

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de L'ingénierat  
Département : Electronique  
Domaine : Sciences et Techniques  
Filière : Electronique  
Spécialité : Instrumentation

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master  
Thème :

**Etude et réalisation d'une installation photovoltaïque**

Présenté par : *MOKHTARI MERIEM*

Encadrant : *BOUCHAALA ALI* M.A.A Université d'Annaba

**Jury de Soutenance :**

AIT IZEM TAREK	M.C.B	Université d'Annaba	Président
BOUCHAALA ALI	M.A.A	Université d'Annaba	Encadrant
AZIZI AMINA	Docteur	Université d'Annaba	Co-encadrant
BEKAIK MOUNIR	M.C.B	Université d'Annaba	Examineur
AZZOUZI AHMIDET	Formateur	Membre de l'Académie de Cambridge	Membre invité

Année Universitaire : 2020/2021

# بسم الله الرحمن الرحيم

اللهم لا تجعلني أصاب بالغرور  
إذا نجحت

ولا باليأس إذا أخفقت

وذكرني أن الإخفاق هو التجربة  
التي تسبق النجاح

اللهم إذا أعطيتني علماً فلا  
تأخذ تواضعي

وإذا أعطيتني تواضعاً

فلا تأخذ اعتزازي بكرامتي

## Résumés

### الخلاصة :

يتم ضمان قدر كبير من إنتاج الطاقة في العالم من الموارد الأحفورية، وبهذا المعدل، فإن احتياطيات الوقود الأحفوري لن تكون قادرة إلا على تلبية الاحتياجات لبضعة عقود أخرى.

في حالة الطاقة الكهربائية، قد تكون الحلول البديلة هي الطاقة المتجددة التي تأتي من الشمس، الرياح، الطاقة الحرارية الجوفية، الشلالات، المد والجزر أو الكتلة الحيوية؛ ينتج عن تشغيلها القليل من النفايات أو لا ينتج عنها انبعاثات ملوثة. نوع إنتاج الطاقة الذي تمت دراسته في هذه الرسالة هو الطاقة الكهروضوئية الشمسية.

يهدف هذا العمل إلى إجراء دراسة وإنجاز تركيب كهروضوئي لمنزل باستخدام برنامج "PVsyst"؛ ولصنع نظام ضخ شمسي مصغر بواسطة اردوينو.

### Abstract :

Much of the world's energy production is ensured from fossil resources. At this rate, fossil fuel reserves will only be able to meet needs for a few more decades.

In the case of electrical energy, the alternative solutions may be renewable energy which comes from the sun, wind, geothermal energy, waterfalls, tides or biomass; their operation generates little or no waste and polluting emissions. The type of energy production studied in this dissertation is solar photovoltaic energy.

This work aims to make a study and realization of a photovoltaic installation for a home using the software "PVsyst"; and to make a mini solar pumping system driven by Arduino.

### Résumé :

La grande partie de la production mondiale de l'énergie est assurée à partir des ressources fossiles, A ce rythme, les réserves en énergies fossiles ne pourront assurer les besoins que pour quelques décennies encore.

Dans le cas de l'énergie électrique, les solutions alternatives peuvent être les énergies renouvelables qui provient du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse ; leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Le type de production d'énergie étudié dans ce mémoire est l'énergie solaire photovoltaïque.

Ce travail vise à faire une étude et réalisation d'une installation photovoltaïque pour une habitation en utilisant le logiciel « PVsyst » ; et de réaliser un mini système de pompage solaire piloté par Arduino.

## **Remerciement**

*Le plus grand merci revient à Dieu qui lui seul nous guide dans le bon sens durant notre vie et qui ma aider à réaliser ce modeste travail.*

*Je voudrais tout d'abord exprimer mes sincères remerciements à Monsieur Azzouzi Ahmidet, à Madame Azizi Amina, ainsi qu'à Monsieur Boutarene Nabil, qui m'ont suivi tout au long de cette période, leurs conseils, leur patience, leur disponibilité et l'intérêt qu'ils ont portés à ce travail.*

*Je remercie Monsieur Bouchaala Ali, M.A.A à l'Université Badji Mokhtar - Annaba -, pour son encadrement, ainsi qu'à Madame Azizi Amina, Docteur à l'Université Badji Mokhtar - Annaba -, pour son Co-encadrement et ces conseils avisés et pour son orientation tout au long de ce travail.*

*Je remercie Monsieur Ait Izem Tarek, M.C.B à l'Université Badji Mokhtar - Annaba -, de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.*

*Je remercie Monsieur Bekaik Mounir, M.C.B à l'Université Badji Mokhtar - Annaba -, pour avoir accepté de juger ce travail.*

*J'exprime mes vifs remerciements à Monsieur Azzouzi Ahmidet, Membre de l'Académie de Cambridge, de m'avoir fait l'honneur d'accepter d'assister ma soutenance.*

*Je remercie aussi tout le corps enseignant et administratif qui a contribué à ma formation universitaire.*

## *Dédicace*

*A ma chère maman ... Vous avez toujours été mon école de patience, de confiance et surtout d'espoir et d'amour. Vous êtes et vous resterez pour moi ma référence, la lumière qui illumine mon chemin.*

*A mon cher papa ... qui m'a quitté quand j'étais bébé ... qui je ne me souviens d'aucun détail sur lui ... Puisse Dieu vous avoir en sa sainte miséricorde et que ce travail soit une prière pour votre âme.*

*A mes tantes et oncles maternels ... Je profite de la présente occasion pour vous remercier pour tout le soutien, la sympathie et l'amour que vous m'accordez. Que Dieu le tout puissant vous comble de santé, de bonheur et vous prouve une longue vie pleine de joie.*

*A mon chère frère ... ma moitié ... ma fierté ... j'implore le tout-puissant pour qu'il t'accorde une bonne santé et une vie longue et heureuse.*

*A toute ma famille « FEDJI » et « MOKHTARI » ; A tous mes amies ; A tous mes collègues de la promo 2021 ; Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin ; je vous remercier pour tous le soutien que vous m'accorder.*



*A ma très chère maman ...*



*Aucune dédicace ma très chère maman, ne pourrait exprimer la profondeur des sentiments que j'éprouve pour toi, tes sacrifices innombrables et ton dévouement firent pour moi un encouragement.*

*Tu as guetté mes pas, et m'a couvée de tendresse, ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.*

*Ce travail est le résultat de l'esprit de sacrifice dont tu as fait preuve, de l'encouragement et le soutien que tu n'as cessé de manifester, j'espère que tu y trouveras les fruits de ta semence et le témoignage de ma grande fierté de t'avoir comme mère.*

*Tu m'as aidée et soutenu pendant de nombreuses années avec à chaque fois une attention renouvelée. Puisse Dieu, tout puissant te comble de santé, de bonheur et te procure une longue vie.*

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1:</b> Le comparatif des rendements des différents types de cellules.....	26
<b>Tableau 2:</b> Puissance mise en jeu par les équipements pour une consommation d'une journée .....	43
<b>Tableau 3:</b> Tableau comparative entre l'étude manuel et l'étude par PVsyst .....	61

## Liste de figures

### Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

<b>Figure 1:</b> L'énergie éolienne.....	6
<b>Figure 2:</b> Une éolienne.....	7
<b>Figure 3:</b> L'énergie hydraulique.....	8
<b>Figure 4:</b> Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique .....	8
<b>Figure 5:</b> L'énergie marémotrice .....	9
<b>Figure 6:</b> L'énergie géothermique.....	10
<b>Figure 7:</b> Schéma d'une installation géothermique .....	10
<b>Figure 8:</b> L'énergie de la biomasse.....	11
<b>Figure 9:</b> L'énergie solaire .....	12
<b>Figure 10:</b> Structure d'un panneau PV .....	13

### Chapitre II : L'énergie solaire photovoltaïque

<b>Figure 11:</b> La carte de l'irradiation solaire en Algérie .....	15
<b>Figure 12:</b> Deux exemples de modules à concentration thermodynamique.....	16
<b>Figure 13:</b> Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique.....	17
<b>Figure 14:</b> Schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome.....	18
<b>Figure 15:</b> Installation ou centrale électrique photovoltaïque raccordée au réseau .....	19
<b>Figure 16:</b> Composantes du rayonnement solaire au sol .....	20
<b>Figure 17:</b> Carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle en kWh/m <sup>2</sup> /jour.....	21
<b>Figure 18:</b> Structure basique d'une cellule solaire .....	22
<b>Figure 19:</b> Cellule monocristalline.....	23

<b>Figure 20:</b> Cellule polycristalline .....	24
<b>Figure 21:</b> Deux exemples de modules utilisant le Sia (silicium amorphe) .....	25
<b>Figure 22:</b> Cellule solaire tout organique sur substrat souple .....	25
<b>Figure 23:</b> Ruban métallique d'une cellule .....	26
<b>Figure 24:</b> Encapsulation des cellules .....	27
<b>Figure 25:</b> L'angle d'incidence maximal (a) en été ; (b) en hiver .....	28
<b>Figure 26:</b> Courbe de charge.....	30
<b>Figure 27:</b> Les composants interne du PWM.....	30
<b>Figure 28:</b> Rendement puissance MPPT.....	31
<b>Figure 29:</b> Schéma de principe de la batterie.....	33
<b>Figure 30:</b> Schéma de principe des super condensateurs .....	33
<b>Figure 31:</b> Schéma de principe de la pile à combustible.....	34
<b>Figure 32:</b> Principe de fonctionnement d'onduleur .....	35

### **Chapitre III : Étude d'une installation photovoltaïque avec le logiciel PVsyst**

<b>Figure 33:</b> Rendement d'onduleur photovoltaïque en fonction de taux de charge .....	41
---	----

### **Chapitre IV : Pompage solaire automatique commandé par Arduino**

<b>Figure 34:</b> Schéma synoptique simplifié de pompage solaire.....	64
<b>Figure 35:</b> Schéma détaillé de pompage solaire .....	64
<b>Figure 36:</b> Schéma détaillé de la partie électronique.....	65
<b>Figure 37:</b> Principe de fonctionnement du capteur à ultrasons .....	66
<b>Figure 38:</b> Schéma d'un relais électromécanique .....	67

## Table des matières

Résumés .....	II
Remerciement .....	III
Dédicace.....	IV
Liste des tableaux .....	VI
Liste de figures.....	VI
Table des matières .....	VIII
Introduction générale .....	2

# Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

I-1- Introduction.....	5
I-2- Les énergies renouvelables .....	5
I-2-1- L'énergie éolienne .....	6
I-2-1-1- Principe de fonctionnement .....	7
I-2-2- L'énergie hydraulique .....	8
I-2-2-1- Principe de fonctionnement .....	8
I-2-3- L'énergie marémotrice .....	9
I-2-3-1- Principe de fonctionnement .....	9
I-2-4- L'énergie géothermique .....	10
I-2-4-1- Principe de fonctionnement .....	10
I-2-5- L'énergie de la biomasse .....	11
I-2-5-1- Principe de fonctionnement .....	11
I-2-6- L'énergie solaire .....	12
I-2-6-1- La cellule photovoltaïque .....	12
I-2-6-2- Fonctionnement d'une installation solaire .....	13
I-3- Conclusion .....	13

# Chapitre II :

## L'énergie solaire photovoltaïque

II-1- Introduction .....	15
II-2- Potentiel solaire en Algérie .....	15
II-3- Les différentes technologies solaires .....	16
II-3-1- Solaire à concentration thermodynamique .....	16
II-3-2- Solaire thermique .....	16
II-3-3- Solaire photovoltaïque .....	17
II-4- Les différents types des systèmes photovoltaïques .....	18
II-4-1- Installations électriques photovoltaïques autonomes .....	18
II-4-2- Installations ou centrales électriques photovoltaïques raccordées au réseau .....	19
II-4-3- Installations ou centrale électriques photovoltaïques hybride .....	19
II-5- Rayonnement solaire .....	20
II-6- La cellule PV .....	21
II-6-1- Type des cellules photovoltaïques .....	22
II-6-1-1- Le silicium .....	22
II-6-1-2- Les couches minces .....	24
II-6-1-3- Cellules organiques et plastiques .....	25
II-7- Les modules photovoltaïques .....	26
II-7-1- La constitution d'un module photovoltaïque .....	26
II-7-2- Branchement des modules photovoltaïques .....	27
II-7-3- Angle d'inclinaison des modules photovoltaïques .....	28
II-8- Le régulateur .....	29
II-8-1- Les critères pour choisir son régulateur solaire .....	29
II-8-2- Type de régulateur .....	29
II-8-2-1- Le régulateur PWM .....	29
II-8-2-2- Le régulateur MPPT .....	30
II-9- Stockage de l'énergie électrique photovoltaïque .....	32

II-9-1- Les batteries .....	32
II-9-2- Les super-condensateurs .....	33
II-9-3- Les piles à combustible .....	34
II-9-4- Les volants d'inertie .....	34
II-9-5- Stockage hybride .....	35
II-10- L'onduleur .....	35
II-11- Consignes d'utilisation .....	36
II-12- Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....	36
II-12-1- Les avantages de l'énergie photovoltaïque .....	36
II-12-2- Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....	37
II-13- Conclusion .....	37

