localisé et importé les données météorologiques du site dans PVSyst, et aussi caractérisé le système PV, on lance la simulation pour les trois types des panneaux PV.

4.1.4. Résultats de simulation pour l'installation monocristalline

Le rapport de simulation est composé de trois pages. La première page représente les paramètres de simulation : site géographique du projet, données météorologiques, orientation, inclinaison… .

PVSYST V6.37 | 11/05/15 | Page 1/3

Système couplé au réseau: Paramètres de simulation

Projet : ifrane_mono

Site géographique	**Ifrane**		Pays	**Morocco**
Situation	Latitude	33.5°N	Longitude	5.1°W
Temps défini comme	Temps légal	Fus. horaire TU	Altitude	1648 m
	Albédo	0.20		
Données météo:	**Ifrane**	Synthétique - Meteonorm 7.1 (1986-2005), Sat=100%		

Variante de simulation : **Nouvelle variante de simulation**

Date de la simulation 11/05/15 à 11h25

Paramètres de simulation

Orientation plan capteurs	Inclinaison	32°	Azimut	0°
Modèles utilisés	Transposition	Perez	Diffus	Erbs, Meteonorm
Horizon	Pas d'horizon			
Ombrages proches	Sans ombrages			

Caractéristiques du champ de capteurs

Module PV	Si-mono	Modèle	**Sunmodule SW 255 mono black**	
		Fabricant	SolarWorld	
Nombre de modules PV		En série	8 modules	En parallèle 1 chaînes
Nombre total de modules PV		Nbre modules	8	Puissance unitaire 255 Wc
Puissance globale du champ		Nominale (STC)	**2040 Wc**	Aux cond. de fonct. 1822 Wc (50°C)
Caractéristiques de fonct. du champ (50°C)		U mpp	220 V	I mpp 8.3 A
Surface totale		Surface modules	**13.4 m²**	

Onduleur		Modèle	**Sunny Boy 2000HF-30**	
		Fabricant	SMA	
Caractéristiques	Tension de fonctionnement		175-560 V	Puissance unitaire 2.00 kWac
Batterie d'onduleurs		Nbre d'onduleurs	1 unités	Puissance totale 2.0 kWac

Facteurs de perte du champ PV

Fact. de pertes thermiques	Uc (const)	20.0 W/m²K	Uv (vent)	0.0 W/m²K / m/s
Perte ohmique de câblage	Rés. globale champ	451 mOhm	Frac. pertes	1.5 % aux STC
Perte de qualité module			Frac. pertes	-0.5 %
Perte de "mismatch" modules			Frac. pertes	1.0 % au MPP
Effet d'incidence, paramétrisation ASHRAE	IAM =	1 - bo (1/cos i - 1)	Param. bo	0.05

Besoins de l'utilisateur : Charge illimitée (réseau)

PVsyst Evaluation mode

Figure 35: Paramètres de simulation de la chaîne monocristalline

La deuxième page du rapport indique les résultats de la simulation : énergie électrique produite par le système pendant un an, ainsi que le bilan qui regroupe les résultats de l'irradiation mensuelle, la température moyenne mensuelle, l'énergie électrique en sortie du champ et l'énergie électrique injectée au réseau.

Système couplé au réseau: Résultats principaux

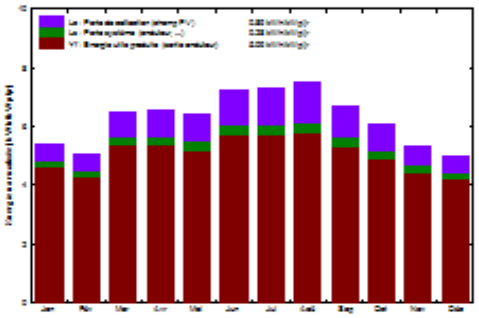
Projet : ifrane_mono
Variante de simulation : Nouvelle variante de simulation

Principaux paramètres système	Type de système	**Couplé au réseau**			
Orientation plan capteurs	inclinaison	32°	azimut	0°	
Modules PV	Modèle	Sunmodule SW 255 mono black		255 Wc	
Champ PV	Nombre de modules	8	Pnom total	**2040 Wc**	
Onduleur	Modèle	Sunny Boy 2000HF-30	Pnom	2000 W ac	
Besoins de l'utilisateur	Charge illimitée (réseau)				

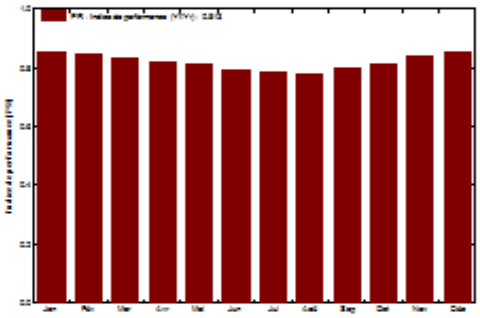
Principaux résultats de la simulation

Production du système	**Energie produite**	**3779 kWh/an**	Productible	1853 kWh/kWc/an
	Indice de performance (PR)	81.3 %		

Productions normalisées (par kWp installé): Puissance nominale 2040 Wc



Indice de performance (PR)



Nouvelle variante de simulation
Bilans et résultats principaux

	GlobHor kWh/m²	T Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray kWh	E_Grid kWh	EffArrR %	EffSysR %
Janvier	104.9	11.60	167.9	164.2	307.0	292.0	13.63	12.97
Février	103.4	13.00	141.6	138.2	257.4	243.8	13.56	12.84
Mars	164.9	15.00	200.1	195.0	356.2	338.4	13.27	12.61
Avril	187.3	15.90	196.6	191.2	346.3	327.6	13.13	12.42
Mai	208.7	18.50	198.4	192.0	347.0	328.2	13.04	12.33
Juin	241.6	21.50	217.4	210.4	370.5	350.8	12.71	12.03
Juillet	246.2	23.30	226.9	220.0	382.4	362.3	12.56	11.91
Août	229.4	23.60	232.1	225.9	388.6	366.9	12.49	11.79
Septembre	175.0	21.70	201.2	196.1	344.4	326.0	12.76	12.08
Octobre	142.9	19.70	188.5	184.2	328.1	311.2	12.98	12.31
Novembre	104.0	15.30	159.8	156.2	288.0	273.1	13.43	12.74
Décembre	88.6	13.45	149.3	145.9	272.5	259.0	13.61	12.93
Année	1996.9	17.75	2279.8	2219.4	3988.5	3779.4	13.04	12.36

Légendes:
GlobHor Irradiation globale horizontale
T Amb Température ambiante
GlobInc Global incident plan capteurs
GlobEff Global "effectif", corr. pour IAM et ombrages
EArray Energie effective sortie champ
E_Grid Energie injectée dans le réseau
EffArrR Effic. Eout champ / surf. brute
EffSysR Effic. Eout système / surf. brute

Figure 36: Résultats de la simulation de la chaîne monocristalline

Alors que la troisième page du rapport évoque les pertes au niveau de l'irradiation, les pertes de l'énergie électrique au niveau des câbles qui relient les panneaux solaires, les pertes due à l'élévation de la température de l'installation PV, les pertes dues à la qualité des panneaux PV ainsi que les pertes au niveau de l'onduleur.

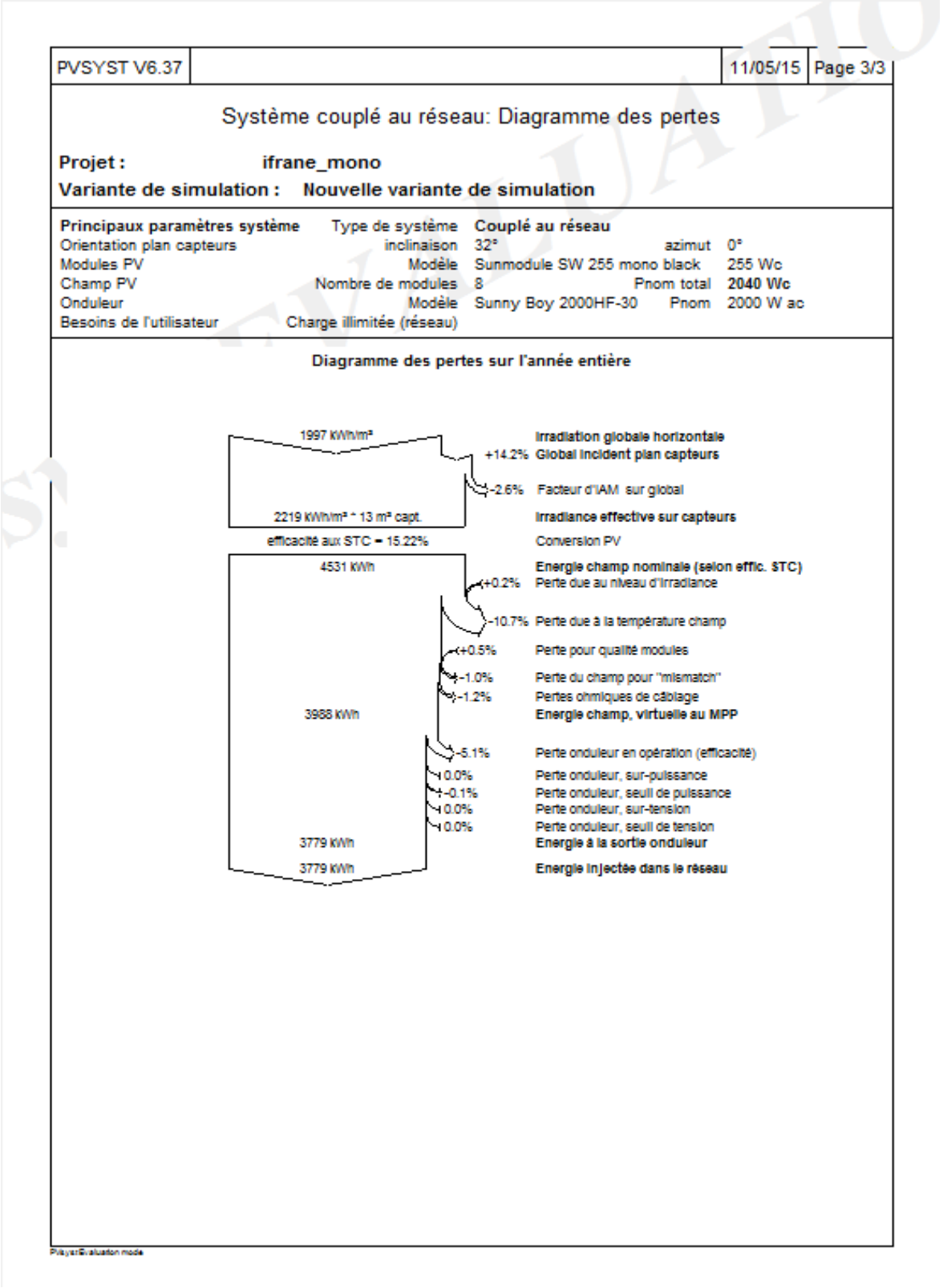
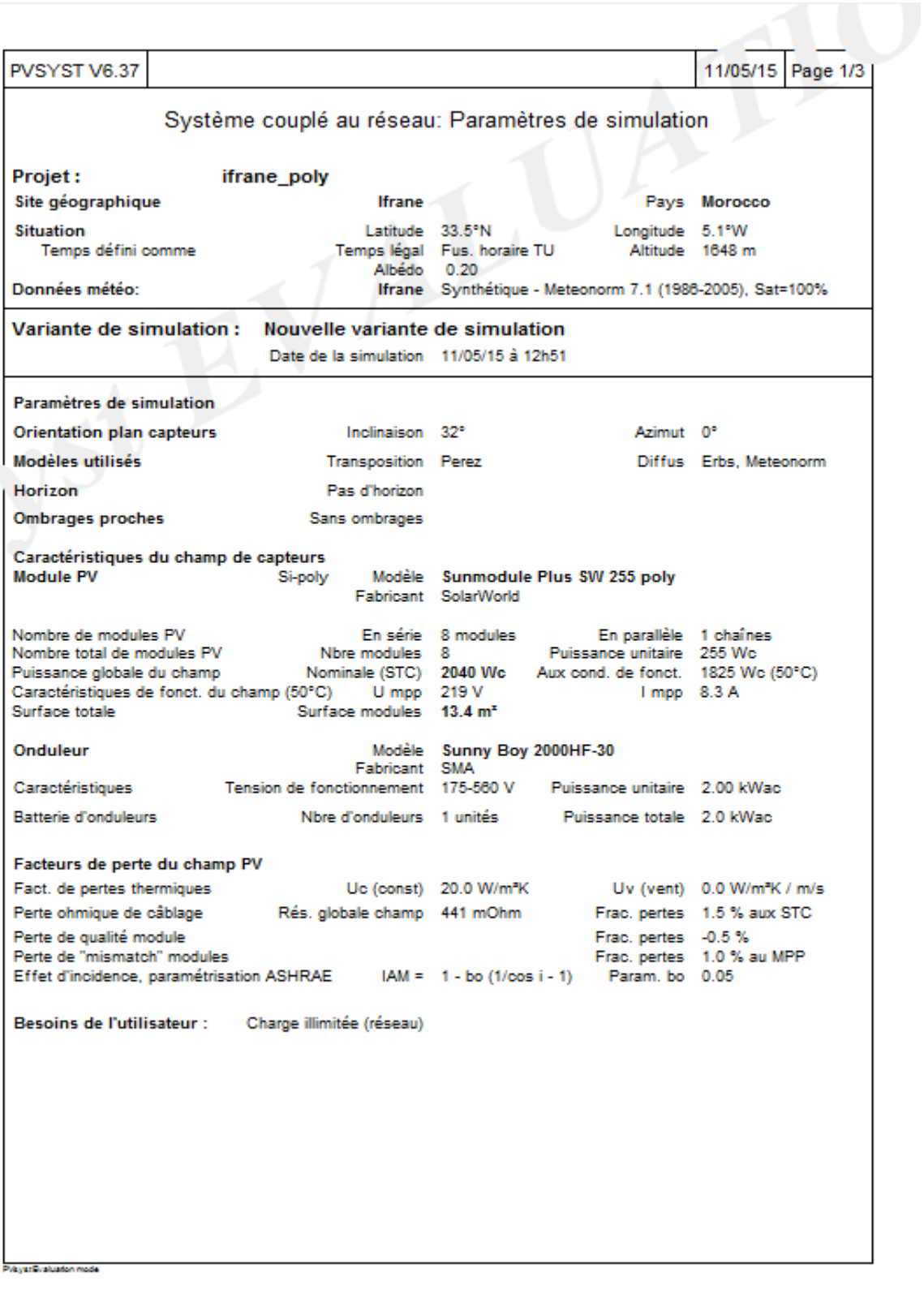


Figure 37: Diagramme des pertes de la chaîne monocristalline

4.1.5. Résultats de la simulation pour l'installation polycristalline

Le rapport de simulation de la chaîne PV polycristalline est :



PVSYST V6.37 — 11/05/15 — Page 1/3

Système couplé au réseau: Paramètres de simulation

Projet : ifrane_poly

Site géographique	Ifrane		Pays	**Morocco**
Situation	Latitude	33.5°N	Longitude	5.1°W
Temps défini comme	Temps légal	Fus. horaire TU	Altitude	1648 m
	Albédo	0.20		
Données météo:	**Ifrane**	Synthétique - Meteonorm 7.1 (1986-2005), Sat=100%		

Variante de simulation : **Nouvelle variante de simulation**

Date de la simulation 11/05/15 à 12h51

Paramètres de simulation

Orientation plan capteurs	Inclinaison	32°	Azimut	0°
Modèles utilisés	Transposition	Perez	Diffus	Erbs, Meteonorm
Horizon	Pas d'horizon			
Ombrages proches	Sans ombrages			

Caractéristiques du champ de capteurs

Module PV	Si-poly	Modèle	**Sunmodule Plus SW 255 poly**	
		Fabricant	SolarWorld	
Nombre de modules PV		En série	8 modules	En parallèle 1 chaînes
Nombre total de modules PV		Nbre modules	8	Puissance unitaire 255 Wc
Puissance globale du champ		Nominale (STC)	**2040 Wc**	Aux cond. de fonct. 1825 Wc (50°C)
Caractéristiques de fonct. du champ (50°C)		U mpp	219 V	I mpp 8.3 A
Surface totale		Surface modules	**13.4 m²**	

Onduleur		Modèle	**Sunny Boy 2000HF-30**	
		Fabricant	SMA	
Caractéristiques	Tension de fonctionnement		175-560 V	Puissance unitaire 2.00 kWac
Batterie d'onduleurs	Nbre d'onduleurs		1 unités	Puissance totale 2.0 kWac

Facteurs de perte du champ PV

Fact. de pertes thermiques	Uc (const)	20.0 W/m²K	Uv (vent)	0.0 W/m²K / m/s
Perte ohmique de câblage	Rés. globale champ	441 mOhm	Frac. pertes	1.5 % aux STC
Perte de qualité module			Frac. pertes	-0.5 %
Perte de "mismatch" modules			Frac. pertes	1.0 % au MPP
Effet d'incidence, paramétrisation ASHRAE	IAM =	1 - bo (1/cos i - 1)	Param. bo	0.05

Besoins de l'utilisateur : Charge illimitée (réseau)

PVsyst Evaluation mode

Figure 38: Paramètre de simulation de la chaîne polycristalline

Système couplé au réseau: Résultats principaux

Projet : ifrane_poly

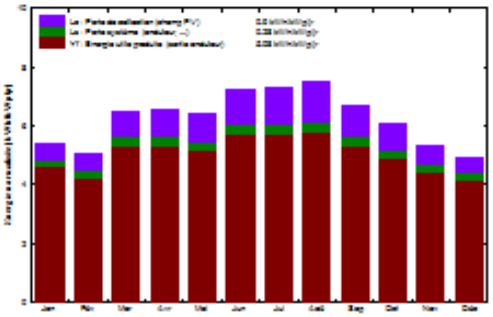
Variante de simulation : Nouvelle variante de simulation

Principaux paramètres système	Type de système	**Couplé au réseau**			
Orientation plan capteurs	inclinaison	32°	azimut	0°	
Modules PV	Modèle	Sunmodule Plus SW 255 poly		255 Wc	
Champ PV	Nombre de modules	8	Pnom total	**2040 Wc**	
Onduleur	Modèle	Sunny Boy 2000HF-30	Pnom	2000 W ac	
Besoins de l'utilisateur	Charge illimitée (réseau)				

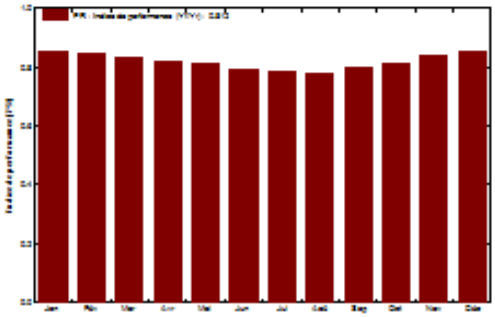
Principaux résultats de la simulation

Production du système	**Energie produite**	**3781 kWh/an**	Productible	1853 kWh/kWc/an
	Indice de performance (PR)	81.2 %		

Productions normalisées (par kWp installé): Puissance nominale 2040 Wo



Indice de performance (PR)



Nouvelle variante de simulation

Bilans et résultats principaux

	GlobHor kWh/m²	T Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray kWh	E_Grid kWh	EffArrR %	EffSysR %
Janvier	104.9	11.60	167.9	164.2	306.5	291.5	13.61	12.95
Février	103.4	13.00	141.6	138.2	256.8	243.3	13.52	12.81
Mars	164.9	15.00	200.1	195.0	355.8	337.9	13.26	12.59
Avril	187.3	15.90	196.6	191.2	345.8	327.0	13.11	12.40
Mai	208.7	18.50	198.4	192.0	346.4	327.5	13.01	12.31
Juin	241.6	21.50	217.4	210.4	370.2	350.5	12.70	12.02
Juillet	246.2	23.30	226.9	220.0	382.3	362.1	12.56	11.90
Août	229.4	23.60	232.1	225.9	388.7	366.7	12.49	11.78
Septembre	175.0	21.70	201.2	196.1	344.2	325.9	12.75	12.07
Octobre	142.9	19.70	188.5	184.2	327.9	311.0	12.97	12.30
Novembre	104.0	15.30	159.8	156.2	287.5	272.6	13.41	12.72
Décembre	91.1	13.50	153.0	149.4	278.8	264.9	13.59	12.91
Année	1999.3	17.75	2283.4	2223.0	3991.0	3781.1	13.03	12.35

Légendes: GlobHor Irradiation globale horizontale — EArray Energie effective sortie champ
T Amb Température ambiante — E_Grid Energie injectée dans le réseau
GlobInc Global incident plan capteurs — EffArrR Effic. Eout champ / surf. brute
GlobEff Global "effectif", corr. pour IAM et ombrages — EffSysR Effic. Eout système / surf. brute

PVsyst Evaluation mode

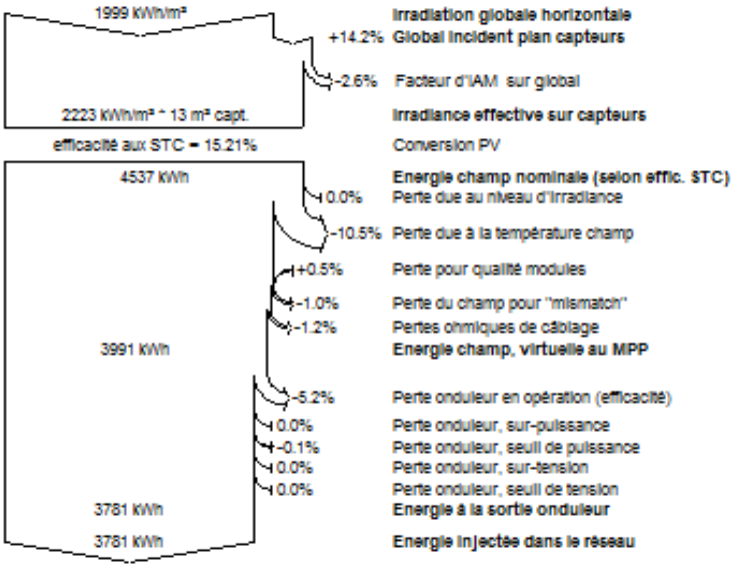
Figure 39: Résultats de la simulation de la chaîne polycristalline

Système couplé au réseau: Diagramme des pertes

Projet : ifrane_poly
Variante de simulation : Nouvelle variante de simulation

Principaux paramètres système	Type de système	**Couplé au réseau**			
Orientation plan capteurs	inclinaison	32°	azimut	0°	
Modules PV	Modèle	Sunmodule Plus SW 255 poly		255 Wc	
Champ PV	Nombre de modules	8	Pnom total	**2040 Wc**	
Onduleur	Modèle	Sunny Boy 2000HF-30	Pnom	2000 W ac	
Besoins de l'utilisateur	Charge illimitée (réseau)				

Diagramme des pertes sur l'année entière

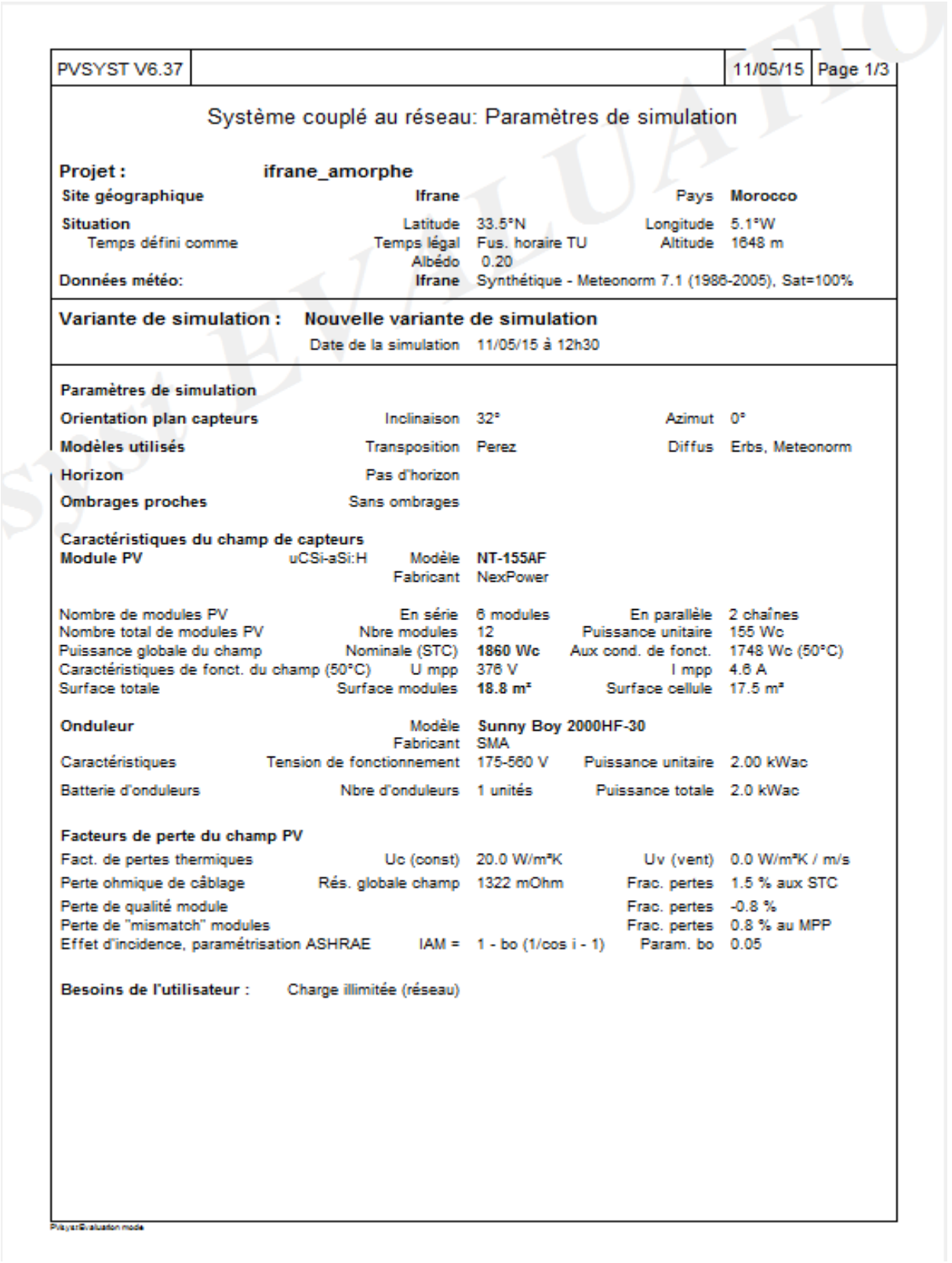


PVsyst Evaluation mode

Figure 40: Diagramme des pertes de la chaîne polycristalline

4.1.6. Résultats de la simulation pour l'installation amorphe

Le rapport de simulation de la chaîne PV de type amorphe :



PVSYST V6.37 | 11/05/15 | Page 1/3

Système couplé au réseau: Paramètres de simulation

Projet : ifrane_amorphe

Site géographique	**Ifrane**		Pays	**Morocco**
Situation	Latitude	33.5°N	Longitude	5.1°W
Temps défini comme	Temps légal	Fus. horaire TU	Altitude	1648 m
	Albédo	0.20		
Données météo:	**Ifrane**	Synthétique - Meteonorm 7.1 (1986-2005), Sat=100%		

Variante de simulation : **Nouvelle variante de simulation**

Date de la simulation 11/05/15 à 12h30

Paramètres de simulation

Orientation plan capteurs	Inclinaison	32°	Azimut	0°
Modèles utilisés	Transposition	Perez	Diffus	Erbs, Meteonorm
Horizon	Pas d'horizon			
Ombrages proches	Sans ombrages			

Caractéristiques du champ de capteurs

Module PV	uCSi-aSi:H	Modèle	**NT-155AF**	
		Fabricant	NexPower	
Nombre de modules PV		En série	6 modules	En parallèle 2 chaînes
Nombre total de modules PV		Nbre modules	12	Puissance unitaire 155 Wc
Puissance globale du champ		Nominale (STC)	**1860 Wc**	Aux cond. de fonct. 1748 Wc (50°C)
Caractéristiques de fonct. du champ (50°C)		U mpp	376 V	I mpp 4.6 A
Surface totale		Surface modules	**18.8 m²**	Surface cellule 17.5 m²

Onduleur		Modèle	**Sunny Boy 2000HF-30**	
		Fabricant	SMA	
Caractéristiques	Tension de fonctionnement		175-660 V	Puissance unitaire 2.00 kWac
Batterie d'onduleurs	Nbre d'onduleurs		1 unités	Puissance totale 2.0 kWac

Facteurs de perte du champ PV

Fact. de pertes thermiques	Uc (const)	20.0 W/m²K	Uv (vent)	0.0 W/m²K / m/s
Perte ohmique de câblage	Rés. globale champ	1322 mOhm	Frac. pertes	1.5 % aux STC
Perte de qualité module			Frac. pertes	-0.8 %
Perte de "mismatch" modules			Frac. pertes	0.8 % au MPP
Effet d'incidence, paramétrisation ASHRAE	IAM =	1 - bo (1/cos i - 1)	Param. bo	0.05

Besoins de l'utilisateur : Charge illimitée (réseau)