## **Chapitre III :**

# Étude d'une installation photovoltaïque avec le logiciel PVsyst

III-1- Introduction .....	39
III-2- Les étapes de conception d'une installation photovoltaïque .....	39
III-2-1- Etape 1 : L'estimation des besoins journaliers de l'utilisateur en électricité .....	39
III-2-2- Etape 2 : Estimation de l'ensoleillement sur le site de l'installation du générateur PV .....	39
III-2-3- Etape 3 : Estimation du champ photovoltaïque (tension et puissance crête installée) .....	39
III-2-4- Etape 4 : Estimation de la capacité de stockage de la batterie et choix de la Technologie ..	40
III-2-5- Etape 5 : Dimensionnement des câbles et plan de câblage .....	40
III-2-6- Etape 6 : Choix de régulateur et de l'onduleur .....	40
III-2-6-1- Choix du régulateur .....	40
III-2-6-2- Choix de l'onduleur .....	41
III-3- Présentation de PVsyst .....	41
III-4- Présentation de projet .....	43
III-5- Conception du projet .....	43
III-5-1- Le calcul manuel .....	43

III-5-2- Etude par PVsyst .....	45
III-6- Rapport finale de la simulation .....	57
III-7- Etude comparative .....	61
III-8- Conclusion .....	61

## **Chapitre IV :**

### **Pompage solaire automatique commandé par Arduino.**

IV-1- Introduction .....	63
IV-2- Avantages .....	63
IV-3- Principe de fonctionnement .....	64
IV-4- Schéma synoptique .....	64
IV-5- Schéma de la partie électronique .....	65
IV-6- Matériels utilisés .....	65
IV-6-1- Pompe à eau solaire .....	65
IV-6-2- L'Arduino .....	65
IV-6-3- Capteur à ultrasons HC-SR04 .....	66
IV-6-4- Le relais .....	66
IV-6-5- LED .....	67
IV-7- L'organigramme principale du programme .....	67
IV-8- Le programme .....	68
IV-9- Résultats et discussion .....	70
IV-10- Conclusion .....	70
Conclusion générale .....	72
Perspectives .....	72
Bibliographie .....	74



# **Introduction générale**

## **Introduction générale :**

Le 21ème siècle est considéré par beaucoup comme le siècle du développement durable, et l'énergie est l'un des défis majeurs, dans une société basée sur l'information et la communication. Pouvez-vous imaginer un seul jour sans électricité ? Sans nul doute, nous consommons de plus en plus d'énergie, et nous aimerions la produire proprement.

La grande partie de la production mondiale de l'énergie est assurée à partir des ressources fossiles, A ce rythme, les réserves en énergies fossiles ne pourront assurer les besoins que pour quelques décennies encore car une consommation excessive des ressources naturelles réduit les réserves de façon dangereuse pour les générations futures.

Dans le cas de l'énergie électrique, les solutions alternatives peuvent être les énergies renouvelables qui provient du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse ; leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes : ce sont les énergies de l'avenir. Aujourd'hui, elles sont sous-exploitées par rapport à leur potentiel. Ainsi, les énergies renouvelables couvrent seulement 20 % de la consommation mondiale d'électricité. Le type de production d'énergie étudié dans ce mémoire est l'énergie solaire photovoltaïque.

Le photovoltaïque offre une multitude d'avantages :

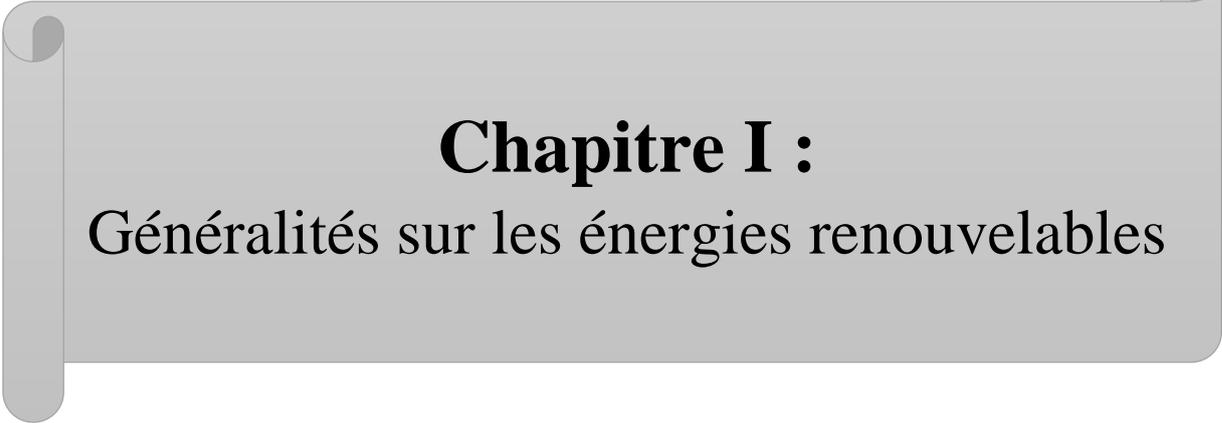
- La production de cette électricité renouvelable n'émet pas de gaz à effet de serre.
- La lumière du soleil étant disponible partout et quasi-inépuisable.
- L'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne, dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville, et aussi bien au Sud que dans le Nord.
- Le photovoltaïque produit l'électricité au plus près de son lieu de consommation de manière décentralisée directement chez l'utilisateur, ce qui la rend accessible à une grande partie de la population mondiale. [10]

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire. En effet, vu l'importance de l'intensité du rayonnement reçu, la durée de l'ensoleillement dépassant les dix heures par jour pendant plusieurs mois, nous motive de nous intéresser à ce type d'énergie.

L'objectif de ce travail, est de faire une étude et réalisation d'une installation photovoltaïque pour une habitation en utilisant le logiciel « PVsyst », et de réalisé un mini système de pompage solaire piloté par Arduino.

Pour atteindre ces objectifs, ce rapport de mémoire est divisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente les différentes sources d'énergies renouvelables existantes.
- Le deuxième chapitre présente les bases indispensables à la compréhension de l'énergie solaire ; quelques notions sur le rayonnement solaire ; les diverses technologies solaires ; les différents types des systèmes photovoltaïques ; la cellule photovoltaïque et ces différents types ; les équipements utilisés dans ce domaine. Enfin, nous citerons quelques consignes d'utilisation, les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.
- Le troisième chapitre présente les étapes nécessaires pour concevoir un système photovoltaïque autonome ; une présentation du logiciel « PVsyst » ; la présentation et la conception du notre projet étudié en utilisant le calcule manuel et le logiciel « PVsyst » avec le rapport final de la simulation. Enfin, on va faire une étude comparative entre les deux méthodes
- Le dernier chapitre présente d'une façon générale un mini système de pompage solaire ; ses avantages et le principe de fonctionnement de système de commande ; le schéma synoptique simplifier et détaillé de pompage solaire ; le schéma de la partie électronique accompagné par le matériel utilisé dans cette partie ; l'organigramme et le programme Arduino de notre système de commande. Enfin, le principe de fonctionnement et discussion des résultats.



**Chapitre I :**  
Généralités sur les énergies renouvelables

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

La production d'énergie électrique utilise principalement des combustibles fossiles et fissiles (nucléaire). L'utilisation systématique des combustibles fossiles, tels que le pétrole, le charbon ou le gaz naturel, cela permet d'avoir de faibles coûts de production mais conduit à le rejet de grandes quantités de gaz polluant et de gaz à effet de serre. Cette méthode de production d'électricité est responsable de 40 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>. L'énergie d'origine nucléaire ne rejette pas de gaz carbonique, mais elle souffre d'une mauvaise image à cause des risques encourus. En effet, les risques d'accidents liés à leur travail mais les conséquences d'un accident seraient catastrophiques. D'autre part, le traitement des déchets issus de ce mode de production est très coûteux : La radioactivité des produits traités reste élevée durant de nombreuses années. Enfin, les réserves d'uranium sont comme celles de pétrole limitées (moins de 100 ans au rythme actuel de consommation).

Bien que notre pays soit excédentaire en production électrique aujourd'hui, l'avenir n'est donc pas prometteur sur les ressources en énergies fossiles dont les réserves ne cessent de diminuer et dont les prix fluctuent énormément en fonction de la conjoncture. La préparation de l'avenir dans les domaines de production énergétique doit se prévoir dès aujourd'hui pour pouvoir faire face progressivement aux changements énergétiques inévitables. Chaque innovation et chaque avancée en matière de recherche n'aura de retombées que dans une dizaine d'années au mieux, le temps d'effectuer les tests nécessaires et d'envisager la mise en production sans risque pour l'utilisateur autant pour sa santé que pour les installations électriques [1].

A cause de tous ces problèmes, et pour limiter l'emploi de l'énergie d'origine combustible. Certains pays, se sont tournés vers une nouvelle forme d'énergie dite « Renouvelable ».

## **I-2- Les énergies renouvelables :**

Les énergies renouvelables désignent un ensemble de moyens pour produire de l'énergie à partir de sources ou de ressources théoriquement illimitées, disponibles dans la nature et exploitable par des technologies de nos jours maîtriser.

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies

renouvelables [1]. Le choix du type de production dépendra de la source d'énergie à exploiter là où elle est potentiellement exploitable.

### I-2-1- L'énergie éolienne :

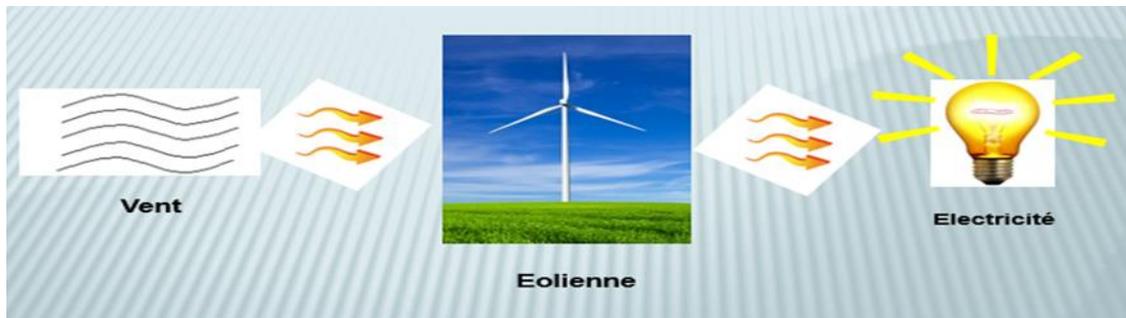


Figure 1: L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est connue depuis des milliers d'années au travers des moulins à vent et de la navigation.

L'énergie éolienne est une forme indirecte d'énergie solaire, puisque les vents sont générés par des différences de pression et de température dans l'atmosphère causées par le rayonnement solaire. L'énergie éolienne désigne l'énergie cinétique véhiculée par les masses d'air, c'est-à-dire par les vents, autour de notre planète. Il s'agit d'une énergie renouvelable de plus en plus utilisée pour produire une électricité verte à grande échelle. [2]

Celle-ci peut être transformée et utilisée à plusieurs fins :

- **La transformation en énergie mécanique :** le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (voilier ou char à voile), pour pomper de l'eau (éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.
- **La production d'énergie électrique :** l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour créer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène), un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie. Une éolienne produisant de l'électricité est parfois qualifiée d'aérogénérateur. [3]

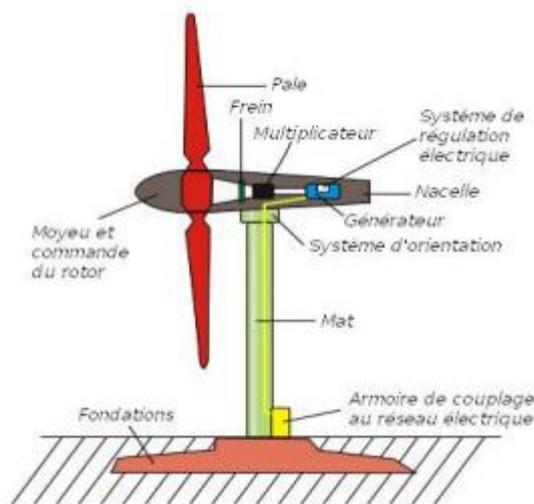
L'énergie éolienne peut être utilisée de deux manières :

- **Conservation de l'énergie mécanique :** le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule, pour pomper de l'eau ou pour faire tourner la meule d'un moulin.

- **Transformation en énergie électrique** : l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

### **I-2-1-1- Principe de fonctionnement :**

L'éolienne est constituée généralement des éléments mécaniques et électriques qui sont illustrés par la figure ci-dessus :



**Figure 2: Une éolienne**

La machine se compose de 3 pales portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical. Cet ensemble est fixé par une nacelle qui abrite un générateur. Un moteur électrique permet d'orienter la partie supérieure afin qu'elle soit toujours face au vent.

Les pales permettent de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute. La vitesse de rotation des pales est fonction de la taille de celles-ci. Plus les pales seront grandes, moins elles tourneront rapidement.

Le générateur transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à grande vitesse (de 1 000 à 2 000 tours par minute) pour produire de l'électricité. Ainsi, le multiplicateur a pour rôle d'accélérer le mouvement lent des pales.

## I-2-2- L'énergie hydraulique :



Figure 3: L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est une énergie renouvelable très faiblement émettrice de gaz à effet de serre. Cette source d'énergie renouvelable exploite les mouvements de l'eau actionnés par le Soleil et la gravité à travers le cycle de l'eau, les marées et les courants marins.

Qu'elles utilisent les chutes d'eau naturelles (cascades) ou artificielles (barrages hydroélectriques), le débit des cours d'eau ou les courants marins (marée, circulation thermo haline, etc.), les centrales hydrauliques produisent de l'énergie mécanique convertie la plupart du temps en électricité (hydroélectricité). [4]

### I-2-2-1- Principe de fonctionnement :

La production d'électricité hydraulique exploite l'énergie mécanique (cinétique et potentielle) de l'eau. Le principe utilisé pour produire de l'électricité avec la force de l'eau est le même que pour les moulins à eau de l'Antiquité. Au lieu d'activer une roue, la force de l'eau active une turbine qui déclenche un alternateur et produit de l'électricité.

Ces installations sont appelées des centrales hydrauliques ou hydroélectriques. Ce sont ces constructions gigantesques qui enjambent certains fleuves ou rivières ou encore ces impressionnants barrages que l'on voit aux confins des lacs, mais également des petites centrales sur des petits cours d'eau. [5]

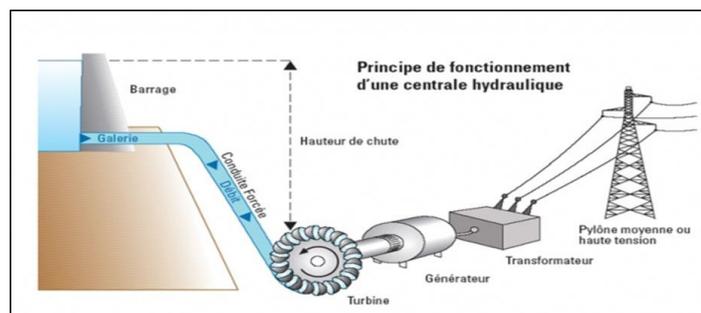


Figure 4: Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique

### I-2-3- L'énergie marémotrice :

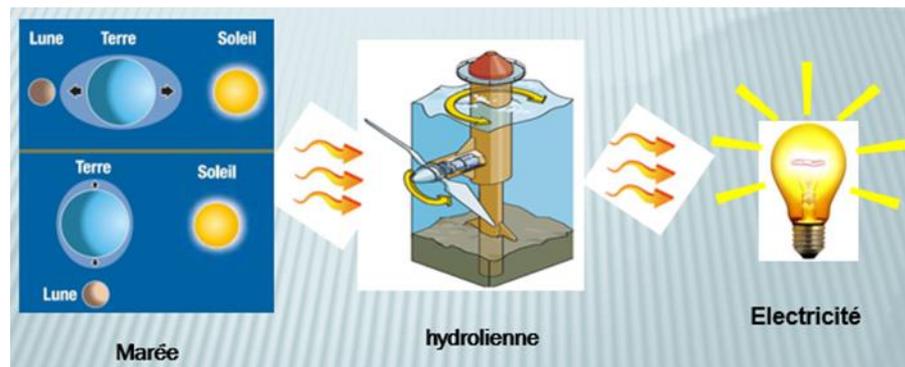


Figure 5: L'énergie marémotrice

L'énergie marémotrice est issue des mouvements de l'eau créés par les marées et causés par l'effet conjugué des forces de gravitation de la Lune et du Soleil. Elle est utilisée sous forme d'énergie potentielle grâce à l'élévation du niveau de la mer ou sous forme d'énergie cinétique grâce aux courants des marées.

#### I-2-3-1- Principe de fonctionnement :

Le phénomène de marée est synchronisé par la différence des temps de rotation entre la Terre sur elle-même (24 heures) et la Lune sans son mouvement autour de la Terre (28 jours), avec en outre un effet de la rotation de la Terre autour du Soleil (une année), et il est dû aux forces d'attraction gravitationnelles exercées entre ces trois corps. Il s'ensuit qu'on peut dire que le globe terrestre tourne "à l'intérieur" d'un globe d'eaux océaniques allongé dans les deux sens par l'attraction lunaire (mais aussi, et indépendamment, par l'attraction solaire ; dans une autre direction : celle du soleil).

En toute rigueur, l'énergie dite marémotrice constitue donc une récupération d'énergie faite sur l'énergie cinétique du couple Terre-Lune.

L'énergie correspondante peut être captée sous deux formes :

- Énergie potentielle (en exploitant les variations du niveau de la mer) : c'est la technique utilisée dans une usine marémotrice
- Énergie cinétique (en exploitant les courants de marée, qui peuvent être captés par des turbines, ou hydroliennes). [6]

## I-2-4- L'énergie géothermique :

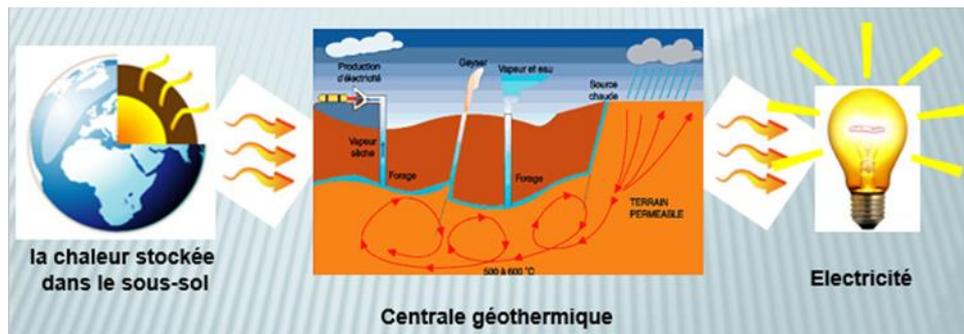


Figure 6: L'énergie géothermique

La géothermie, du grec géo (la terre) et thermos (la chaleur) est un mot qui désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur.

Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité. [7]

### I-2-4-1- Principe de fonctionnement :

Pour utiliser cette énergie souterraine, on envoie de l'eau froide sous la Terre. Cette eau froide se réchauffe. Elle est alors pompée et ramenée à la surface où elle est utilisée soit pour produire de l'électricité dans une centrale, soit directement en tant qu'eau chaude dans les logements (eau chaude pour la douche, les radiateurs...).

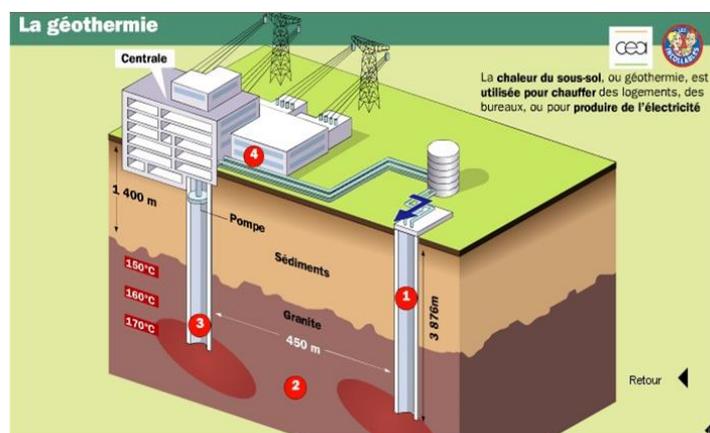


Figure 7: Schéma d'une installation géothermique

## I-2-5- L'énergie de la biomasse :

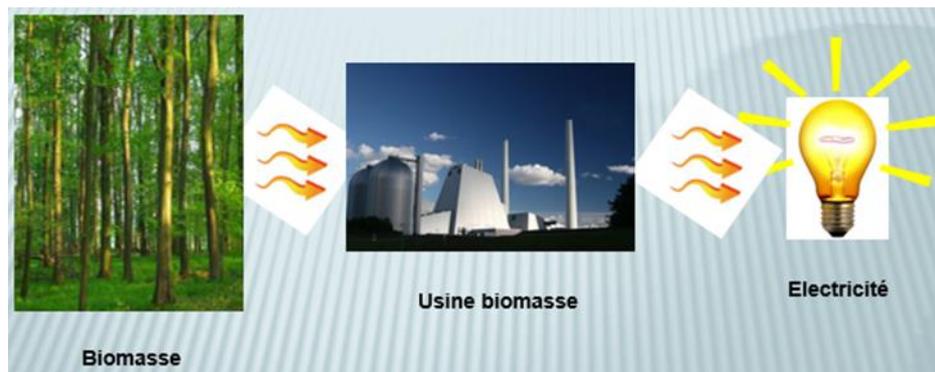


Figure 8: L'énergie de la biomasse

L'énergie biomasse est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme depuis la découverte du feu à la préhistoire. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, dans des centrales biomasse.

- **La biomasse par combustion :** Les déchets sont directement brûlés en produisant de la chaleur, de l'électricité ou les deux (cogénération). Cela concerne le bois, les déchets des industries de transformation du bois et les déchets végétaux agricoles (paille, canne à sucre, arachide, noix de coco...).
- **La biomasse par méthanisation :** Les déchets sont d'abord transformés en un biogaz, par fermentation grâce à des micro-organismes (bactéries). Le biogaz est ensuite brûlé. Ce biogaz est proche du gaz naturel et majoritairement composé de méthane. Cela concerne les déchets ménagers, le fumier et lisier d'animaux, les boues de stations d'épuration, les papiers et cartons... [8]

### I-2-5-1- Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement d'une centrale à biomasse est très simple, il est même en réalité similaire à celui d'une chaudière voir à celui d'une chaudière à cogénération dans certain cas. Globalement, la chaleur produite par la combustion va chauffer un réservoir d'eau qui va alors produire de la vapeur un peu à la manière d'une cocote minute. Cette vapeur d'eau va alors être dégagée à haute pression, ce qui va permettre de faire tourner une turbine reliée à un alternateur. C'est cet alternateur l'élément clé de la centrale à biomasse, celui qui va permettre de produire l'électricité. Ce qui est intéressant dans les centrales à biomasse,

c'est surtout celles qui permettent de produire de l'électricité à partir des éléments dont nous n'avons plus besoin. [9]

### I-2-6- L'énergie solaire :



Figure 9: L'énergie solaire

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable permettant de produire de l'électricité par transformation, d'une partie du rayonnement solaire grâce à une cellule PV (photovoltaïque). L'ensemble des cellules sont reliées entre elles sur un panneau photovoltaïque.

On utilise des capteurs spécifiques afin d'absorber l'énergie des rayons solaires et de la rediffuser selon trois principaux modes de fonctionnement :

- **Solaire photovoltaïque** (panneaux solaires photovoltaïques) : l'énergie solaire est captée en vue de la production d'électricité.
- **Solaire thermique** (chauffe-eau solaire, chauffage, panneaux solaires thermiques) : la chaleur des rayons solaires est captée et rediffusée, et plus rarement sert à produire de l'électricité.
- **L'aéro-voltaïque** : est un mixte de panneaux solaires photovoltaïques qui produisent de l'électricité et de panneaux solaires thermiques pour chauffer l'habitation.

#### I-2-6-1- La cellule photovoltaïque :

La cellule PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs transformant directement l'énergie lumineuse en énergie électrique.

- ✓ Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque.



Figure 10: Structure d'un panneau PV

### I-2-6-2- Fonctionnement d'une installation solaire :

Une installation PV (PhotoVoltaïque) est composée de 4 éléments essentielles qui sont les panneaux PV, le régulateur, les batteries et l'onduleur.

- **Le panneau photovoltaïque :** transforme l'énergie solaire en énergie électrique. Il joue le rôle d'un générateur dans le système photovoltaïque car il fournit un courant continu à très basse tension.
- **Le régulateur :** régule le niveau d'énergie stockée par les batteries, éviter les surcharges ou les décharges trop profondes des batteries, Il constitue un élément essentiel pour la durée de vie de la batterie.
- **Les batteries :** sont utilisées pour stocker l'énergie électrique, Elle assure l'alimentation des récepteurs en toutes circonstances.
- **L'onduleur :** convertit le courant électrique continu en courant alternatif avec la fréquence souhaitée.

### I-3- Conclusion :

Etant donné que les ressources en énergies fossiles sont des réserves qui ne cessent de s'épuiser et financièrement ne sont plus très rentables (l'apparitions de nouvelles sources d'énergies tel que le gaz de schiste) et l'abondance de l'énergie solaire dont dispose notre pays en raison de sa position géographique, nous nous sommes particulièrement portés sur ce choix pour produire l'électricité en utilisant les panneaux photovoltaïques.