PVsyst Evaluation mode

Figure 41: Paramètre de simulation de la chaîne amorphe

Système couplé au réseau: Résultats principaux

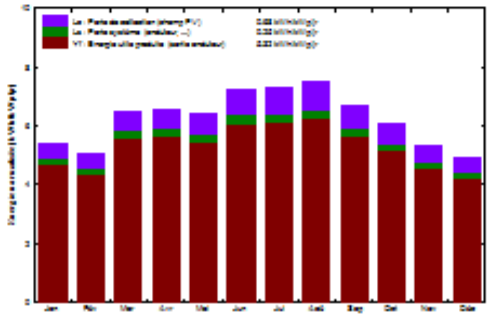
Projet : ifrane_amorphe
Variante de simulation : Nouvelle variante de simulation

Principaux paramètres système	Type de système	**Couplé au réseau**		
Orientation plan capteurs	inclinaison	32°	azimut	0°
Modules PV	Modèle	NT-155AF	Pnom	155 Wc
Champ PV	Nombre de modules	12	Pnom total	**1860 Wc**
Onduleur	Modèle	Sunny Boy 2000HF-30	Pnom	2000 W ac
Besoins de l'utilisateur	Charge illimitée (réseau)			

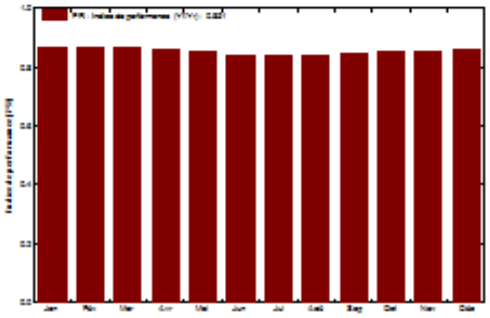
Principaux résultats de la simulation

Production du système	**Energie produite**	**3614 kWh/an**	Productible	1943 kWh/kWc/an
	Indice de performance (PR)	85.1 %		

Productions normalisées (par kWp installé): Puissance nominale 1860 Wc



Indice de performance (PR)



Nouvelle variante de simulation
Bilans et résultats principaux

	GlobHor kWh/m²	T Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray kWh	E_Grid kWh	EffArrR %	EffSysR %
Janvier	104.9	11.60	167.9	164.2	282.0	270.4	8.92	8.55
Février	103.4	13.00	141.6	138.2	238.9	228.2	8.96	8.56
Mars	164.9	15.00	200.1	195.0	336.1	321.9	8.91	8.54
Avril	187.3	15.90	196.6	191.2	329.3	314.4	8.89	8.49
Mai	208.7	18.50	198.4	192.0	329.9	314.3	8.82	8.41
Juin	241.6	21.50	217.4	210.4	356.3	339.9	8.70	8.30
Juillet	246.2	23.30	226.9	220.0	370.2	353.0	8.66	8.26
Août	229.4	23.60	232.1	225.9	378.2	360.2	8.65	8.24
Septembre	175.0	21.70	201.2	196.1	331.0	316.5	8.73	8.35
Octobre	142.9	19.70	188.5	184.2	311.5	298.2	8.77	8.40
Novembre	104.0	15.30	159.8	156.2	265.5	253.9	8.82	8.43
Décembre	91.1	13.50	153.0	149.4	254.1	243.3	8.82	8.44
Année	1999.3	17.75	2283.4	2223.0	3783.0	3614.3	8.79	8.40

Légendes:
GlobHor Irradiation globale horizontale
T Amb Température ambiante
GlobInc Global incident plan capteurs
GlobEff Global "effectif", corr. pour IAM et ombrages
EArray Energie effective sortie champ
E_Grid Energie injectée dans le réseau
EffArrR Effic. Eout champ / surf. brute
EffSysR Effic. Eout système / surf. brute

PVsyst Evaluation mode

Figure 42: Résultats de la simulation de la chaîne amorphe

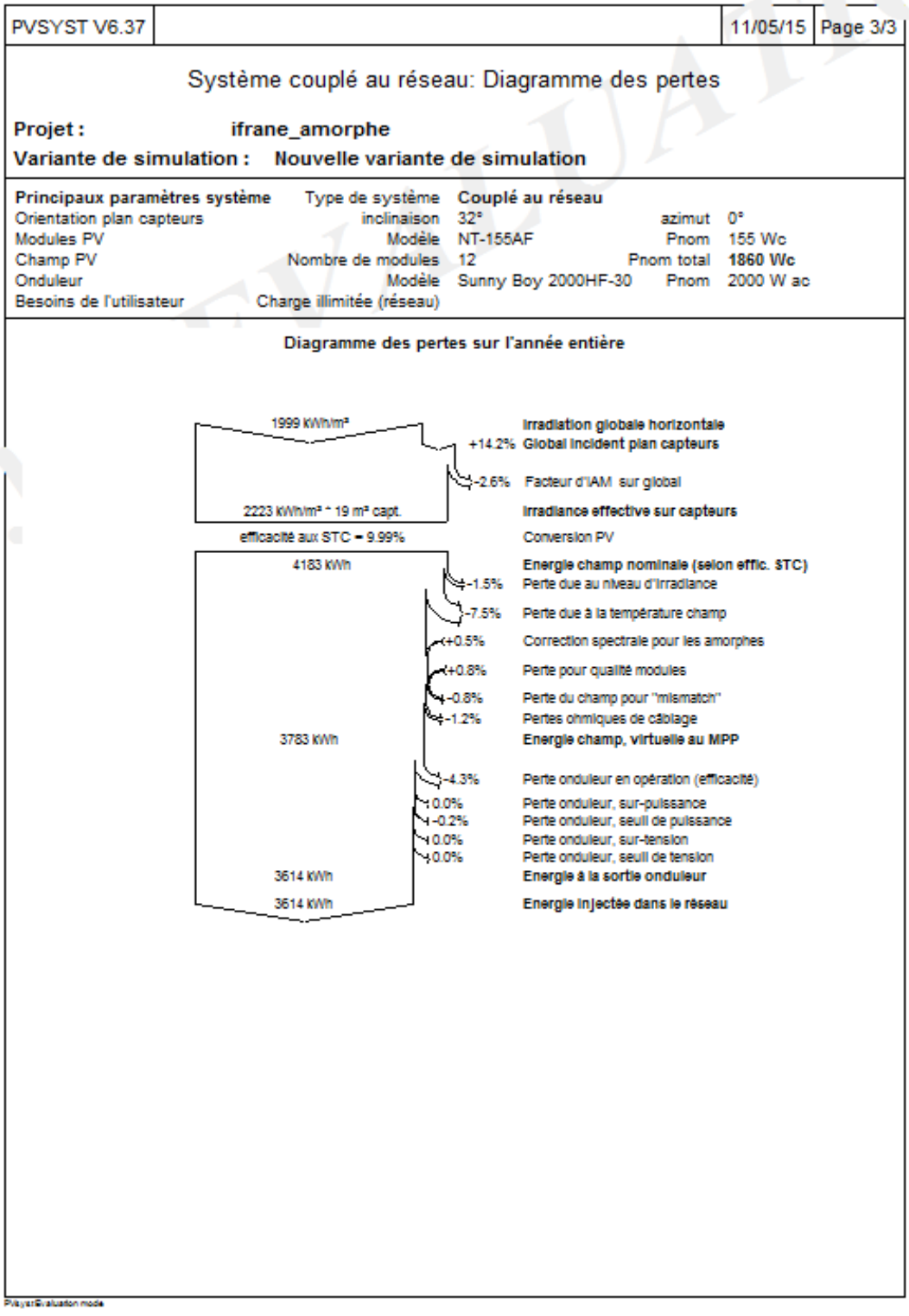


Figure 43: Diagramme des pertes de la chaîne amorphe

4.1.7. Comparaison des résultats de la simulation

Après avoir obtenu les rapports de simulation des différents types de panneaux, nous allons comparer l'énergie électrique injectée au réseau par les trois chaînes photovoltaïques :

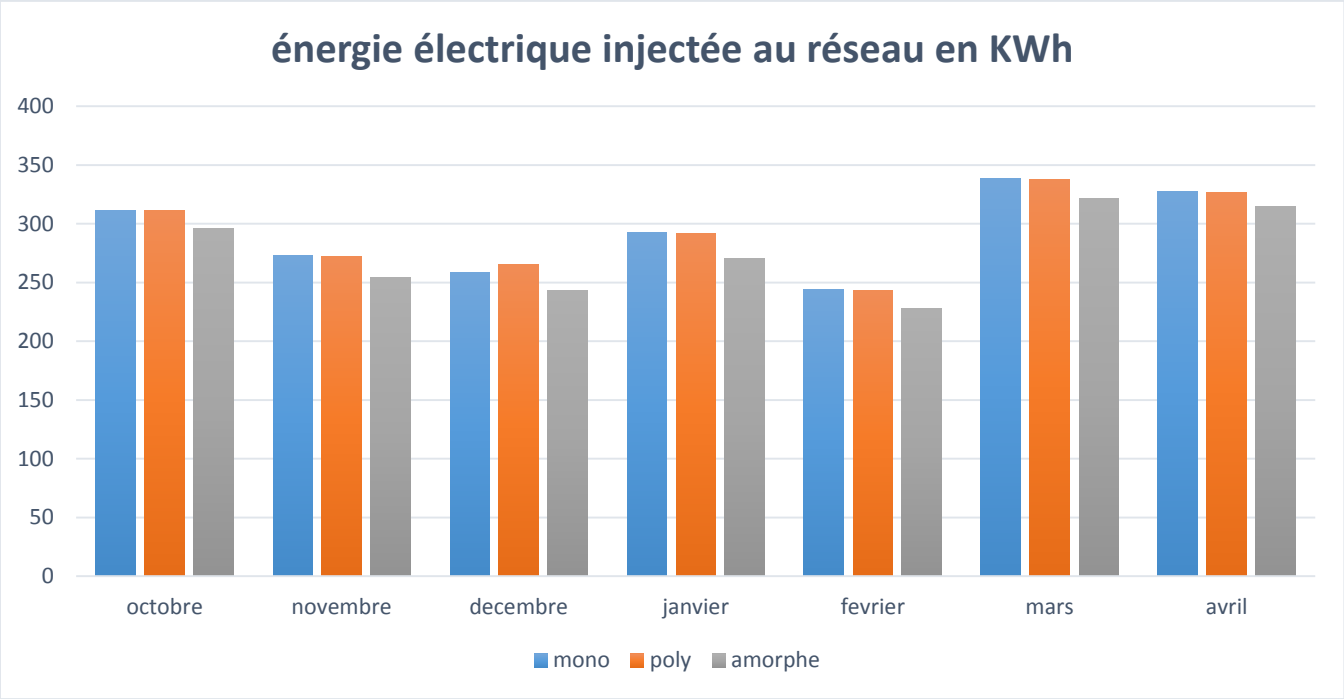


Figure 44 : Énergie électrique générée par les trois types de panneaux PV

La figure 44 montre que les quantités d'énergie électrique injectée au réseau par l'installation monocristalline et polycristalline sont identiques et sont légèrement supérieurs à celle injectée au réseau par l'installation amorphe.

Si nous tenons compte des résultats de la simulation et des coûts de fabrication des technologies monocristalline et polycrstalline , nous pouvons dire que le polycristallin est le mieux adaptés à la région d'Ifrane. Dans la suite nous allons comparer les données expérimentales des trois types des panneaux et voir si elles sont conformes aux résultats de simulation.

4.2. Etude comparative expérimentale

4.2.1. Données climatiques couvrant la période allant du 10/2014 au 04/2015

Les données climatiques sont obtenues à l'aide du logiciel « RETscreen », c'est un logiciel développé par les chercheurs du Ministère des Ressources Naturelles (Ressources Naturelles Canada) . RETScreen permet de déterminer rapidement la viabilité technique et financière d'un grand nombre de projets de production d'électricité

Figure 45: Logiciel RETscreen

La figure 46 représente la variation de la température de l'air et du rayonnement durant la période d'étude de la ville d'Ifrane .

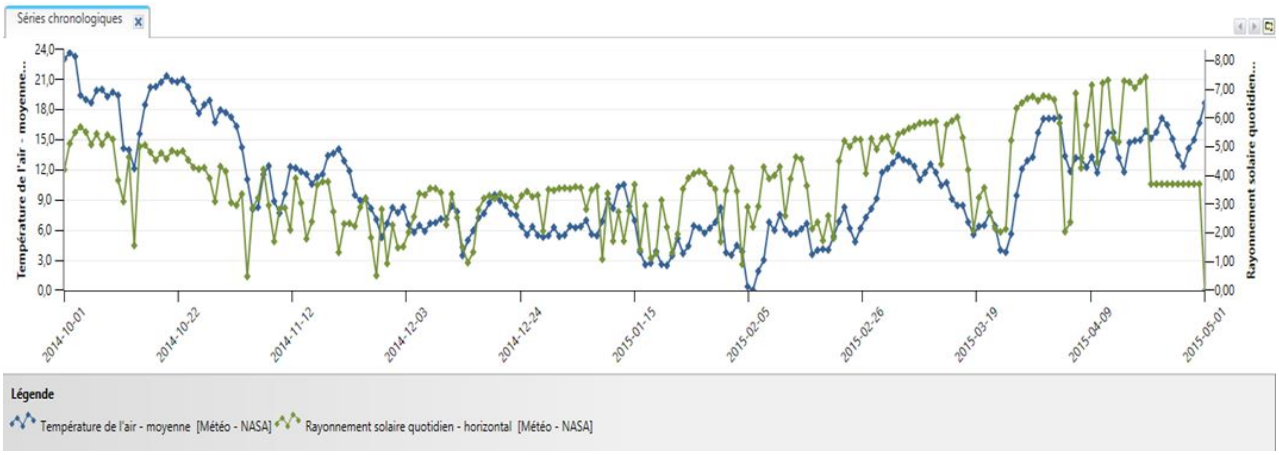


Figure 46: Température et rayonnement solaire durant la période allant du 01/10/2014 au 01/05/2015

4.2.2. Résultats et interprétations

4.2.2.1. Comparaison mensuelle de l'énergie générée par les trois types de panneaux solaires

Nous allons comparer l'énergie électrique produite chaque jour du 01/10/2014 au 24/04/2015 par les trois types de panneaux solaires afin d'évaluer leurs performances.

➢ **Résultats du mois octobre 2014 : énergie électrique en KWh**

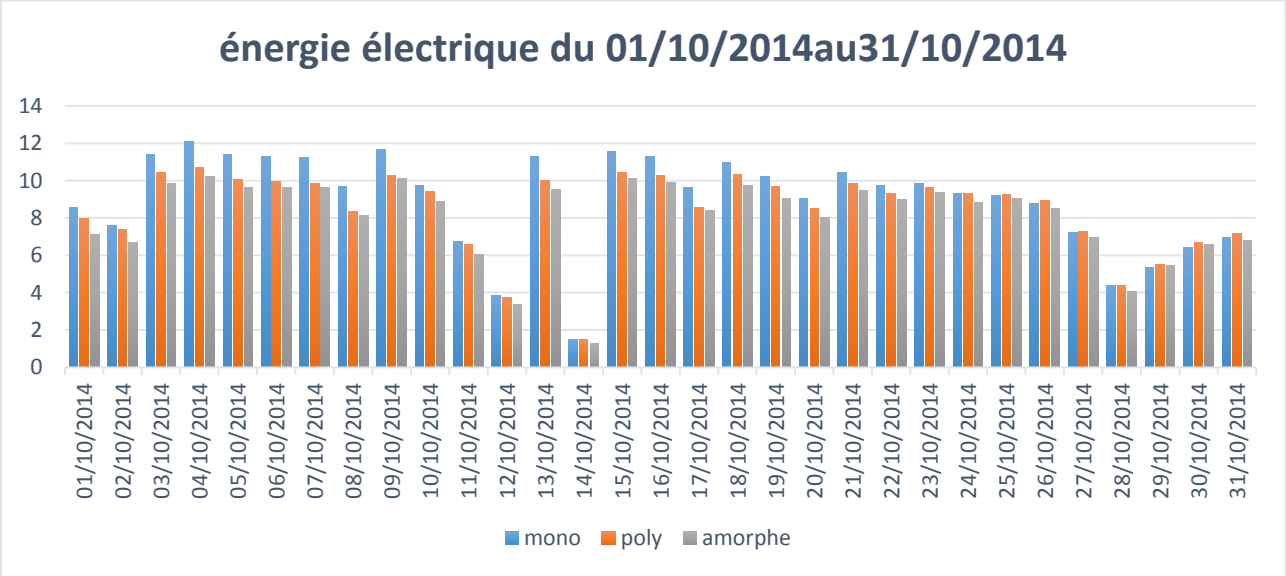


Figure 47: Énergie électrique générée durant le mois 10/2014 par les trois types de cellule PV

La figure 46 montre que du 01/10/2014 jusqu'à 23/10/2014, les panneaux solaires monocristallins ont produit plus d'énergie, suivis des panneaux solaires polycristallins et amorphes.

Du 24/10/2014 au 31/10/2014, les trois types produisent presque la même quantité d'énergie électrique ave une tendance haussière caractérisant le polycristallin.

➢ **Résultats du mois novembre 2014 :**

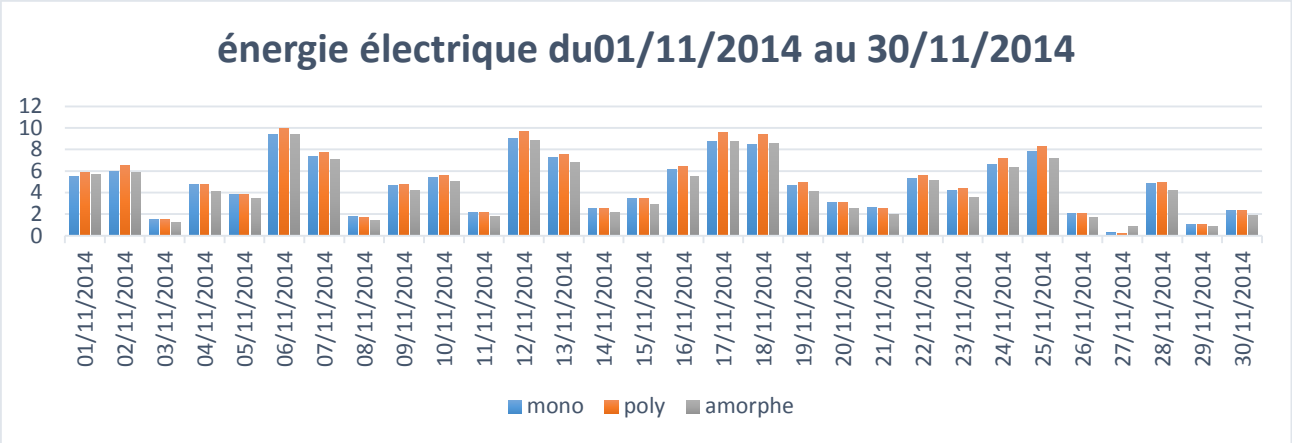


Figure 48: Énergie électrique générée durant le mois 11/2014 par les trois types de cellule PV

➢ **Résultats du mois décembre 2014 :**

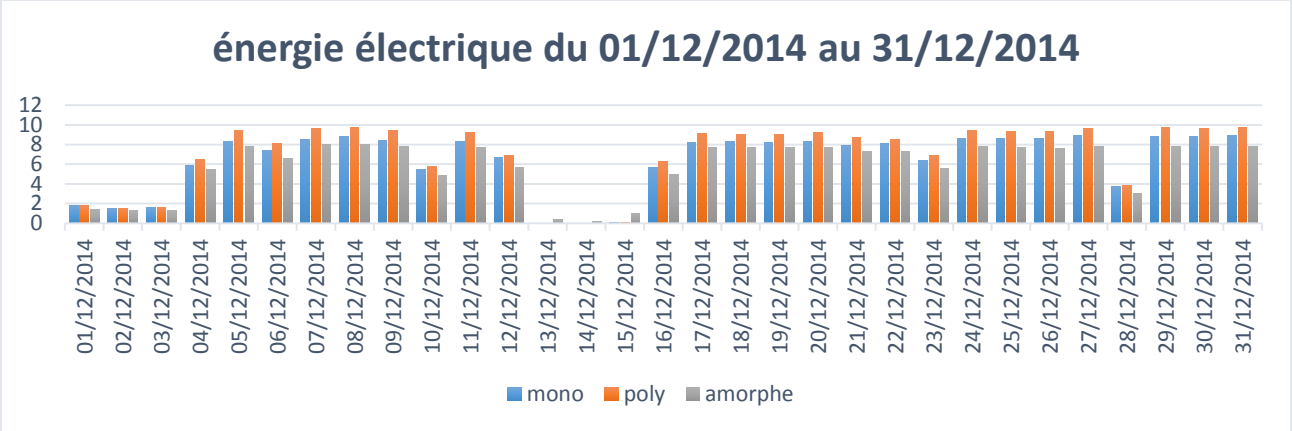


Figure 49: Énergie électrique générée durant le mois 12/2014 par les trois types de cellule PV

➢ **Résultats du mois janvier 2015 :**

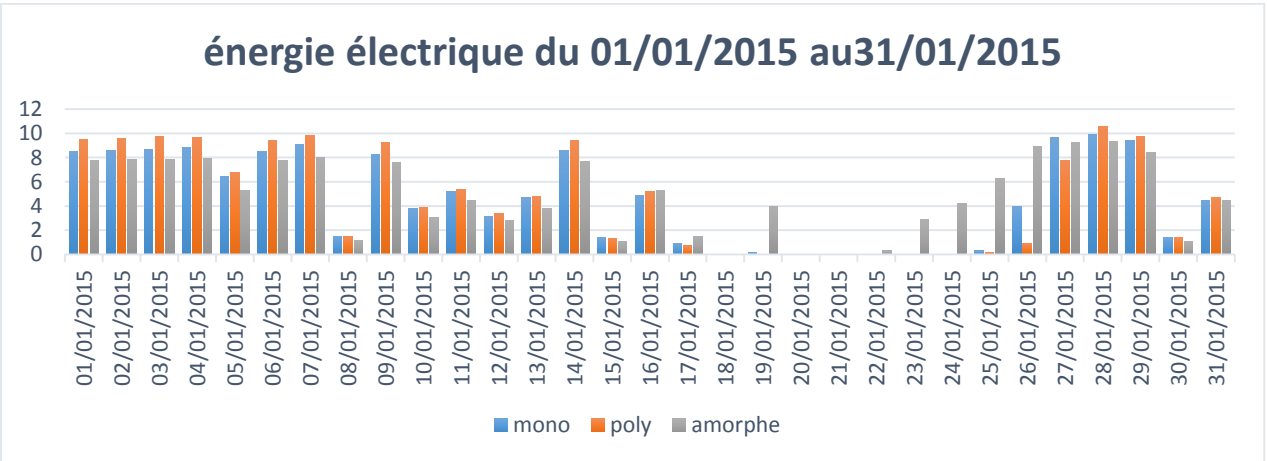


Figure 50: Énergie électrique générée durant le mois 01/2015 par les trois types de cellule PV

On remarque qu'en général durant les mois de novembre, décembre et janvier les panneaux solaires polycristallins produisent plus d'énergie. Hormis des périodes où l'amorphe produit

de l'électricité alors que le monocristallin et le polycristallin produisent une quantité parfois nulle parfois négligeable par rapport à l'amorphe.

Ces périodes correspondent aux faibles éclairements, on déduit donc que l'amorphe est plus performant que les autres types de panneaux photovoltaïques pendant les faibles éclairements.

- **Résultats du mois février 2015**

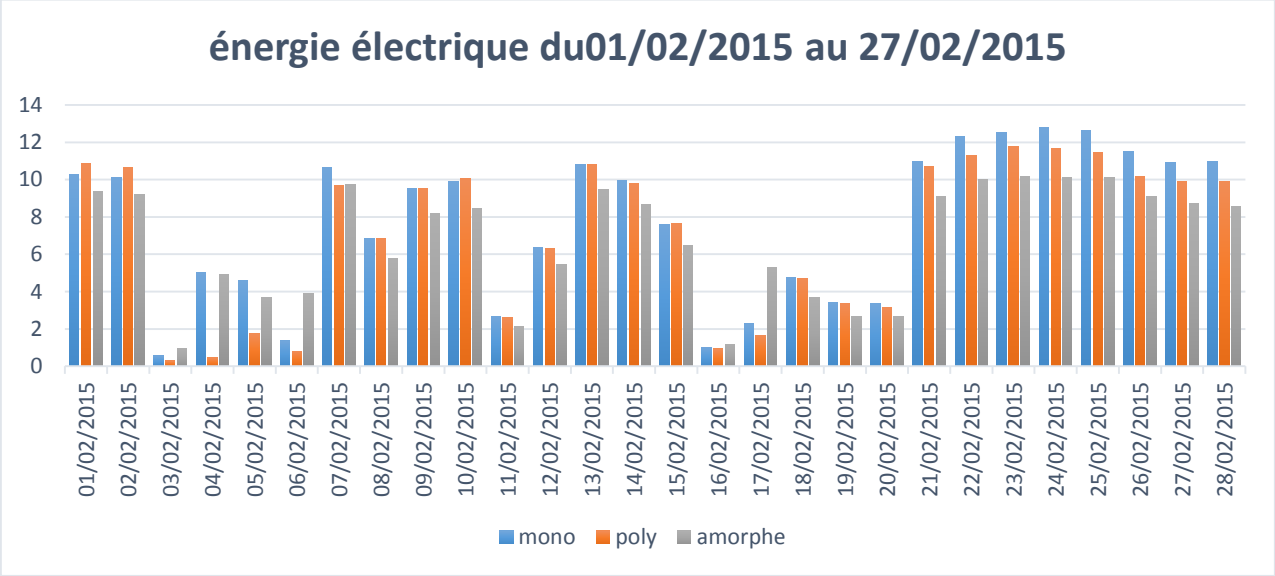


Figure 51: Énergie électrique générée durant le mois 02/2015 par les trois types de cellule PV

La figure 50 montre que pendant le mois de février les résultats sont instables durant la période allant du 01/02/2015 au 20/02/2015, mais du 21/02/2015 à la fin de mois, le monocristallin est le plus performant, suivi du polycristallin, et de l'amorphe.

- **Résultats du mois mars 2015**

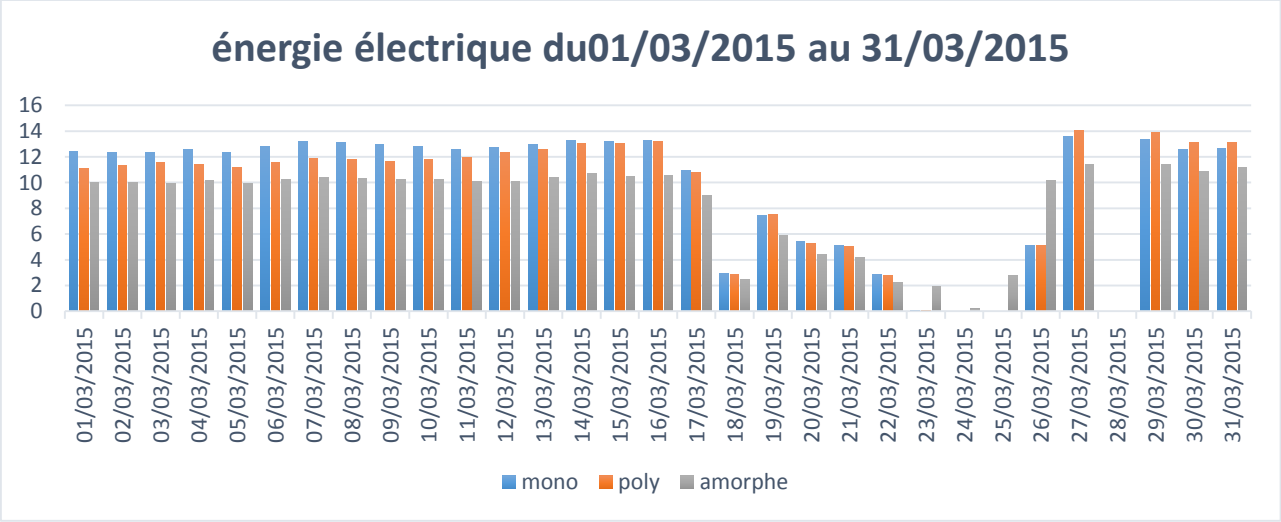


Figure 52: Énergie électrique générée durant le mois 03/2015 par les trois types de cellule PV

Pendant la période allant du 01/03/2015 jusqu'au 22/03/2015 , les panneaux solaires monocristallines sont les plus performants suivis des panneaux solaires poly cristallines et des panneaux amorphes avec une tendance haussière caractérisant le poly cristallin,

La période allant du 23/03/2015 au 26/03/2015, l'amorphe est le plus performant.