**Chapitre II :**  
L'énergie solaire photovoltaïque

## II-1- Introduction :

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré ( $\text{KWc/m}^2$ ) répartie sur tout le spectre de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année [10].

La plupart des utilisations de l'énergie solaire sont directes, comme en agriculture, à travers la photosynthèse ou dans diverses applications de séchage et chauffage. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, une quantité encore importante arrive à la surface du sol. On peut ainsi compter sur  $1000 \text{ W/m}^2$  dans les zones tempérées et jusqu'à  $1400 \text{ W/m}^2$  lorsque l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou en eau [11].

## II-2- Potentiel solaire en Algérie :

L'Algérie est l'un des pays qui dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen, où le rayonnement de la région près de la mer est influencé par les saisons. Les régions sahariennes reçoivent une quantité plus grande d'énergie mais sont caractérisées par une température de l'air plus élevée. En tenant compte de cette diversité, le total d'énergie reçue est estimé à  $169\,400 \text{ TWh/an}$ , soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays [11].

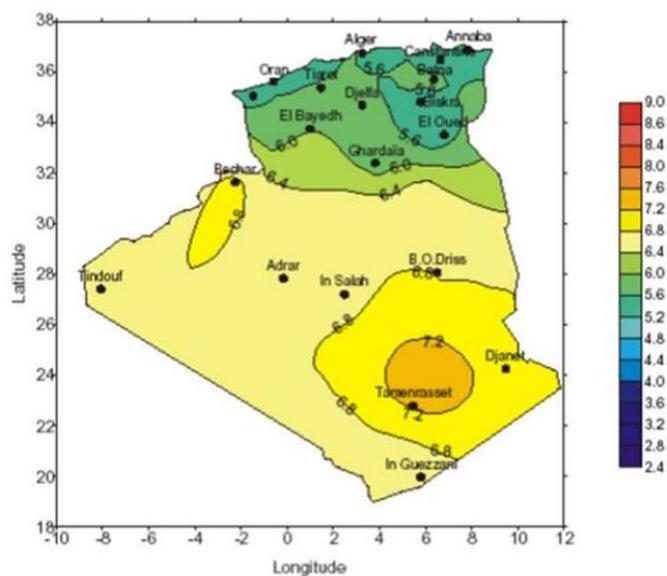


Figure 11: La carte de l'irradiation solaire en Algérie

### II-3- Les différentes technologies solaires :

Il existe trois façons d'utiliser directement l'énergie solaire : la thermodynamique, la thermique et le photovoltaïque.

#### II-3-1- Solaire à concentration thermodynamique :

Le solaire à concentration thermodynamique est une technologie qui utilise des miroirs qui concentrent l'énergie solaire vers un tube contenant un fluide caloporteur qui chauffe jusqu'à une température pouvant atteindre 500°C. La chaleur obtenue est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine couplée à un alternateur qui produit de l'électricité. L'un des grands avantages de cette technologie provient du fait que la chaleur peut être stockée, permettant ainsi aux centrales solaires de produire de l'électricité pendant la nuit.

Les miroirs qui collectent l'énergie solaire (placés à 3 ou 4 mètres du sol) forment une zone d'ombre sur le sol, cependant il arrive suffisamment de lumière pour éventuellement cultiver des fruits ou des légumes. Une partie de l'eau douce formée sur place par condensation en sortie de turbine, peut être utilisée pour l'arrosage [12].



Capteurs thermodynamique cylindro- paraboliques

Capteurs thermodynamique paraboliques

Figure 12: Deux exemples de modules à concentration thermodynamique

#### II-3-2- Solaire thermique :

Le principe de l'énergie thermique consiste à transformer le rayonnement solaire en énergie thermique grâce à un fluide qui circule dans des panneaux exposés au soleil. Cette forme de conversion d'énergie peut être directe si on veut uniquement chauffer de l'eau sanitaire.

Par contre, si on veut générer de l'électricité, il faudra utiliser des générateurs qui convertissent l'énergie thermique générée en électricité (par exemple, moteurs à air chaud).

L'énergie thermique utilise la chaleur du rayonnement solaire pour le chauffage de bâtiments ou de l'eau sanitaire. Pour cette dernière il est intéressant de savoir que dans certains pays le chauffage d'eau sanitaire représente environ 20% des dépenses énergétiques d'un foyer et que l'énergie solaire thermique peut subvenir à environ 80% de cette dépense énergétique [13].

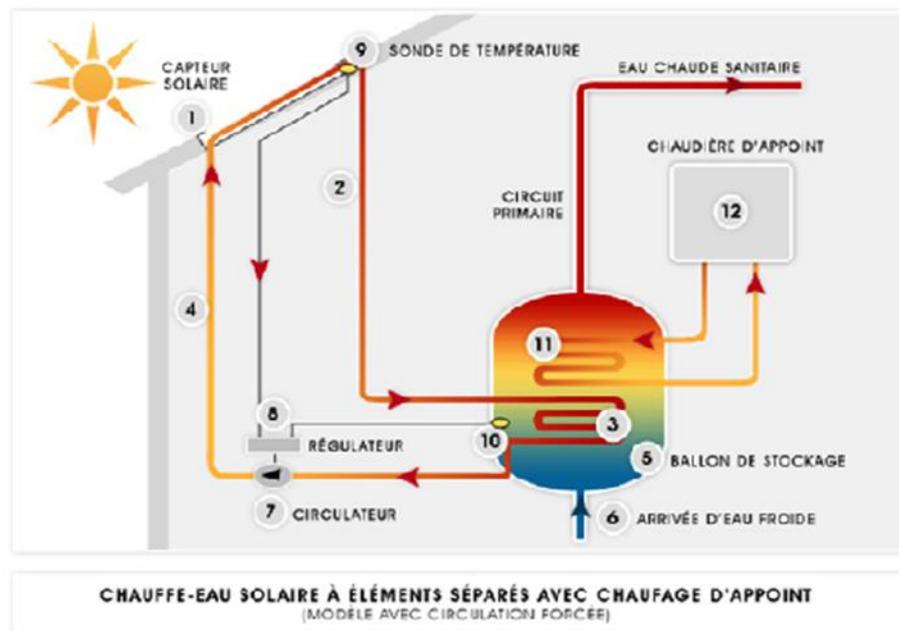


Figure 13: Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique

### II-3-3- Solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme source de lumière en transformant en électricité l'énergie des photons arrivant à la surface de la Terre. La lumière solaire (photons) transmet son énergie aux électrons contenus dans un semi-conducteur (qui constitue une cellule photovoltaïque). Cette transformation (effet photovoltaïque) est sans action mécanique, sans bruit, sans pollution et sans combustible. L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839. Le mot « photovoltaïque » vient du mot « photo » (du grec « phos » qui signifie « lumière ») et du mot « Volt » (patronyme du physicien Alessandro Volta qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité) [12,13].

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière ; sous

l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés" : Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique [14].

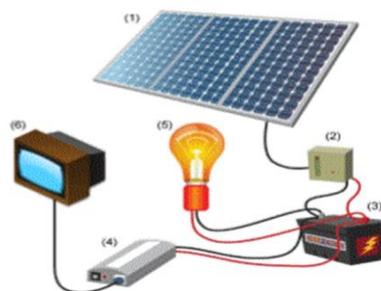
L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire [14].

## **II-4- Les différents types des systèmes photovoltaïques :**

### **II-4-1- Installations électriques photovoltaïques autonomes :**

En site isolé, le champ photovoltaïque (1) peut fournir directement l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner les récepteurs (éclairage et équipement domestique). Un système de régulation (2) et une batterie (3) d'accumulateurs permettent de stocker l'énergie électrique qui sera ensuite utilisée en l'absence du Soleil. Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous une forme chimique. Elles restituent l'énergie électrique au besoin selon ses caractéristiques.

Le régulateur de charge (2) a pour fonction principale de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. Il est un élément essentiel pour la durée de vie de la batterie. En site isolé, on peut aussi utiliser des récepteurs fonctionnant en courant alternatif (6). Dans ce cas, l'installation comprendra un onduleur (4). On peut citer quelques exemples de systèmes autonomes, comme les balises en mer, les lampadaires urbains, le pompage solaire et les maisons en sites isolés [15].



**Figure 14: Schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome**

La majorité des populations à l'écart des réseaux électriques vit dans des zones rurales, où l'implantation de tels réseaux est difficile, pour des raisons d'accès ou de moyens. Les systèmes photovoltaïques constituent alors une option intéressante, ils donnent aux populations un accès à l'électricité avec un coût, une maintenance et des difficultés de mise en œuvre réduits [10].

#### II-4-2- Installations ou centrales électriques photovoltaïques raccordées au réseau :

Un générateur photovoltaïque connecté au réseau n'a pas besoin de stockage d'énergie et élimine donc le maillon le plus problématique (et le plus cher) d'une installation autonome. C'est en fait le réseau dans son ensemble qui sert de réservoir d'énergie. Deux compteurs d'énergie sont nécessaires : un compteur comptabilise l'énergie achetée au fournisseur d'énergie et un autre compteur mesure l'énergie renvoyée sur le réseau électrique lorsque la production dépasse la consommation. Un troisième compteur est ajouté dans le cas où l'énergie produite est injectée en intégralité dans le réseau (compteur de non-consommation) [15].

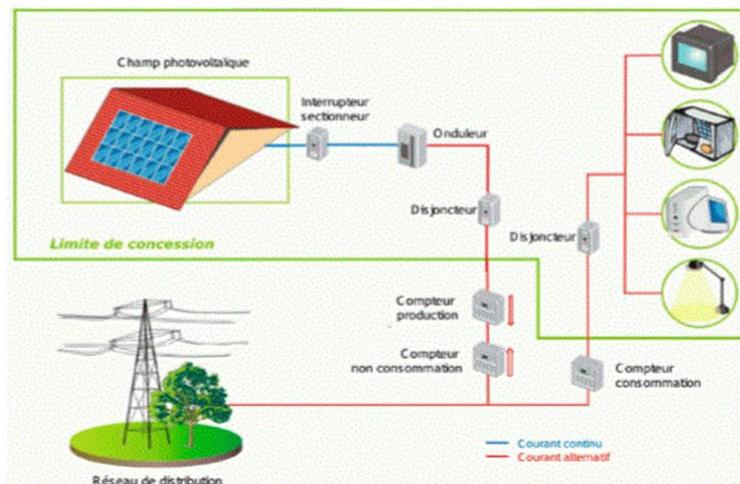


Figure 15: Installation ou centrale électrique photovoltaïque raccordée au réseau

#### II-4-3- Installations ou centrale électriques photovoltaïques hybride :

Il s'agit des systèmes qui regroupent des sources d'énergie de nature différentes, telle une installation éolienne, un générateur diesel ou une centrale de cogénération, en plus un générateur photovoltaïque. Ce type d'installation est utilisé lorsque le générateur photovoltaïque seul ne couvre pas toute l'énergie requise [15].

## II-5- Rayonnement solaire :

Contrairement à la conduction et à la convection, le mode de transfert de chaleur par rayonnement ne nécessite pas la présence d'un support matériel solide ou fluide.

On réunit sous l'appellation de rayonnement électromagnétique l'ensemble des échanges pouvant avoir lieu lorsque les corps sont séparés par le vide ou par n'importe quel milieu intermédiaire suffisamment transparent pour les ondes électromagnétiques.

Le rayonnement solaire est un rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde varie de 0,2 à 0,4  $\mu\text{m}$  c'est-à-dire de l'ultraviolet à l'infrarouge en passant par le visible, c'est la matière primaire de l'énergie solaire. Le rayonnement solaire reçu par une surface au sol dépend essentiellement de la période (condition météorologique), du lieu (altitude et latitude) et de l'environnement (condition atmosphérique). L'Algérie est située entre les latitudes 20° et 37° dans l'hémisphère Nord. Elle reçoit le maximum d'énergie lors du solstice d'été (21 ou 22 juin) et le minimum lors du solstice d'hiver (21 ou 22 décembre). L'atmosphère modifie de façon importante le rayonnement solaire par l'intermédiaire des mécanismes suivants [16] :

- L'absorption de la lumière par divers gaz.
- Diffusion par leurs molécules.
- Absorption et diffusion par les aérosols et les poussières.

Le rayonnement global est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure. Cette figure représente les composantes du rayonnement solaire [16].