La période allant du 27/03/2015 au31/03/2015, le polycristallin est le plus performant suivi du monocristallin et de l'amorphe

- **Résultats du mois avril 2015**

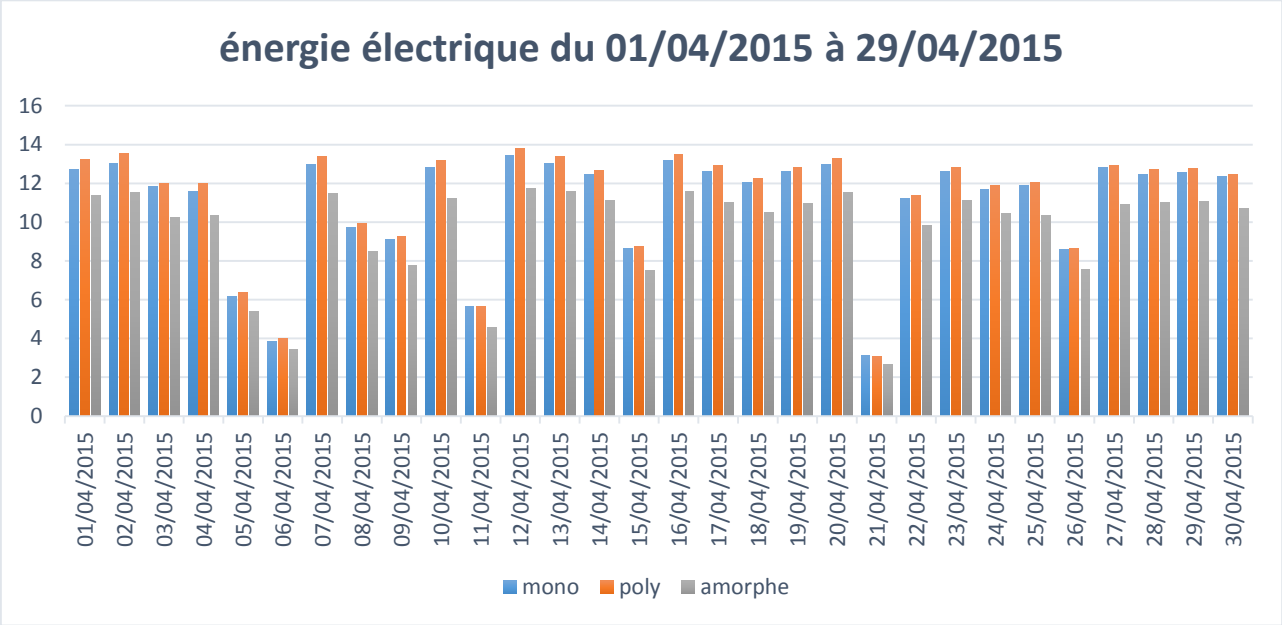


Figure 53: Énergie électrique générée durant le mois 04/2015 par les trois types de cellule PV

Les résultats du mois avril montrent clairement que le poly cristallin est légèrement plus efficace que le monocristallin et les deux sont plus performants que l'amorphe.

La comparaison des résultats mensuels montrent que le polycristallin est légèrement plus performant que le monocristallin avec une différence d'énergie électrique qui ne dépasse pas 1kwh par jour, alors que l'amorphe est moins performant.

Le mois février présente des résultats instables.

La première moitié d'octobre et mars favorise le monocristallin.

La comparaison mensuelle nous donne une idée générale sur la quantité d'énergie électrique produite par les trois types de panneaux photovoltaïques, pour mieux comprendre le comportement des trois types de panneaux solaires, nous allons faire une comparaison journalière de la puissance journalière générée par les trois types de panneaux solaires, durant les deux mois février et mars.

4.2.2.2. Comparaison journalière de la puissance électrique instantanée

Après avoir observé les courbes obtenues, nous pouvons les classifier en deux catégories Une première catégorie qui regroupe les courbes qui ont un seul maximum comme le montre la figure suivante :

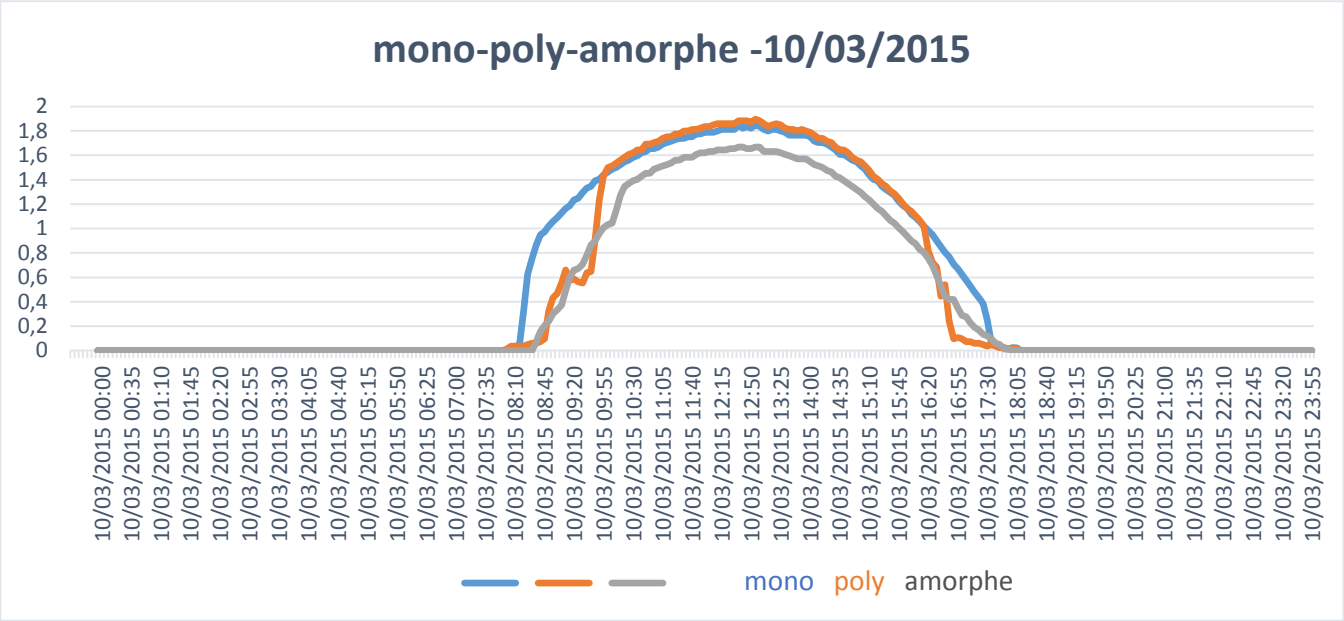


Figure 54: Puissance instantanée en KW générée par les trois types de panneaux PV durant le 10/03/2015

Ce type de courbes est divisé selon les différentes périodes de la journée ; le lever du soleil et le coucher du soleil où l'énergie lumineuse est faible, et le milieu de la journée ou ce que nous appelons aussi les heures de puissance crête où l'énergie lumineuse émise par le soleil est à son maximum. Nous pouvons dire aussi que cette journée est caractérisée par de bonnes conditions climatiques, plus précisément le rayonnement solaire, puisque le rendement des panneaux photovoltaïques est proportionnel à la quantité du rayonnement solaire qu'ils reçoivent.

La deuxième catégorie regroupe les courbes qui représentent plusieurs maximums, comme le montre la figure 55:

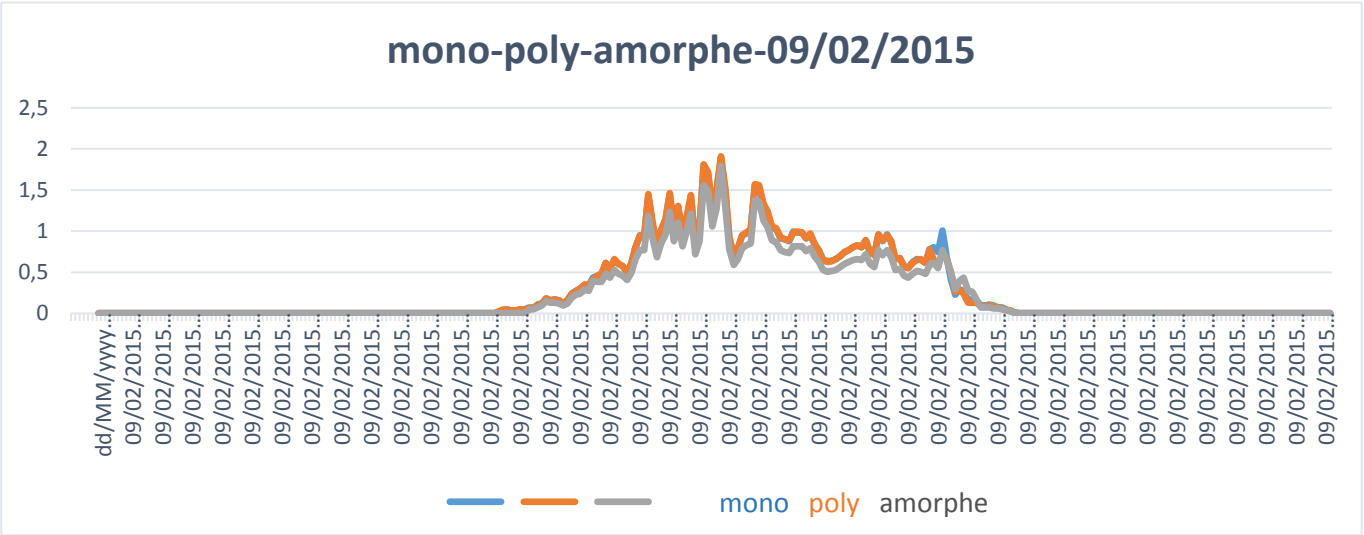


Figure 55 : Puissance instantanée en KW générée par les trois types de panneaux PV durant le 09/02/2015

Les courbes de la figure 55 révèlent que la journée est caractérisée par un temps couvert et nuageux, cela s'explique par la variation instable de la puissance électrique générée durant toute la journée.

Les figures suivantes représentent les courbes avec un seul maximum :

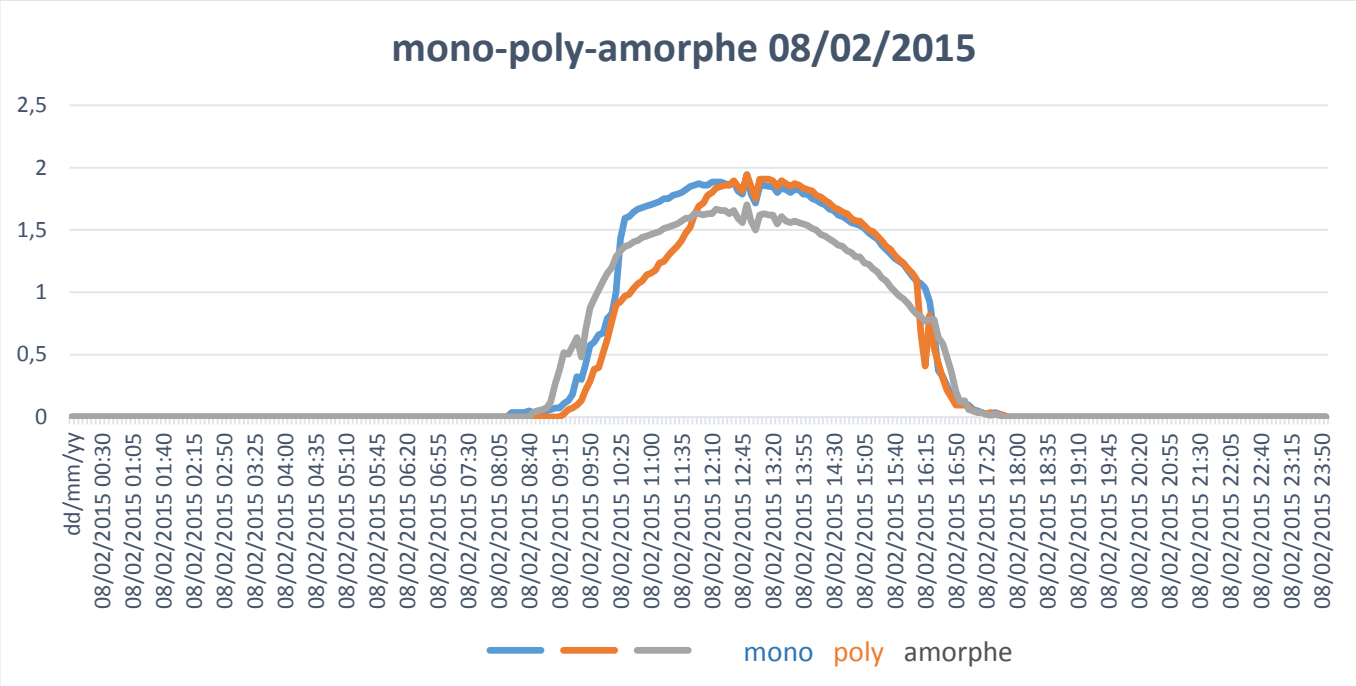


Figure 56: Puissance instantanée en KW générée par les trois types de panneaux PV durant le 08/02/2015

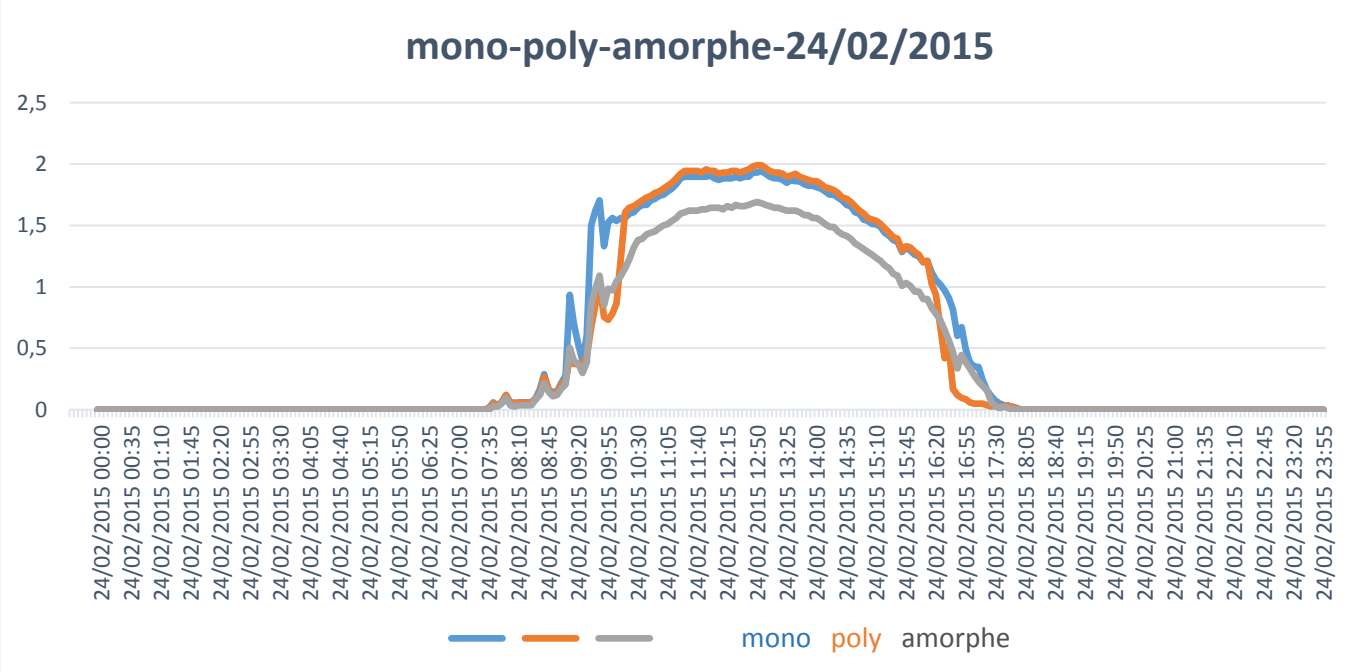


Figure 57 : Puissance instantanée en KW générée par les trois types de panneaux PV durant le 24/02/2015

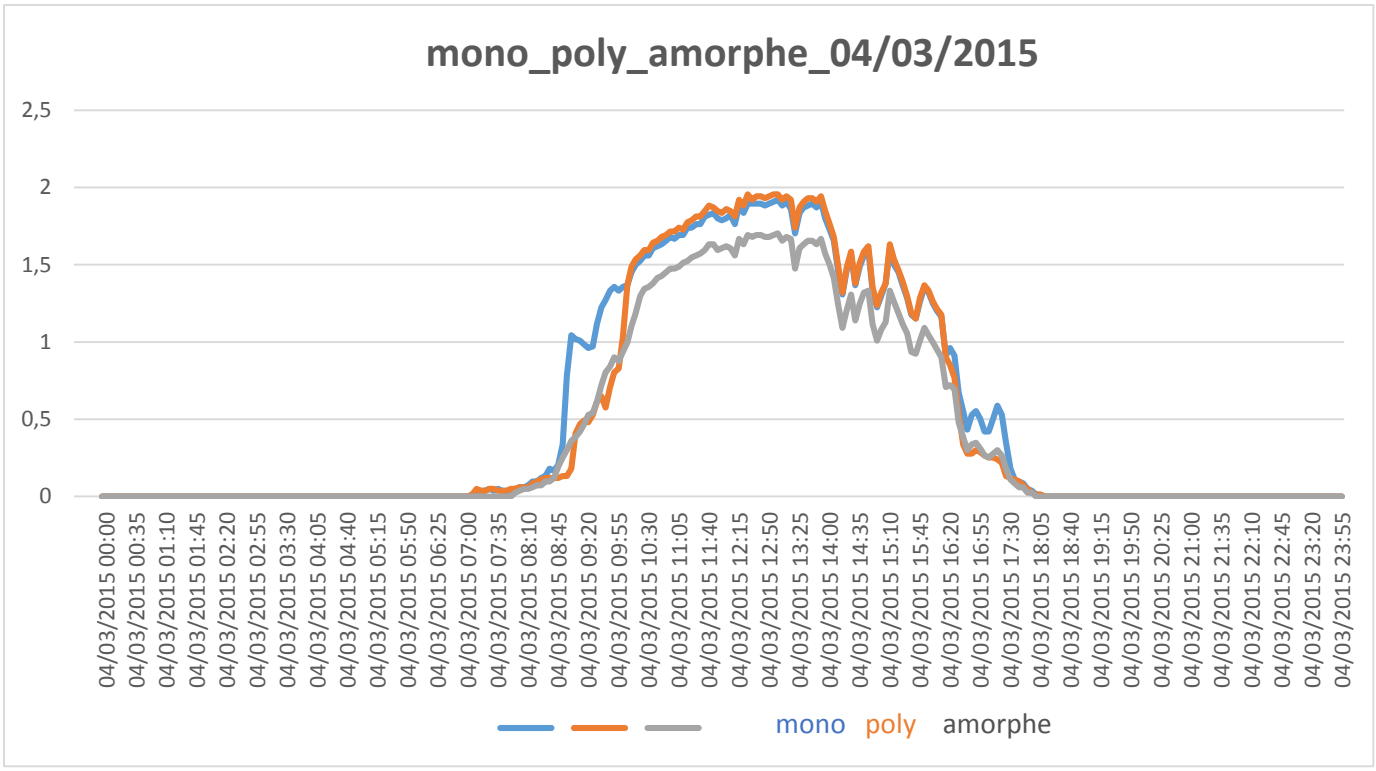


Figure 58: Puissance instantanée en KW générée par les trois types de panneaux PV durant le 04/03/2015

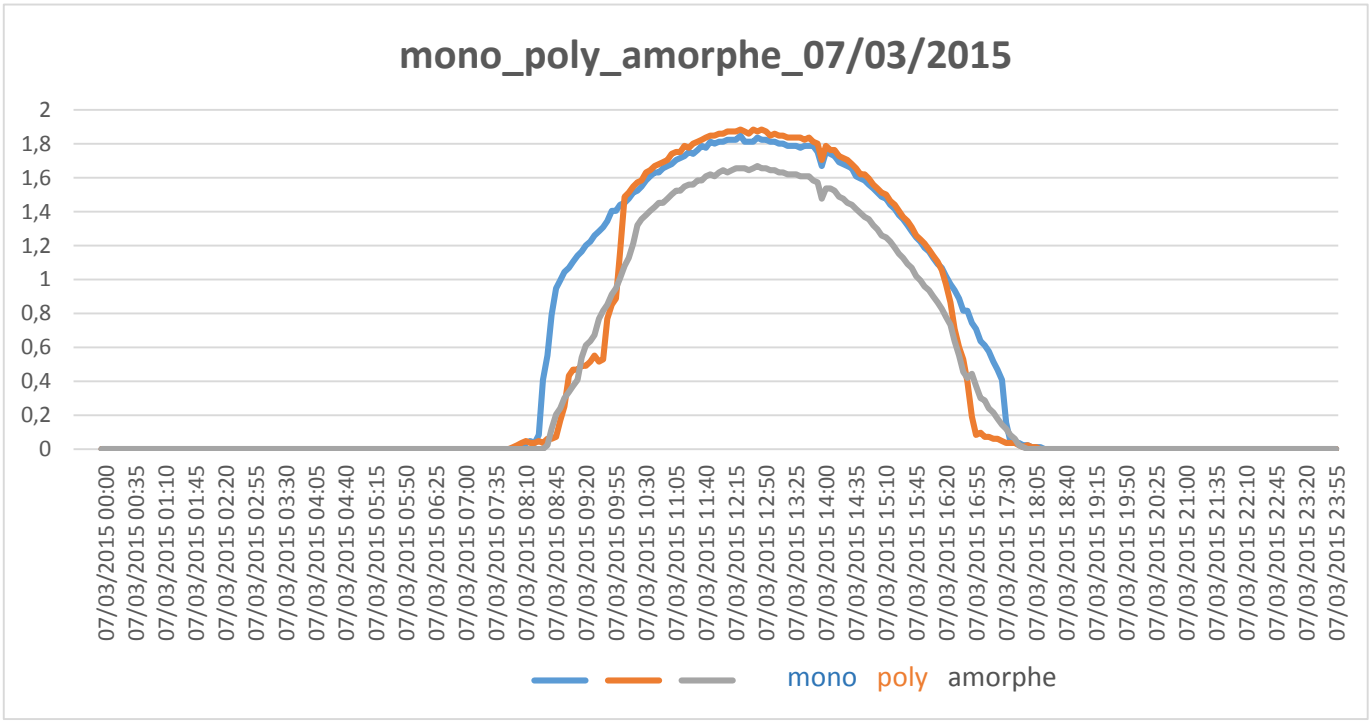


Figure 59: Puissance instantanée en KW générée par les trois types de panneaux PV durant le 07/03/2015

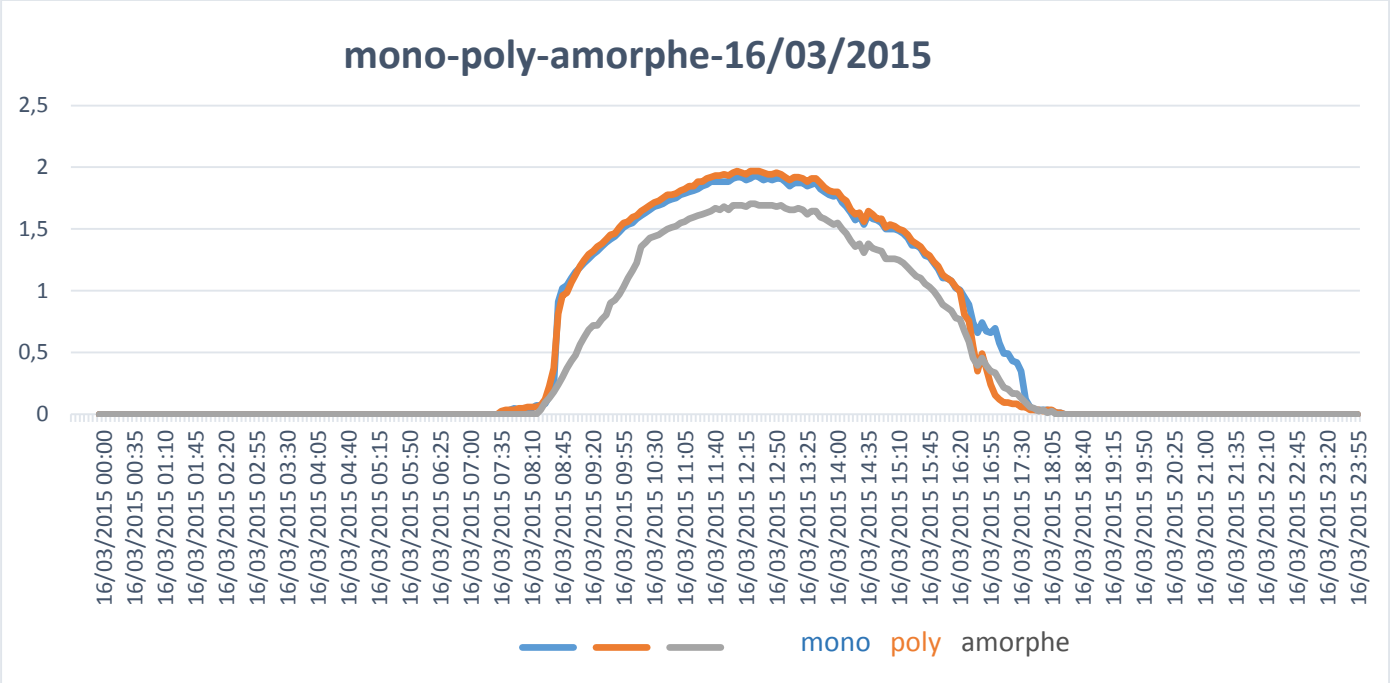


Figure 60 : Puissance instantanée en KW générée par les trois types de panneaux PV durant le 16/03/2015

Les figures 54,56,57,58,59 et 60 montrent que les puissances électriques produites par le monocristallin et le polycristallin sont identiques et maximales pendant les heures de puissance crête , ce qui est très important à retenir c'est que la puissance atteint la valeur maximal 2KW(figures 57 et 60), sachant que la puissance installée est égale à 2,04KWc et n'est atteinte qu'aux conditions standards de test (1000W/m² , 25°c) .

Pendant le lever et le coucher du soleil, le monocristallin est le plus performant, ce qui justifie les résultats mensuels de la première moitié du mois mars où on a remarqué que l'énergie électrique produite par le monocristallin est supérieure à celle produite par le polycristallin.

Les figures suivantes représentent les courbes avec plusieurs maximums.

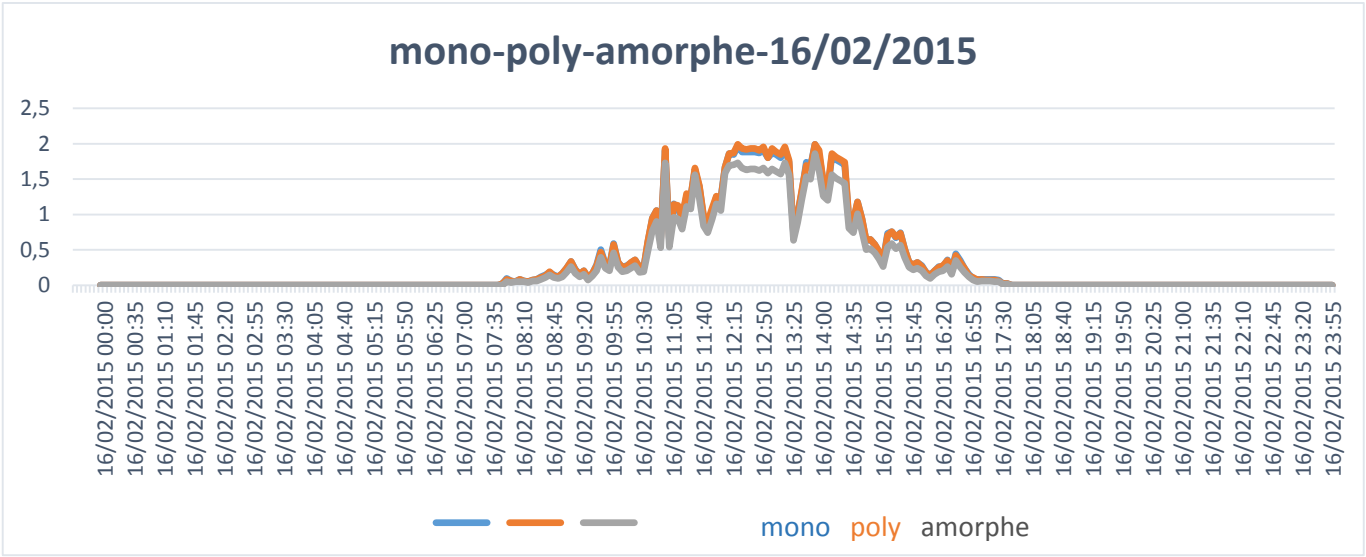


Figure 61: Puissance instantanée en KW générée par les trois types de panneaux PV durant le 16/02/2015