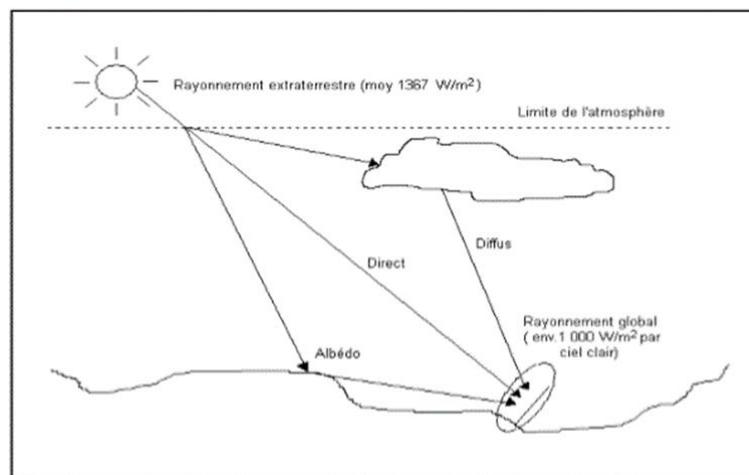


Figure 16: Composantes du rayonnement solaire au sol

Des cartes météorologiques sont établies et nous renseignent sur l'irradiation moyenne par jour ou bien sur une année comme illustré sur la figure. [16]

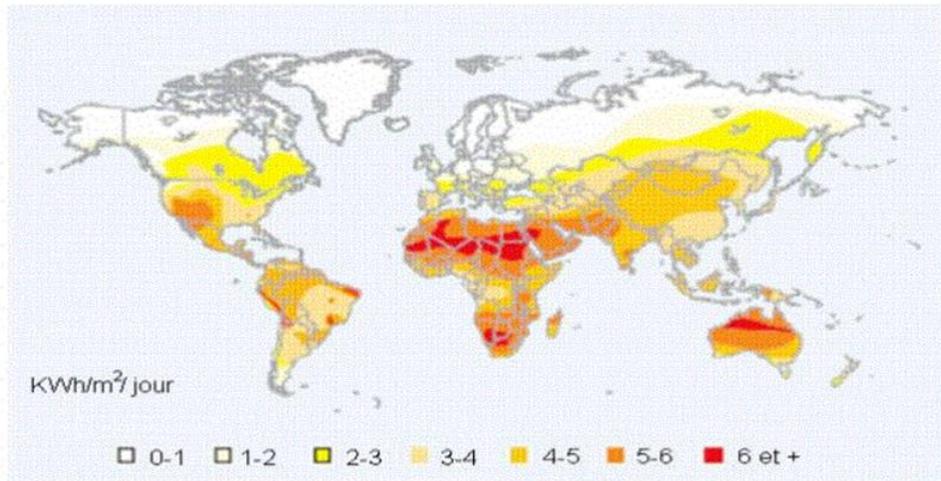


Figure 17: Carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle en kWh/m<sup>2</sup>/jour

## II-6- La cellule PV :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants : Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ; Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires électrons/trous dans le matériau semi-conducteur ; Collecte des particules générées dans le dispositif. Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trous créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N [17].

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0,3 V et 0,7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [17].

Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation

extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.

- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode, les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement [17].

La figure ci-dessous représente la structure basique d'une cellule solaire [17] :

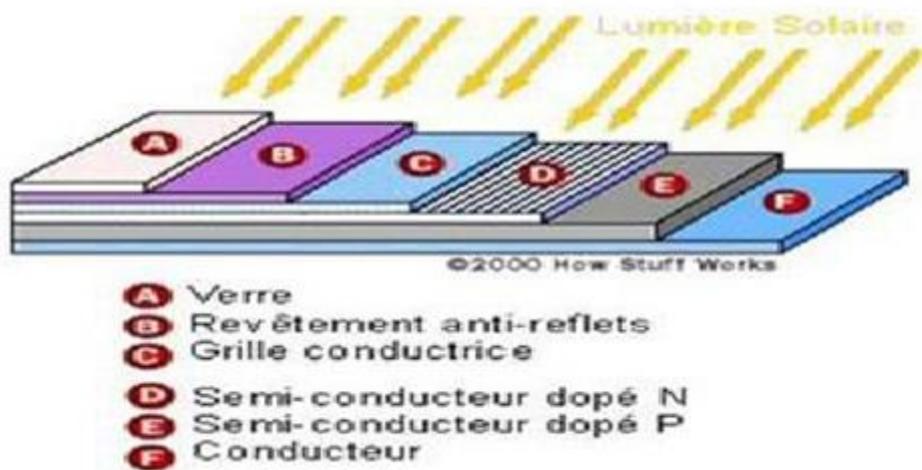


Figure 18: Structure basique d'une cellule solaire

## II-6-1- Type des cellules photovoltaïques :

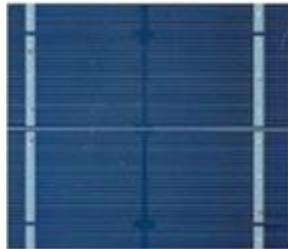
Une cellule photovoltaïque peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. En réalité, il existe aujourd'hui trois principales filières technologiques : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques :

### II-6-1-1- Le silicium :

La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïques. Il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non toxique. Cette filière est elle-même subdivisée en plusieurs technologies distinguant d'une part la nature du silicium employé et/ou sa méthode de fabrication. Le silicium a deux technologies : le silicium monocristallin et le silicium polycristallin [18,19].

### **a) Le silicium monocristallin :**

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme, intense et brillant. Elles sont utilisées, mais ne sont pas majoritaires sur le marché de l'énergie photovoltaïque. Le rendement du silicium monocristallin est le plus élevé, il est compris entre 12 et 20% pour les cellules industrielles. Son coût élevé est aujourd'hui un handicap et le silicium monocristallin perd du terrain devant le silicium polycristallin. [20]



**Figure 19: Cellule monocristalline**

#### **Avantage :**

- Très bon rendement (12 à 20%)

#### **Inconvénients :**

- Coût élevé
- Rendement faible sous un faible éclaircissement

### **b) Le silicium polycristallin :**

Le silicium polycristallin est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée. À elle seule elle représente près de 50% du marché. Ces cellules sont obtenues par coulage de cristaux de silicium, ce qui rend sa structure hétérogène.

Son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin, il est compris entre 10 et 14% selon les fabricants. En revanche sa fabrication est beaucoup plus simple, les coûts de production sont donc plus faibles. [20]



Figure 20: Cellule polycristalline

**Avantages :**

- Bon rendement (11 à 15%), mais cependant moins bon que pour le monocristallin.
- Moins cher que le monocristallin.

**Inconvénient :**

- Les mêmes que le monocristallin.

**II-6-1-2- Les couches minces :**

La technologie à couche mince dont la plus mure est le silicium amorphe ( $S_{ia}$ ) représentait en 2008 plus de 7% du marché mondial. L'avantage de cette technique est l'utilisation de substrats à bas coût.

Le silicium est déposé à basse température sur un substrat en verre. De plus, il est possible de déposer ces cellules sur des substrats souples et ainsi de fabriquer des cellules souples. Son prix est plus faible que les cellules cristallines ; en revanche, le rendement d'une cellule en  $S_{ia}$  est inférieur à celui des cellules cristallines, il est d'environ 7%. L'utilisation de ce type de cellules nécessite l'utilisation d'une isolation galvanique entre les modules et le réseau. [20]

Sans cette isolation galvanique les cellules amorphes se dégradent très rapidement. La raison physique de ce phénomène reste encore obscure. Les cellules amorphes captent très bien le rayonnement diffus et sont donc moins sensibles aux variations du rayonnement direct. Ces cellules sont donc une très bonne alternative aux cellules cristallines sur des sites soumis à des ombrages sévères.

D'autres matériaux sont également utilisés dans les filières à couches minces comme le Tellure de Cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) et de gallium (CIGS).

Ces technologies possèdent de bons rendements, pouvant aller jusqu'à 19%. Malgré les potentialités de ces trois technologies, les problèmes de toxicité sur l'environnement et d'approvisionnement en matières premières qu'elles soulèvent les cloisonneront au laboratoire ou à des applications très spécifiques [20].



Module souple Unisolar (68Wc, 1,12 m<sup>2</sup>).



Module rigide Sharp (115Wc, 1,42 m<sup>2</sup>).

Figure 21: Deux exemples de modules utilisant le Sia (silicium amorphe)

### II-6-1-3- Cellules organiques et plastiques :

Observé depuis 30 ans dans les matériaux semi-conducteurs organiques, l'effet photovoltaïque a connu cette dernière décennie un grand essor.

Initialement donnant des valeurs très faibles de rendement de conversion, conformément aux prédictions de Merritt en 1978, la cellule composée alors d'une bicouche de molécules évaporées sous vide, atteint 0,95% de rendement de conversion. Ces cellules comprennent deux voies : la voie des cellules « humides » et la voie des cellules polymères organiques dites aussi cellules « plastiques ». [18]

Les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment battus (actuellement près de 6%). Le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures [18]).

La figure ci-dessous présente une cellule solaire tout organique sur substrat souple :

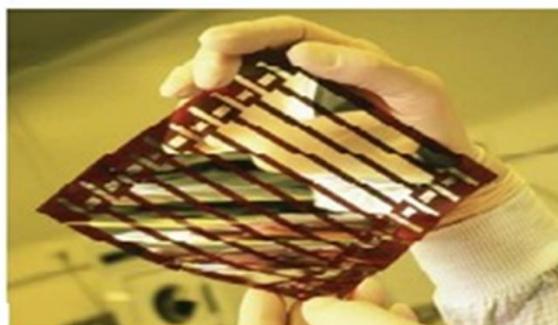


Figure 22: Cellule solaire tout organique sur substrat souple

L'intérêt de ces cellules vient aussi du fait que, contrairement aux cellules à base de matériaux inorganiques, elles offrent l'avantage de pouvoir être déposées sur de grande surface, à grande vitesse, par des techniques d'impression classiques. Elles ouvrent également la voie aux applications légères, nomades et souples. Enfin, grâce à des coûts de fabrication et de matériaux plus faibles, ces cellules devraient dans l'ensemble revenir beaucoup moins chères que leurs concurrentes. [19]

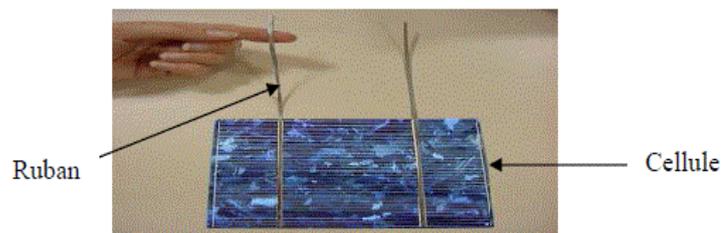
**Tableau 1: Le comparatif des rendements des différents types de cellules**

Type	cellule (labo)	Module (labo)	Module (commercial)	Niveau développement
<b>1ère génération</b>				
Silicium monocristallin	24.70%	22.70%	12-20%	Production industrielle
Silicium polycristallin	20.30%	16.20%	11-15%	Production industrielle
<b>2e génération</b>				
Silicium amorphe	13.40%	10.40%	5-9%	Production industrielle
Silicium cristallin en couche mince		9.40%	7%	Production industrielle
CIS	19.30%	13.50%	9-11 %	Production industrielle
CdTe	16.70%		6-9%	Prêt pour la production
<b>3e génération</b>				
Cellule organique	5.70%			Au stade de la recherche
Cellule de Grätzel	11%	8.40%		Au stade de la recherche
Cellules multi-jonctions	39%	25-30%		Au stade de la recherche, production exclusivement applications spatiales

## II-7- Les modules photovoltaïques :

### II-7-1- La constitution d'un module photovoltaïque :

- Les cellules sont connectées entre elles par un fin ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+).



**Figure 23: Ruban métallique d'une cellule**

- Les cellules sont encapsulées sous vide entre 2 films thermoplastiques transparents (EVA : Ethylène Acétate de Vinyle)
- Le plus souvent présence d'un cadre en aluminium avec joint périphérique pour permettre la dilatation.
- Un verre trempé en face avant protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière.
- La face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLAR.