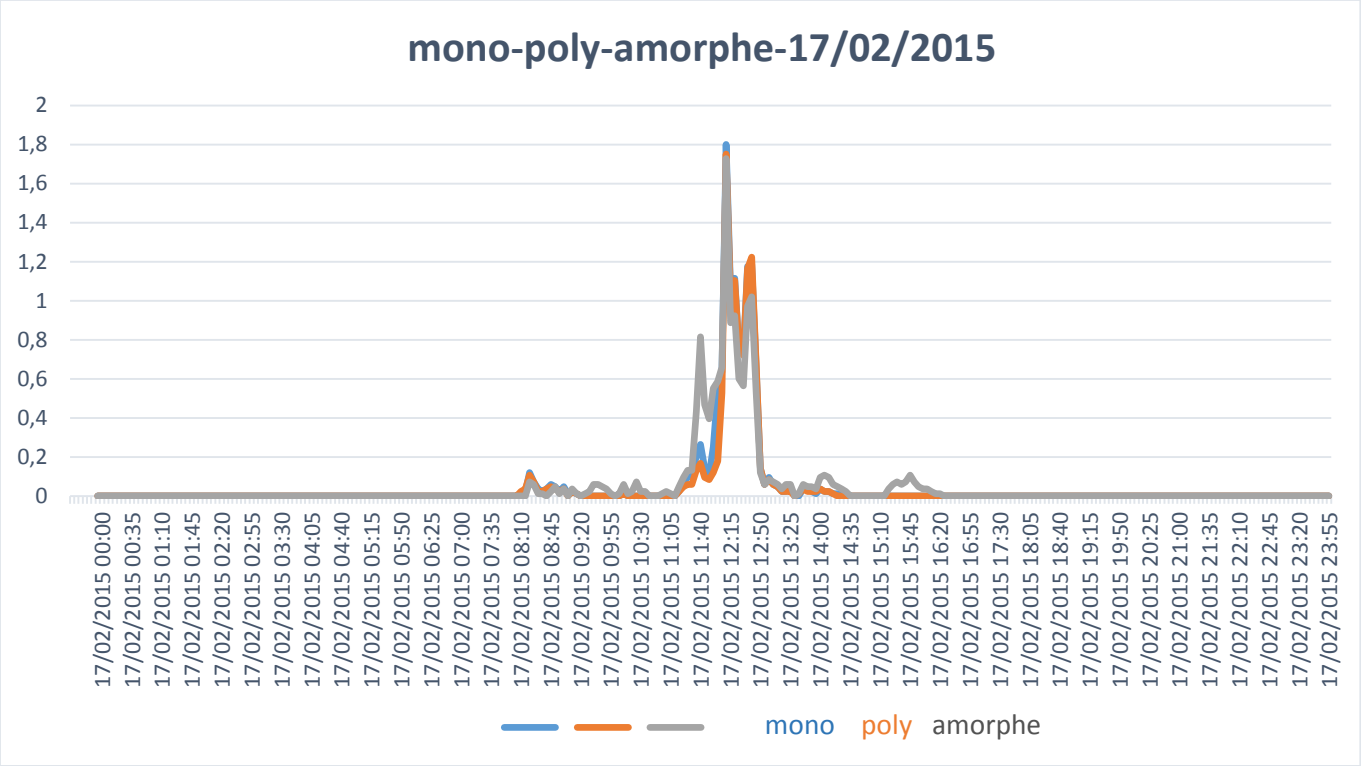


Figure 62: Puissance instantanée en KW générée par les trois types de panneaux PV durant le 17/02/2015

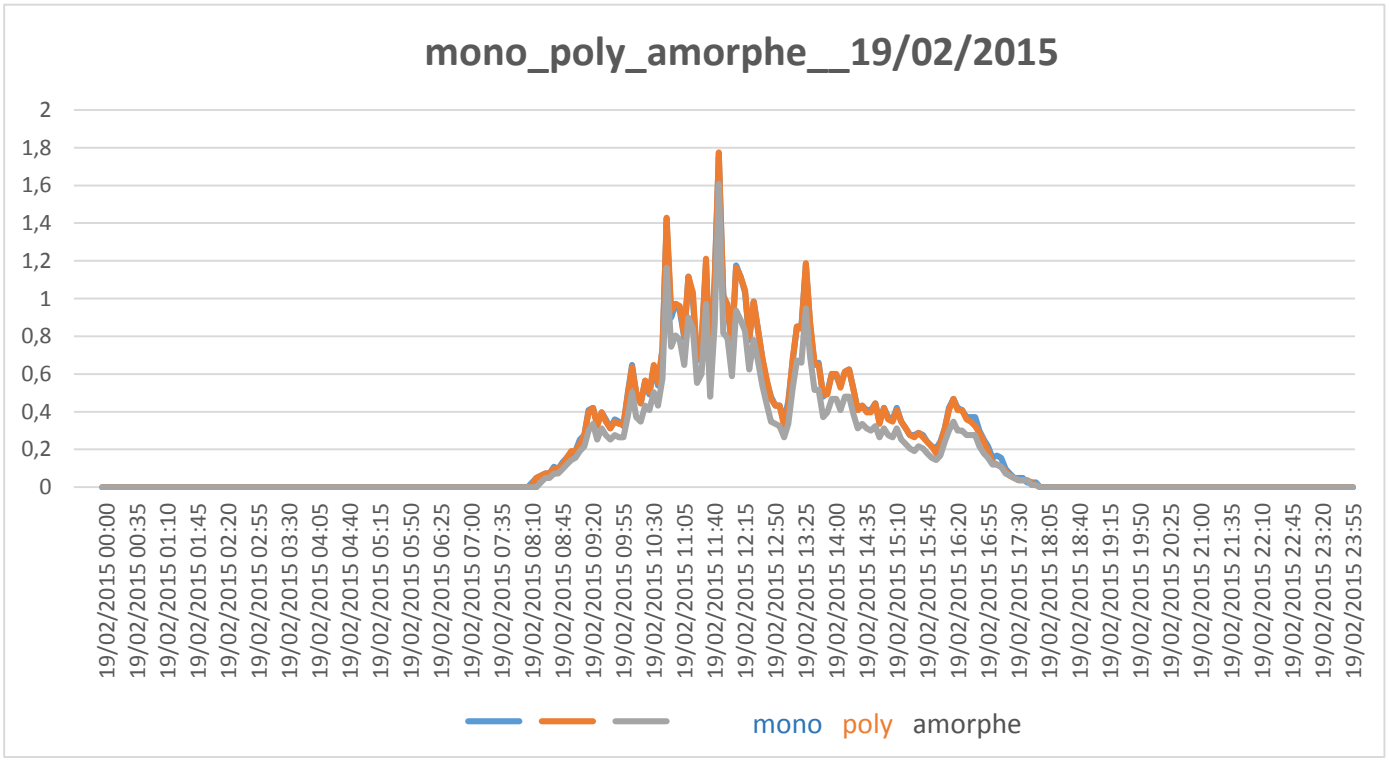


Figure 63: Puissance instantanée en KW générée par les trois types de panneaux PV durant le 19/02/2015

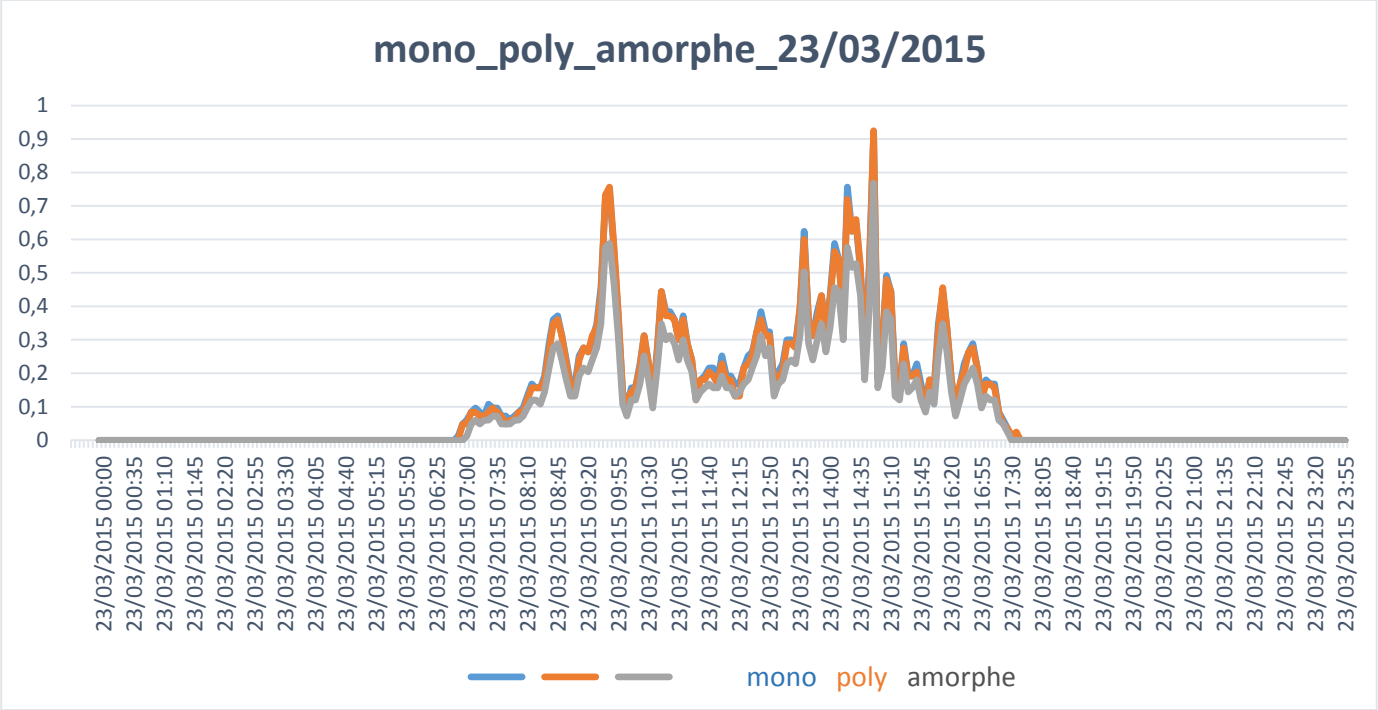


Figure 64: Puissance instantanée en KW générée par les trois types de panneaux PV durant le 23/03/2015

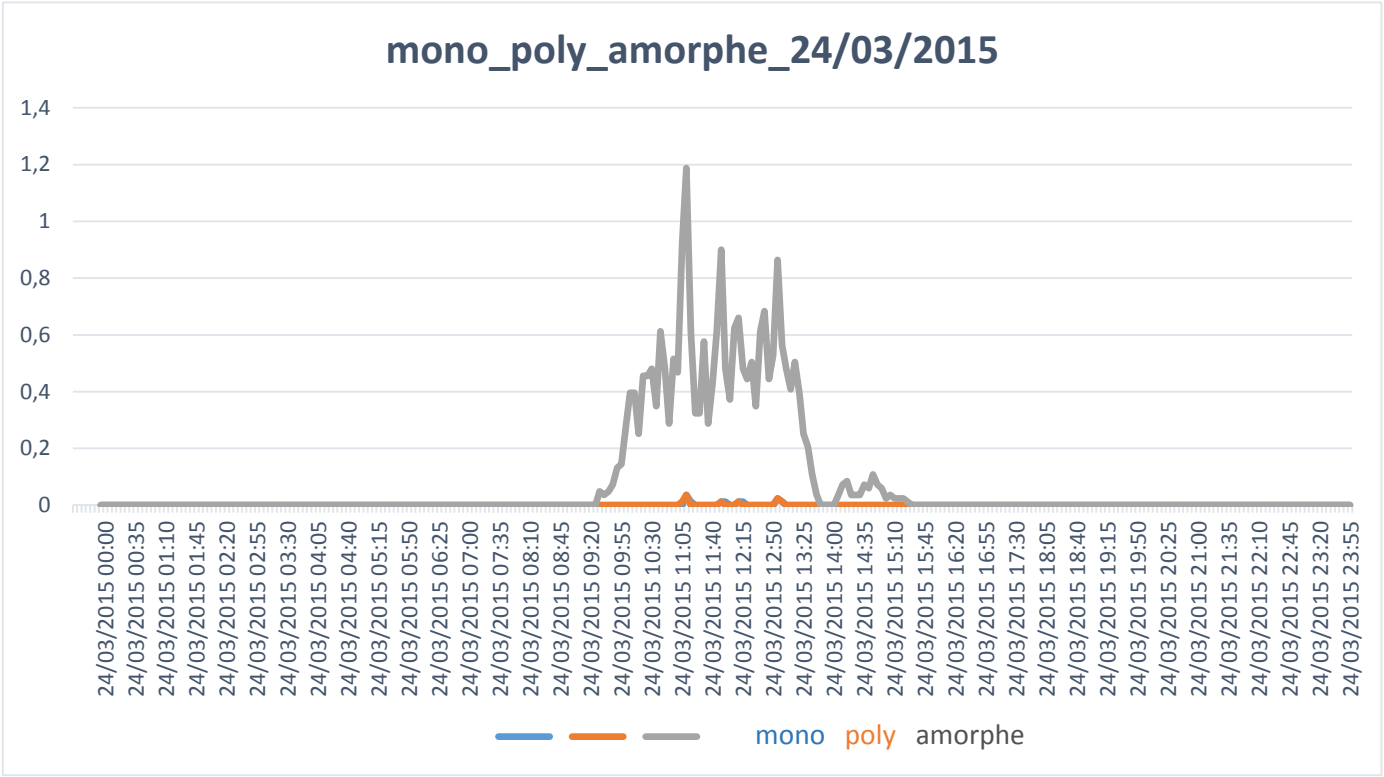


Figure 65: Puissance instantanée en KW générée par les trois types de panneaux PV durant le 24/03/2015

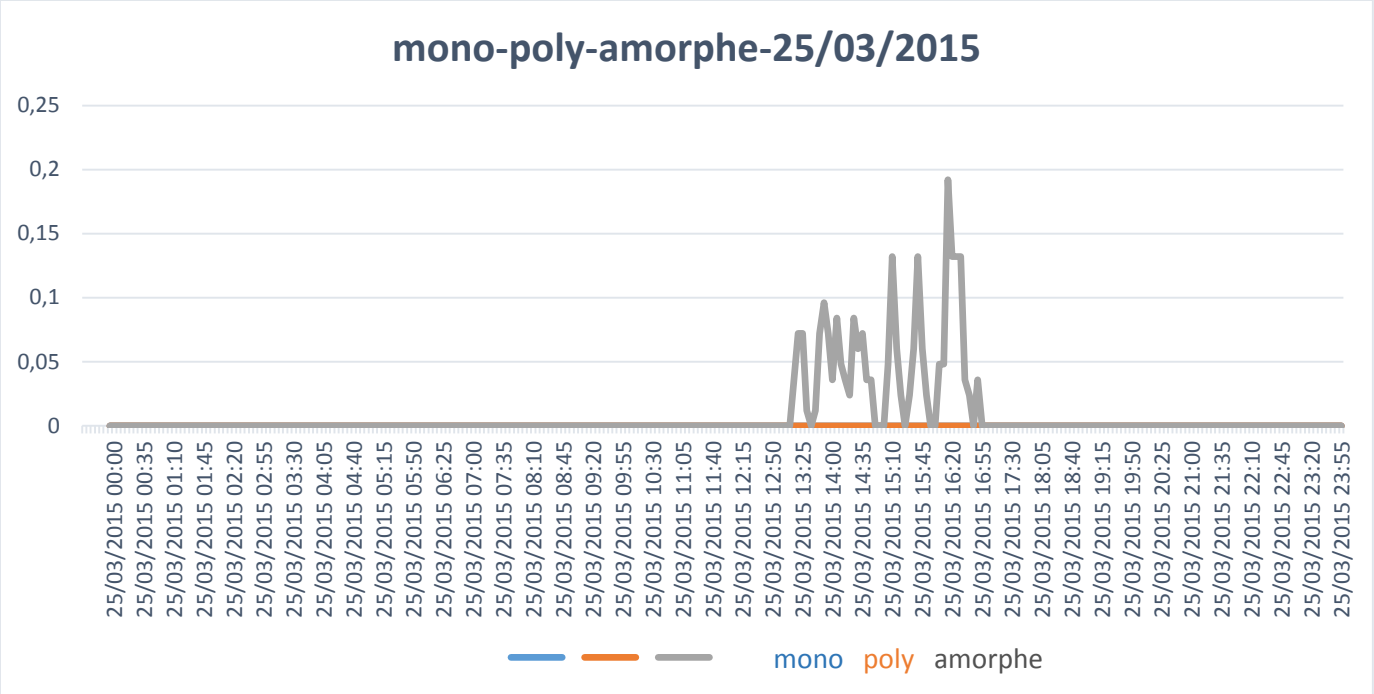


Figure 66 : Puissance instantanée en KW générée par les trois types de panneaux PV durant le 25/03/2015

Les figures 55, 61,62, 63 et 64 montrent que les rendements de conversion du monocristallin et du polycristallin sont faibles et identiques tout au long de la journée, alors que le rendement de l'amorphe est légèrement inférieur à celui du monocristallin et du polycristallin, ce qui indique que l'amorphe est peu sensible aux mauvaises conditions climatiques.