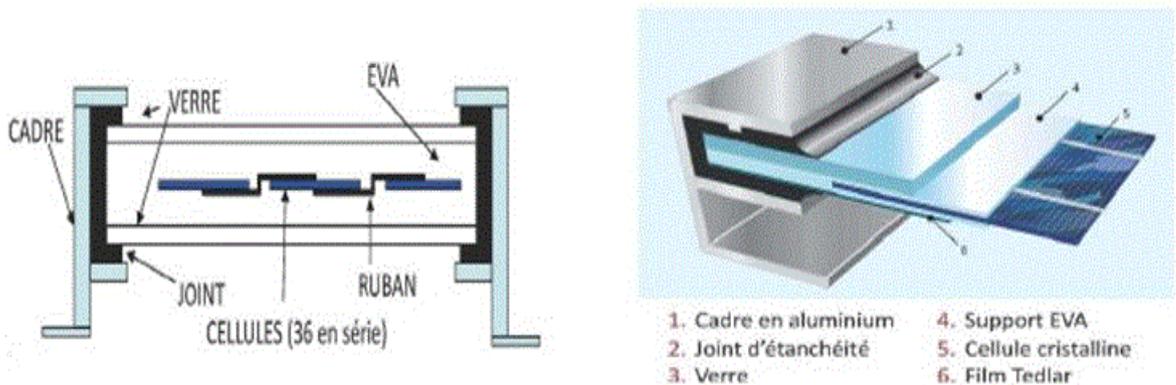


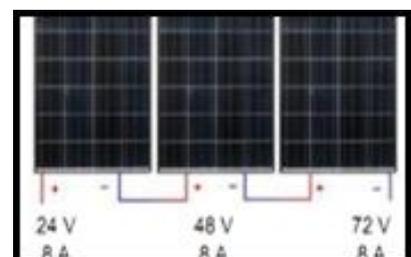
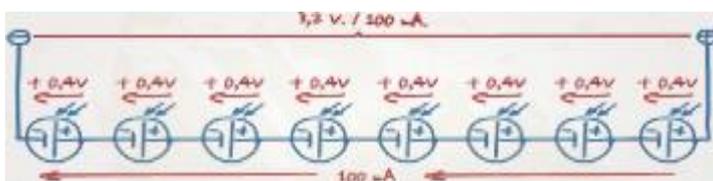
Figure 24: Encapsulation des cellules

- La boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement, les diodes by-pass.
- Les 2 câbles unipolaires sont raccordés.

## II-7-2- Branchement des modules photovoltaïques :

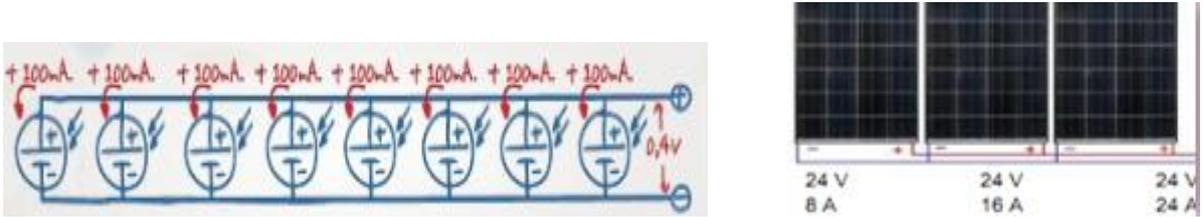
- **Série :** Pour obtenir une tension plus élevée, on connecte deux ou plusieurs modules.

$$U_t = U_1 + U_2 \quad / \quad I_t = I_1 = I_2$$



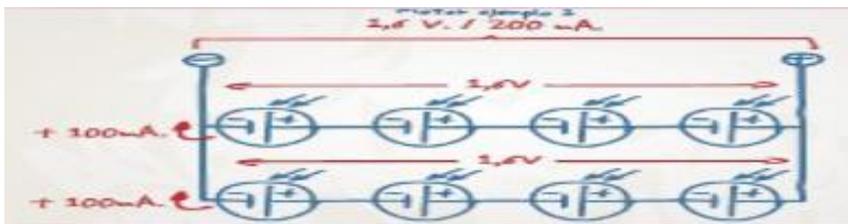
➤ **Parallèle** : Pour obtenir une puissance (un courant) plus élevée.

$$U_t = U_{m1} = U_{m2} \quad / \quad I_t = I_{m1} + I_{m2}$$



➤ **Mix** : Pour obtenir une tension et une puissance (un courant) plus élevée.

$$U_t = U_{m1} + U_{m2} = U_{m3} + U_{m4} \quad / \quad I_t = I_{m12} + I_{m34}$$



### II-7-3- Angle d'inclinaison des modules photovoltaïques :

Le rendement des centrales solaires dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquels figure l'angle d'incidence des rayons du soleil. L'idéal serait que l'angle d'incidence des rayons du soleil, c'est-à-dire l'angle formé par le plan des panneaux solaires et ces rayons, soit toujours égal à 90°, car c'est ainsi que les panneaux reçoivent le plus de photons. Tel n'est malheureusement pas le cas. D'abord, l'angle incident varie au fil de la journée : s'il augmente progressivement depuis le lever du soleil jusqu'à midi, heure du zénith, il diminue à nouveau jusqu'au couchant. Ensuite, il atteint rarement 90°. À Berne, par exemple, l'angle incident maximal oscille entre 15° en hiver et 60° en été comme le montre la figure ci-dessous. [16]

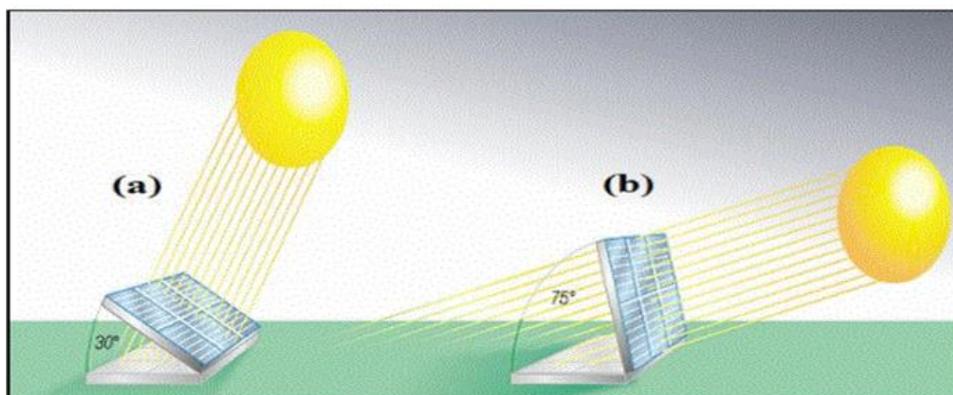


Figure 25: L'angle d'incidence maximal (a) en été ; (b) en hiver

## **II-8- Le régulateur :**

- Régule le niveau d'énergie stockée par les batteries.
- Éviter les surcharges ou les décharges trop profondes des batteries.
- Il constitue un élément essentiel pour la durée de vie de la batterie.

### **II-8-1- Les critères pour choisir son régulateur solaire :**

- La tension entre les panneaux et les batteries est en générale 12V, 24V ou 48V.
- L'intensité maximale du régulateur doit être supérieure à l'intensité de court-circuit.

### **II-8-2- Type de régulateur :**

Il existe deux types de régulateurs :

- ❖ **PWM** : Pulse Width Modilisation.
- ❖ **MPPT**: Max Power Point Tracking.

#### **II-8-2-1- Le régulateur PWM :**

Le régulateur est inséré entre le champ photovoltaïque et la batterie. Il est composé d'un interrupteur électronique fonctionnant en MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) et d'un dispositif anti-retour (Diode).

L'ouverture et la fermeture de l'interrupteur électronique s'effectuent à une certaine fréquence, ce qui permet de réguler le courant de charge en fonction de l'état de charge avec précision.

- Lorsque la tension batterie est inférieure à la tension de limitation du régulateur, l'interrupteur est fermé. La batterie se charge alors avec le courant correspondant à l'ensoleillement. On est en phase "Bulk".
- Lorsque la tension batterie atteint un seuil de régulation prédéterminé, l'interrupteur s'ouvre et se ferme à une fréquence fixe pour maintenir un courant moyen injecté dans la batterie. La batterie est chargée, on est en phase "Floating".

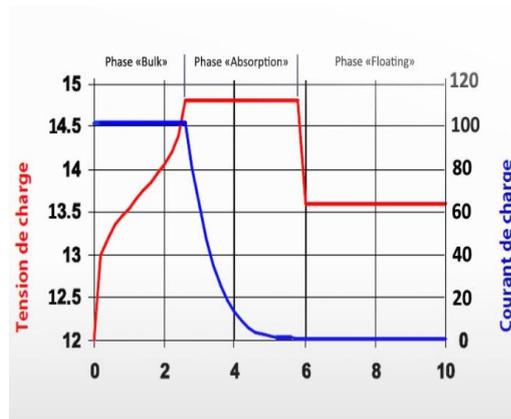


Figure 26: Courbe de charge



Figure 27: Les composants interne du PWM

## II-8-2-2- Le régulateur MPPT :

Le régulateur solaire MPPT grâce à son microprocesseur et sa technologie avancée permet d'augmenter de 10% à 30% l'efficacité d'un panneau solaire par rapport à un régulateur standard.

Ce régulateur a de multiples fonctions :

- Protection contre les surcharges.
- Inversion de la polarité de la batterie.
- Protection contre les court-circuit.
- Inversion de la polarité au niveau des connexions.

➤ **Fonctionnement :**

**Voyant CHARGE :**

ROUGE : le panneau travaille et recharge la batterie.

ROUGE CLIGNOTANT : la batterie est en floating.

ROUGE ETEINT : la batterie est chargée, le panneau n'alimente plus la batterie.

### Voyant BATTERY LOW :

**ROUGE** : la batterie est trop faible, la sortie « LOAD » n'est pas autorisée.

**ROUGE ETEINT** : la batterie à une charge supérieure à 12.6V ou 25.2V pour un système 24V, la sortie « LOAD » est autorisée.

### Voyant LOAD :

**VERT** : la sortie est autorisée.

**VERT ETEINT** : la sortie 12V (ou 24V), n'est pas autorisée.

**Bouton RESET** : Lorsqu'il y a une surcharge ou une inversion de polarité les voyants « BATTERY LOW » et « LOAD » s'éteignent. Une fois le problème trouvé, vous pouvez appuyer sur reset afin de réinitialiser le régulateur.

#### ➤ Branchement :

1. Connectez le "+", "-" de la batterie au régulateur de charge MPPT (repère 3 et 4).
2. A cette étape le voyant LOAD doit être VERT. Si le voyant LOAD n'est pas vert, cela indique qu'il y a une inversion de polarité au niveau de la batterie, ou bien que votre batterie soit complètement vide ou hors service. Vous pouvez continuer le branchement seulement si le voyant LOAD est vert.
3. Connectez le "+", "-" du panneau solaire au régulateur MPPT (repère 1 et 2).
4. Connectez le "+", "-" de l'appareil en 12V OU 24V à la sortie du régulateur MPPT (repère 5 et 6).

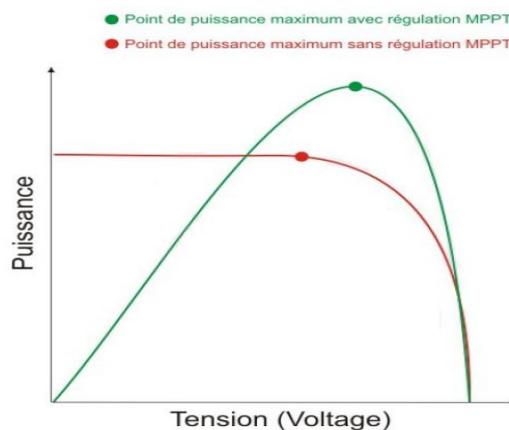


Figure 28: Rendement puissance MPPT

## **II-9- Stockage de l'énergie électrique photovoltaïque :**

L'un des principaux inconvénients de l'énergie solaire est sa nature intermittente. Pour une utilisation permanente, il est nécessaire de stocker l'énergie produite. Pour ce faire, il existe de nombreuses méthodes de stockage : sous forme d'eau, d'hydrogène, dans le volant d'inertie, dans la batterie électrochimique (plomb, lithium) ou dans le super-condensateur [21].

Ces unités de stockage sont des éléments indispensables dans les systèmes en site isolé. Correctement dimensionnées, elles participent en effet à garantir l'autonomie du site en constituant une réserve d'énergie lorsque les sources produisent un excédent, et en la restituant lorsqu'elles ne produisent momentanément plus assez [22].

Le stockage contribue à stabiliser l'offre et la demande, à améliorer les conditions d'utilisation des réseaux de transport et de distribution, ainsi qu'à accroître le rendement de certaines unités de production à puissance nominale, tout en réduisant les émissions polluantes [10].

### **II-9-1- Les batteries :**

Les batteries sont la solution la plus utilisée pour le stockage électrochimique de petites dimensions. Offrant des technologies matures et abordables, elles effectuent des réactions d'oxydation selon le principe de la pile pour stocker de l'énergie électrique à la charge, qui peut être renvoyée à décharger avec un bon rendement, environ 85% selon les types d'accumulateurs [10].

Elles consistent en deux électrodes, l'anode et la cathode, plongées chacune dans une solution ionique. Sous l'effet d'un courant de charge, une oxydation se produit au niveau des molécules de la cathode, qui perdent alors des électrons. Ceux-ci sont envoyés dans le circuit électrique, créant ainsi le courant en question. À l'anode, les électrons arrivent ensuite pour générer une réduction sur les molécules qui la composent. Les ions qui résultent de ces deux demi-équations se retrouvent ainsi dans les solutions ioniques respectives des électrodes. Celles-ci sont séparées par un électrolyte, une solution ionique non réactive. Selon les besoins, ces ions positifs et négatifs migrent respectivement vers la solution de l'anode et de la cathode, permettant de rendre les deux solutions électriquement neutres. À la décharge, les réactions d'oxydation et de réduction inverses se produisent sous l'effet du courant inverse qui fait cette fois migrer les électrons de l'anode à la cathode. Les concentrations d'ions diminuent dans les solutions au fur et à mesure que les électrodes se reconstruisent, et

l'électrolyte se reconstitue en conséquence. Plusieurs technologies ont au cours du dernier siècle été développées selon ce principe : accumulateurs au plomb, nickel-cadmium, nickel-hydrure métallique et au lithium [22].

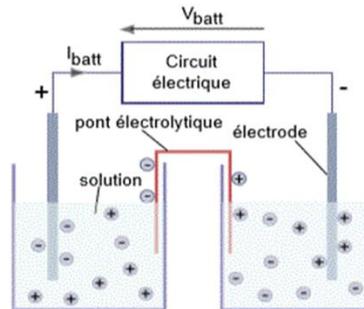


Figure 29: Schéma de principe de la batterie

### II-9-2- Les super-condensateurs :

Ils représentent des solutions alternatives ou complémentaires pour batteries depuis 20 ans. Les super conducteurs sont des condensateurs de très grande capacité. Selon le même principe que les batteries, le super condensateur consiste en un électrolyte qui sépare deux électrodes conçues dans un matériau poreux, tel que du charbon actif, pour doubler la surface spécifiée. Chacun est connecté à un collecteur électronique chargé de le faire passer de l'un à l'autre dans le circuit, en fonction du courant de charge ou de décharge. Face au déficit d'électrons dans une des électrodes et de l'excédent dans l'autre, les ions respectivement négatifs et positifs de l'électrolyte viennent s'agglomérer contre l'électrode de charge complémentaire, formant ainsi une double couche en équilibre statique à chaque électrode, mais avec une différence de potentiel au sein de l'électrolyte. La charge est complète quand l'électrolyte a atteint son potentiel de dissociation ; la surface des électrodes doit donc être suffisamment vaste pour accueillir suffisamment d'ions pour atteindre cet état, et ainsi maximiser la capacité du composant. Ce principe est récapitulé dans la figure ci-dessous. [16]

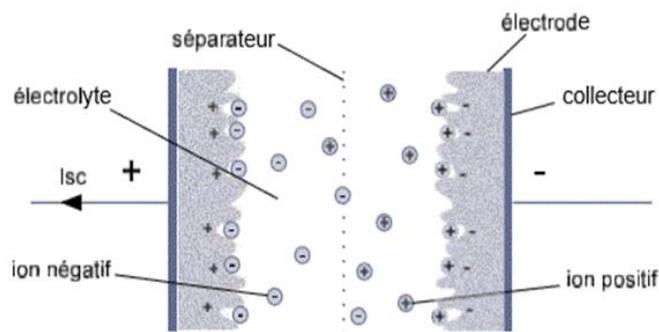


Figure 30: Schéma de principe des super condensateurs

### II-9-3- Les piles à combustible :

La pile à combustible est annoncée comme étant une solution de stockage pour le futur. Elle permet de stocker un combustible, et de le faire réagir comme réducteur avec du dihydrogène dans une oxydoréduction, suivant le même mécanisme que la batterie. Notamment, le dihydrogène peut être utilisé comme réducteur, produisant en réaction avec le dioxygène de l'eau. Il peut être produit à partir du méthane, ou par électrolyse de l'eau en rejetant du dioxygène, ce qui en fait dans ce cas une source d'énergie parfaitement propre. Une pile à combustible utilisant du dihydrogène contient des cathodes poreuses, souvent en graphite, imprégnés de platine, catalyseur nécessaire à l'oxydation de celui-ci. Utilisables dans des systèmes de petite et moyenne puissance, allant des alimentations en site isolé aux véhicules électriques, les piles à combustibles ont selon la technologie utilisée un rendement allant de 30 à 60%, et une énergie spécifique autour de 30 kWh/kg. [16]

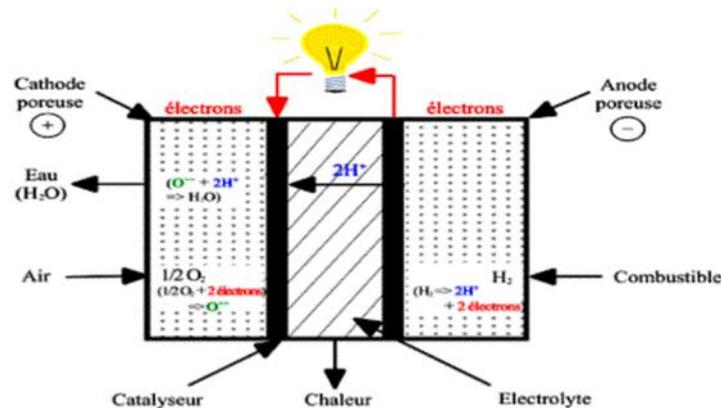


Figure 31: Schéma de principe de la pile à combustible

### II-9-4- Les volants d'inertie :

Le dernier type de stockage considéré est le volant d'inertie, dont le principe existe depuis plusieurs milliers d'années. Un volant d'inertie est un cylindre massif monté à l'extrémité d'une machine tournante. Lorsque de l'énergie provenant du circuit électrique doit être stockée, la machine en mode moteur fait tourner le volant, l'emmagasinant ainsi sous forme d'énergie cinétique. Si de l'énergie doit être restituée, la machine se met en mode génératrice pour produire un courant générateur en freinant le volant. Ce dernier peut être de différents rayons et épaisseurs, selon l'inertie  $J_{vi}$ , et donc l'énergie et la puissance maximales souhaitées.

Propre, d'une bonne puissance spécifique et d'un rendement de l'ordre de 80%, cette solution possède une énergie spécifique de seulement quelques dizaines de Wh/kg pour une

puissance spécifique de plusieurs kW/kg, ce qui la rend adaptée aux mêmes usages que les super condensateurs. L'inconvénient de cette technologie réside dans la dangerosité d'un volant tournant à pleine vitesse. Bien que réclamant peu d'entretien, il nécessite une conception adaptée à la protection des personnes et est encombrant, ce qui n'est pas forcément viable dans le cas un système de puissance destiné à un particulier [22,23].

### II-9-5- Stockage hybride :

L'hybridation implique la connexion de nombreuses sources d'énergie et unités de stockage au sein du même système pour améliorer la production et la gestion de l'énergie.

La notion de stockage hybride a pris de l'ampleur avec l'arrivée des voitures électriques dans le secteur de l'automobile. En effet, les variations brutales d'énergie (puissances crêtes importantes par rapport à la puissance moyenne) conduisent à des pertes accrues et à des surdimensionnements coûteux des systèmes de conversion et au final à un mauvais bilan énergétique. Un dispositif de stockage intermédiaire permet de mieux gérer l'énergie et de réduire les effets néfastes des pics de consommation ou de production. [10]

### II-10- L'onduleur :

L'onduleur est un dispositif électronique et statique qui convertit le courant électrique continu en courant alternatif avec la fréquence souhaitée.

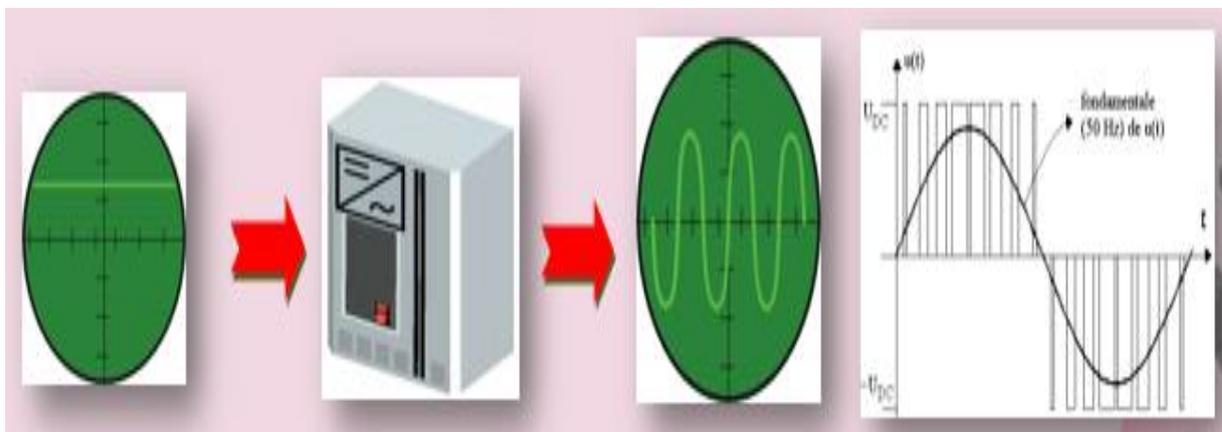


Figure 32: Principe de fonctionnement d'onduleur

## **II-11- Consignes d'utilisation :**

- Couvrez le panneau solaire à l'aide d'une couverture lors de l'installation tant que les raccordements électriques ne sont pas réalisés.
- L'énergie disponible dépend de la puissance du panneau photovoltaïque et non de la batterie.
- Pensez à éteindre les appareils quand vous ne les utilisez pas.
- Assurez-vous que le panneau photovoltaïque soit propre, si besoin lavez le à l'eau claire.
- Assurez-vous que les câbles restent bien fixés, protégez-les ou attachez-les si vous voyez qu'ils risquent de s'endommager. Un court-circuit est dangereux et peut provoquer une panne générale du système.
- N'utilisez pas la batterie de votre installation solaire pour démarrer un véhicule.
- Laissez la batterie se charger complètement avant la première utilisation.
- Ne pas ajouter de batteries différentes au kit solaire.
- Afin d'obtenir une production maximale du module, assurez-vous que celui-ci ne soit jamais à l'ombre (arbres, murs...). Installez-le(s) si possible plein sud avec une inclinaison de 45° par rapport à l'horizontal.

## **II-12- Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :**

### **II-12-1- Les avantages de l'énergie photovoltaïque :**

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages [24] :

- La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur petite taille, et leur opération silencieuse.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.

- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques notamment à la grêle).
- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans.

### **II-12-2- Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :**

- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Le coût très élevé.
- Faible rendement de conversion.
- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- Pollution à la fabrication.

Malgré ces inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse pas de trouver des applications et de s'agrandir. En plus, la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans laquelle les inconvénients pourraient s'atténuer, surtout en ce qui concerne les coûts de fabrication [24].

### **II-13- Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension de l'énergie solaire. On a rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, les différentes technologies solaires et les différents types des systèmes photovoltaïques. Ensuite, nous avons présenté la cellule photovoltaïque et ces différents types, les modules photovoltaïques, le régulateur, l'onduleur et les types de stockage utilisés dans ce domaine. Enfin, on a cité quelques consignes d'utilisation, les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

**Chapitre III :**  
Étude d'une installation photovoltaïque  
avec le logiciel PVsyst

### **III-1- Introduction :**

La conception et le dimensionnement d'un champ photovoltaïque précis est en réalité un processus relativement complexe car il y a de nombreux paramètres à prendre en considération, une certaine dose d'impondérable (la météorologie), et surtout de multiples interactions entre les choix. Par exemple, la consommation du régulateur de charge, de l'onduleur, de la batterie, doivent être ajoutés à celle des récepteurs pour définir la consommation totale du système. Or, le choix de ces paramètres dépend de la taille du champ photovoltaïque, lui-même déterminé par la consommation... Donc la conception d'un système photovoltaïque est le résultat d'une optimisation réalisée par itérations. [25]

Dans ce chapitre on va présenter les étapes à suivre pour concevoir un système photovoltaïque autonome. Ensuite, on va faire une simulation par PVsyst d'une installation photovoltaïque autonome.

### **III-2- Les étapes de conception d'une installation photovoltaïque :**

#### **III-2-1- Etape 1 : L'estimation des besoins journaliers de l'utilisateur en électricité :**

Il s'agit d'estimer la consommation d'équipements supposés connus. L'objectif est d'obtenir la consommation totale moyenne par jour et par période (été, hivers, vacances...) L'énergie totale moyenne nécessaire chaque jour  $E$  (Wh/j) est la somme des consommations énergétiques des divers équipements constituant le système à étudier, à savoir la télévision, les lampes d'éclairage, les appareils électroniques, etc... ; [26]

#### **III-2-2- Etape 2 : Estimation de l'ensoleillement sur le site de l'installation du générateur PV :**

Les données de l'ensoleillement (exprimé en  $\text{KWh}/\text{m}^2/\text{j}$ ) peuvent être relevées sur le site ou enregistrées sur la carte de l'ensoleillement de la région ou encore obtenues au niveau de la station météo la plus proche de la zone. Pour avoir une autonomie complète et éviter une variation saisonnière de la consommation, il faut prendre comme référence l'ensoleillement du mois ensoleillé [27].