Les figures 65 et 66 confirment la remarque précédente à propos de l'amorphe. Les rendements du monocristallin et du polycristallin sont nuls, alors que le rendement de l'amorphe n'est pas nul, c'est-à-dire que lorsque l'énergie lumineuse atteint une certaine valeur minimale limite, le monocristallin et le polycristallin ne fonctionnent plus tandis que l'amorphe continue à générer de la puissance électrique même si elle est faible.

En effet, l'amorphe est plus performant que le monocristallin et le polycristallin au faible éclairement et en temps couvert.

4.3. Conclusion

La comparaison effectuée entre les trois types de panneaux solaires, basée sur les résultats fournis par l'installation photovoltaïque implantée à l'université Al Akhawayn et les résultats de la simulation, durant la période allant du 01/10/2014 au 31/04/2015, nous permet de conclure que :

- les résultats expérimentaux sont conformes aux résultats de la simulation; en effet, lors des journées ensoleillées, le polycristallin atteint la performance du monocristallin pendant les heures de puissance crête où le maximum de l'énergie lumineuse est reçu par le système photovoltaïque, par conséquent leurs rendements sont identiques et atteignent la valeur maximale possible.

- Lors du lever et coucher du soleil, le monocristallin est le plus performant, mais cela n'est pas important du fait que l'énergie lumineuse reçue par le système est faible, donc le rendement de conversion sera faible aussi.
- Les panneaux photovoltaïques amorphes sont moins efficaces par rapport aux autres types de panneaux photovoltaïque lorsque les conditions climatiques sont bonnes, ce résultats est totalement en accord avec la théorie.
- Lors des journées caractérisées par de mauvaises conditions climatiques, temps couvert et nuageux, les performances du monocristallin et polycristallins sont identiques tout au long de la journée, leurs rendements de conversion sont faibles. Alors que le rendement de l'amorphe n'est pas beaucoup influencé par les mauvaises conditions climatiques , ce résultat est aussi en accord avec la théorie

Sachant que les panneaux photovoltaïques à base du silicium monocristallin sont plus chère que ceux à base du silicium polycristallin , dû au procédé de fabrication qui nécessite beaucoup d'énergie pour obtenir un cristal pur, et tenant compte des résultats de cette étude, nous pouvons déduire que le polycristallin est le mieux adapté au fonctionnement des systèmes PV sous les conditions climatiques de la ville d'Ifrane.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce rapport de projet de fin d'étude réalisé à l'Université Al Akhawayn porte sur une étude comparative de panneaux solaires photovoltaïques monocristallins, polycristallins et amorphes dans les conditions météorologiques de la ville d'Ifrane, dans le but de repérer le type de panneaux solaires le mieux adapté au fonctionnement dans cette ville.

Dans un premier temps, nous avons donné un aperçu général sur l'énergie solaire et ses caractéristiques, l'énergie photovoltaïque ainsi que les différents types de systèmes photovoltaïques existants. Les avantages et les inconvénients du photovoltaïque et le potentiel solaire au Maroc.

Nous avons vu, dans un deuxième temps, la définition et le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque, son rendement, les différents types de cellules disponibles, la modélisation mathématique de la cellule, l'effet des variations climatiques. Enfin, Les différents groupements possibles des cellules sont décrits ainsi que la modélisation du panneau ou générateur photovoltaïque (GPV).

Ensuite, nous avons décrit le système photovoltaïque raccordé au réseau installé à l'Université Al Akhawayn et la méthode de recherche du point de puissance maximale utilisé par l'onduleur photovoltaïque.

Finalement, nous avons fait une étude comparative des performances des panneaux solaires photovoltaïques constituants l'installation photovoltaïque implanté à l'Université Al Akhawayn, en se basant sur une simulation avec le logiciel de simulation « PVSyst », et les résultats expérimentaux caractérisant le fonctionnement de cette installation photovoltaïque.

Cette étude comparative nous a permis de repérer le polycristallin comme étant le mieux adapté au fonctionnement sous les conditions climatiques de la ville d'Ifrane.

Le stage que nous avons effectué à l'Université Al Akhawayn, nous a permis d'être en contact direct avec un système photovoltaïque, et d'acquérir beaucoup de compétences et de connaissances concernant la gestion des installations photovoltaïques en utilisant des logiciels dédiés au photovoltaïque, ce qui représente une valeur ajoutée à la formation universitaire que nous avons acquis dans le domaine de la génie électrique.

Bibliographie

Boukli-Hacene Omar “Conception et réalisation d’un générateur photovoltaïque muni d’un convertisseur MPPT pour une meilleur gestion énergétique “ Thèse 2010/2011.Université Abou Bakr Belkaid,Tlemcen.

Helali Kamelia “ Modélisation d’une cellule photovoltaïque :étude comparative“ Mémoire de fin d’étude 2012.Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou.

Bendjellouli Zakaria “contribution à la modélisation d’une cellule photovoltaïque“ Mémoire de fin d’étude 2009.Université de Bechar.

Webographie

http://basetpe.free.fr/tpe1/solaire/historique_solaire.html

http://www.photovoltaique.guidenr.fr/cours-photovoltaique-2011

http://blog.alma-solarshop.fr/polycristallin-vs-monocristallin-le-vraifaux-pour-ecarter-les-idees-recues/

Annexe

1. Caractéristiques des panneaux solaires monocristallins du système PV étudié

Sunmodule® Plus SW 255 mono

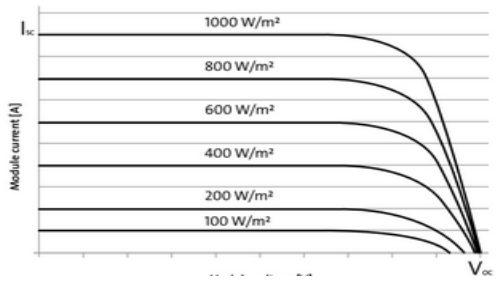
PERFORMANCE UNDER STANDARD TEST CONDITIONS (STC)*

Maximum power	P_{max}	255 Wp
Open circuit voltage	V_{oc}	37.8 V
Maximum power point voltage	V_{mpp}	31.4 V
Short circuit current	I_{sc}	8.66 A
Maximum power point current	I_{mpp}	8.15 A

*STC: 1000 W/m², 25°C, AM 1.5
1) Measuring tolerance (P_{max}) traceable to TUV Rheinland: +/- 2% (TUV Power Controlled).

THERMAL CHARACTERISTICS

NOCT	46 °C
TC I_{sc}	0.04 %/°C
TC V_{oc}	-0.30 %/°C
TC P_{mpp}	-0.45 %/°C
Operating temperature	-40°C to 85°C



PERFORMANCE AT 800 W/m², NOCT, AM 1.5

Maximum power	P_{max}	184.1 Wp
Open circuit voltage	V_{oc}	34.0 V
Maximum power point voltage	V_{mpp}	28.3 V
Short circuit current	I_{sc}	6.99 A
Maximum power point current	I_{mpp}	6.52 A

Minor reduction in efficiency under partial load conditions at 25°C: at 200 W/m², 100% (+/-2%) of the STC efficiency (1000 W/m²) is achieved.

COMPONENT MATERIALS

Cells per module	60
Cell type	Mono crystalline
Cell dimensions	6.14 in x 6.14 in (156 mm x 156 mm)
Front	Tempered glass (EN 12150)
Frame	Clear anodized aluminum
Weight	46.7 lbs (21.2 kg)

SYSTEM INTEGRATION PARAMETERS

Maximum system voltage SC II		1000 V
Max. system voltage USA NEC		1000 V
Maximum reverse current		16 A
Number of bypass diodes		3
*UL Design Loads**	*Two rail system*	113 psf downward 64 psf upward
*UL Design Loads**	*Three rail system*	170 psf downward 64 psf upward
*IEC Design Loads**	*Two rail system*	113 psf downward 50 psf upward

* Please refer to the Sunmodule installation instructions for the details associated with these load cases.

2. Caractéristiques des panneaux solaires polycristallins du système étudié

Sunmodule® Plus SW 250 – 255 poly

COMPORTEMENT LORS DE CONDITIONS DE TEST STANDARD (STC*)

		SW 250	SW 255
Puissance au point de puissance maximale	P_{max}	250 Wc	255 Wc
Tension à vide	U_{oc}	37,6 V	38,0 V
Tension au point de puissance maximale	U_{mpp}	30,5 V	30,9 V
Courant de court-circuit	I_{sc}	8,81 A	8,88 A
Courant au point de puissance maximale	I_{mpp}	8,27 A	8,32 A

Tolérance sur la mesure de puissance (P_{max}) attribuée par TÜV Rheinland : +/- 2% (TÜV Power controlled) *STC : 1000W/m², 25°C, AM 1.5

COMPORTEMENT À 800W/m², NOCT, AM 1.5

		SW 250	SW 255
Puissance au point de puissance maximale	P_{max}	185,4 Wc	188,7 Wc
Tension à vide	U_{oc}	34,2 V	34,5 V
Tension au point de puissance maximale	U_{mpp}	27,8 V	28,1 V
Courant de court-circuit	I_{sc}	7,24 A	7,30 A
Courant au point de puissance maximale	I_{mpp}	6,68 A	6,72 A

Faible réduction du rendement en conditions de charge partielle à 25 °C : à 200 W/m², la puissance est égale à 100 % (+/- 2 %) de la puissance en condition STC.

3. Caractéristiques des panneaux solaires amorphes du système étudié.

Product Specifications:

Model	NT - 160AF	NT - 155AF	NT - 150AF
Nominal Power [W][-0/+3%]	160	155	150
Open Circuit Voltage [V]	85.5	85.5	85.5
Short Circuit Current [A]	2.57	2.56	2.54
Maximum Power Voltage [V]	65.9	65.2	64.7
Maximum Power Current [A]	2.43	2.38	2.32
Initial Values	Pmax: Refer to installation manual Voc: Approximately 2% higher than stabilized voltage		
Maximum System Voltage [V]	1000	1000	1000
Dimension [mm]	1412*1112*35		
Weight [Kg]	19.5		
Connector	MC 4 / MC 4 Compatible		
Cable Size [mm^2]	2.5		

Temperature Coefficients:

Nominal Power [W]	-0.28% / ℃
Open Circuit Voltage [V]	-0.32% / ℃
Short Circuit Current [A]	0.07% / ℃

4. Caractéristiques de l'onduleur photovoltaïque du système étudié

SUNNY BOY 2000HF / 2500HF / 3000HF

Caractéristiques techniques	Sunny Boy 2000HF	Sunny Boy 2500HF	Sunny Boy 3000HF
Entrée (DC)			
Puissance DC max. (quand cos φ=1)	2100 W	2600 W	3150 W
Tension DC max.	700 V	700 V	700 V
Plage de tension photovoltaïque, MPPT	175 V - 560 V	175 V - 560 V	210 V - 560 V
Tension nominale DC	530 V	530 V	530 V
Tension DC min. / tension de démarrage	175 V / 220 V	175 V / 220 V	175 V / 220 V
Courant max. par MPPT / par entrée	12 A / 12 A	15 A / 15 A	15 A / 15 A
Nombre de MPP trackers / Nombre max. d'entrées (parallèle)	1 / 2	1 / 2	1 / 2
Sortie (AC)			
Puissance nominale AC (pour 230 V, 50 Hz)	2000 W	2500 W	3000 W
Puissance apparente AC max.	2000 VA	2500 VA	3000 VA
Tension nominale AC ; plage	220, 230, 240 V ; 180 - 280 V	220, 230, 240 V ; 180 - 280 V	220, 230, 240 V ; 180 - 280 V
Fréquence du réseau AC ; plage	50, 60 Hz ; ± 4,5 Hz	50, 60 Hz ; ± 4,5 Hz	50, 60 Hz ; ± 4,5 Hz
Courant de sortie max.	11,4 A	14,2 A	15 A
Facteur de puissance (cos φ)	1	1	1
Phases d'injection / Phases de raccordement	1 / 1	1 / 1	1 / 1
Rendement			
Rendement max. / Euro-eta	96,3 % / 95,0 %	96,3 % / 95,3 %	96,3 % / 95,4 %
Dispositifs de protection			
Protection inversion de polarité DC	●	●	●
Interrupteur sectionneur DC ESS	●	●	●
Résistance aux courts-circuits AC	●	●	●
Surveillance du défaut à la terre	●	●	●
Surveillance du réseau (SMA Grid Guard)	●	●	●
Séparation galvanique / Unité de surveillance du courant de défaut, sensible à tous les courants	●/–	●/–	●/–
Classe de protection / Catégorie de surtension	I / III	I / III	I / III
Caractéristiques générales			
Dimensions (L / H / P) en mm	348 / 580 / 145	348 / 580 / 145	348 / 580 / 145
Poids	17 kg	17 kg	17 kg
Plage de températures de fonctionnement	-25 °C ... +60 °C	-25 °C ... +60 °C	-25 °C ... +60 °C
Émission de bruits (typiques)	38 dB(A)	38 dB(A)	38 dB(A)
Autoconsommation (nuit)	< 1 W	< 1 W	< 1 W
Topologie	Transformateur HF	Transformateur HF	Transformateur HF
Système de refroidissement	OptiCool	OptiCool	OptiCool
Type de protection électronique / Zone de raccordement (selon IEC 60529)	IP65 / IP54	IP65 / IP54	IP65 / IP54
Catégorie climatique (selon IEC 60721-3-4)	4K4H	4K4H	4K4H