#### **III-2-3- Etape 3 : Estimation du champ photovoltaïque (tension et puissance crête installée) :**

C'est très important de choisir la tension de travail du système en courant continu, car cette tension en fonction de la charge influe directement sur le choix des systèmes de conversion et de régulation, ainsi que sur le câblage et aussi sur les appareils à usage

domestique. On peut citer un exemple de choix de la tension suivant la puissance de la charge [28] :

Puissance crête ( $W_C$ )	$< 500 W_C$	$500W_C - 2KW_C$	$>2KW_C$
Tension du système (V)	12 VDC	24 VDC	48 VDC

### **III-2-4- Etape 4 : Estimation de la capacité de stockage de la batterie et choix de la Technologie :**

Pour déterminer la capacité de stockage on doit trouver les paramètres suivant :

- La profondeur maximale de décharge : le niveau de décharge à atteindre avant la déconnexion de l'utilisation par le régulateur pour protéger la batterie (limitée entre 50 % et 75 % selon le constructeur).
- Les jours d'autonomies.
- Rendement énergétique de la batterie (~ 80 %).

### **III-2-5- Etape 5 : Dimensionnement des câbles et plan de câblage :**

La condition primordiale est que la chute de tension dans les câbles ne doit pas dépasser 3%. On obtient la chute de tension en pourcentage de la manière suivante :

- Le réseau ici est considéré comme bifilaire (02 fils).
- Courant d'emploi du circuit.
- Longueur du câble (m).
- Résistance linéique du conducteur.
- Tension nominale (V).

### **III-2-6- Etape 6 : Choix de régulateur et de l'onduleur :**

#### **III-2-6-1- Choix du régulateur :**

Le régulateur photovoltaïque, pièce centrale de l'installation, doit être compatible avec les autres éléments (champ photovoltaïque et parc de batteries), que contrôle la charge et décharge pour protégé les batteries.

**Charge :** Groupe Photovoltaïque → Batteries

**Décharge :** Batteries → L'utilisation

### III-2-6-2- Choix de l'onduleur :

Le choix de l'onduleur pour l'alimentation des équipements fonctionnant en courant alternatif on doit se référés aux paramètres suivants :

- **La puissance nominal (W) :** Elle est largement supérieure à ( $P_{AC}$ ), (il est conseillé de surdimensionné d'onduleur pour s'assurer qu'il fonctionne as ses rendement élevées).
- **Tension nominal d'entrée ( $V_{DC}$ ) :** C'est la tension de la batterie plus une certaine marge (en recevoir de la variante de la tension de batterie).
- **Tension nominal de sorties ( $V_{AC}$ ) :** c'est la tension efficace.
- **Fréquence de fonctionnement (HTZ) =50HTZ.**
- **Rendement :** c'est la courbe donnant le rendement en fonction de taux de charge [29].

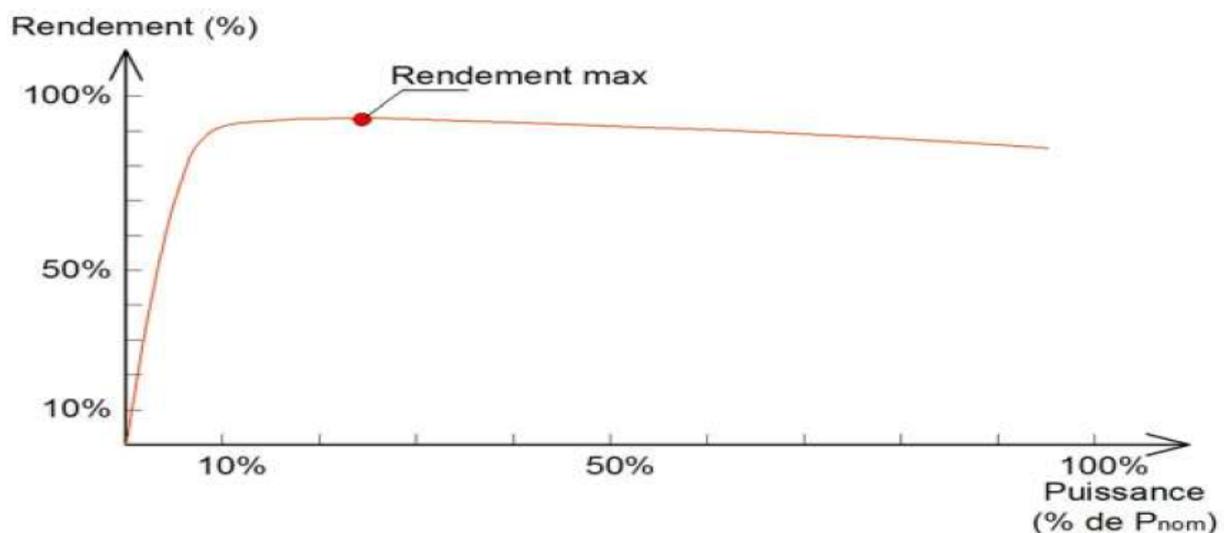


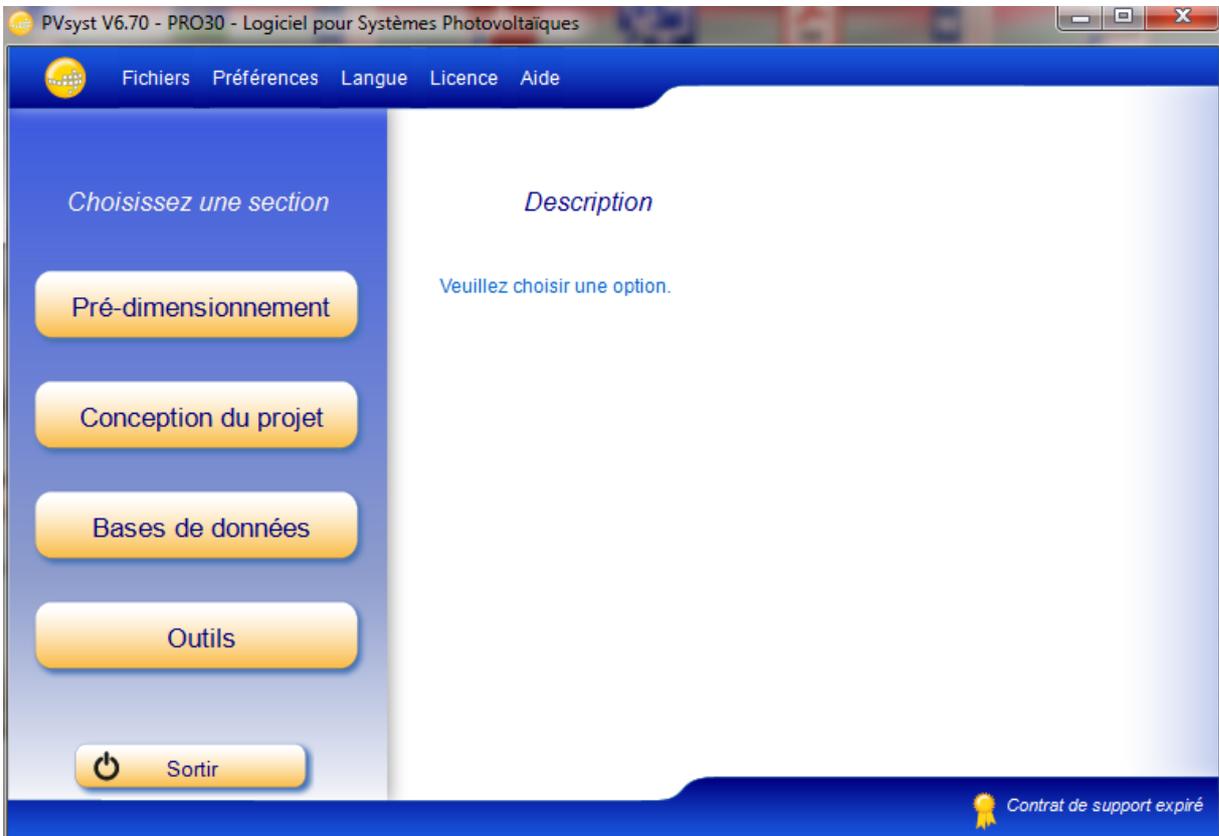
Figure 33: Rendement d'onduleur photovoltaïque en fonction de taux de charge

### III-3- Présentation de PVsyst :

PVsyst est un logiciel conçu pour être utilisé par les architectes, les ingénieurs et les chercheurs, mais aussi un outil pédagogique très utile. Il inclut une aide contextuelle approfondie, qui explique en détail la procédure et les modèles utilisés et offre une approche économique avec guide dans le développement d'un projet. PVsyst permet d'importer des données météo d'une dizaine de sources différentes ainsi que des données personnelles [30].

Le logiciel comprend principalement deux modes de fonctionnement. Le premier est une application de pré dimensionnement assez simple à prendre en main et accessible au néophyte. Le deuxième permet une étude beaucoup plus approfondie et prend en compte beaucoup plus de paramètres. De plus il se base sur du matériel concret pour ses calculs, contrairement au premier mode qui effectue ses calculs pour un cas très général.

Pour chacun des deux modes, le principe est le même : on donne la localisation géographique de l'installation, puis on entre les données concernant l'installation. Vient ensuite une partie résultats où l'on choisit les données qui nous intéressent. [31]



La fenêtre de démarrage du logiciel PVsyst affiche quatre options principales :

- **Pr-dimensionnement** : Pour une étude rapide et simple : on donne une location et un système puis le logiciel calcule quelques paramètres de pré dimensionnement ainsi qu'un graphe de production énergétique annuelle, un graphe d'irradiation par mois, un tableau récapitulatif et une étude de coût. [31]
- **Conception du projet** : Pour une étude plus approfondie avec de nombreux paramètres à prendre en compte notamment les ombres proches et lointaines. On dispose aussi de plus de choix au niveau de l'orientation des panneaux avec le choix par exemple de panneaux "tracking" qui suivent la course du soleil. Les calculs sont basés sur des systèmes réels commercialisés que l'on choisira parmi une vaste liste. On génère ensuite une simulation qui nous fournit un large choix de résultats et de graphes personnalisables. [31]

- **Base de données :** permet la gestion des bases de données (fichiers mensuels et journaliers, génération horaire synthétique ...) et composants (modules photovoltaïques, onduleurs, batteries, pompes, régulateurs ...)
- **Outils :** Permet de modifier et d'utiliser des outils du programme sans pour autant créer un projet complet.

### **III-4- Présentation de projet :**

Dans ce projet, nous avons présenté une installation autonome pour alimenter une maison composée de 3 chambres, une cuisine, un couloir et une salle de bain. Le site étudié est situé au niveau de la wilaya d'Annaba.

### **III-5- Conception du projet :**

#### **III-5-1- Le calcul manuel :**

1/ Puissance mise en jeu par les équipements pour une consommation d'une journée :

**Tableau 2: Puissance mise en jeu par les équipements pour une consommation d'une journée**

<b>Equipements</b>	<b>Nombre</b>	<b>Puissance (W)</b>	<b>Durée d'utilisation (h/jour)</b>	<b>Puissance journalier (Wh/jour)</b>
<b>Lampe (LED)</b>	8	12	5	480
<b>TV</b>	2	60	8	960
<b>Séchoir</b>	1	2000	1	2000
<b>Microonde</b>	1	900	1	900
<b>Mixeur</b>	1	1000	1	1000
<b>Pétrin</b>	1	1000	1	1000
<b>Frigo</b>	1	350	3	1050
<b>Machine à laver</b>	1	350	2	700
<b>PC</b>	1	80	6	480
<b>pompe</b>	1	370	1	370
<b>Puissance totale par jour</b>				<b>8940</b>

2/ La puissance nécessaire à produire par tous les panneaux :

$$P_p = P_t / (\eta_{\text{ond}} * \eta_{\text{reg}} * \eta_b)$$

$$P_p = 8940 / (0.85 * 0.88 * 0.7) = 17.07 \text{ KWh}$$

**P<sub>p</sub>** : Puissance produite par tous les panneaux

**P<sub>t</sub>** : Puissance totale consommée par jour

**η<sub>ond</sub>** : Rendement d'onduleur

**η<sub>reg</sub>** : Rendement de régulateur

**η<sub>b</sub>** : rendement de batteries

3/ La puissance maximale des panneaux :

$$P_m = (P_p * P_e) / G$$

$$P_m = (17.07 * 1) / 5 = 3.414 \text{ KW}$$

**P<sub>m</sub>** : Puissance maximale des panneaux

**P<sub>p</sub>** : Puissance produite par tous les panneaux

**P<sub>e</sub>** : Puissance d'éclairage dans des conditions normales (1 KW/m<sup>2</sup>)

**G** : Intensité moyenne de rayonnement (KWh/m<sup>2</sup>. j)

4/ Nombre de panneaux :

$$N_p = P_m / P$$

$$N_p = (3.414 * 10^3) / 275 = 12.414 \approx 12 \text{ panneaux}$$

**N<sub>p</sub>** : Nombre de panneaux

**P<sub>m</sub>** : Puissance maximale des panneaux

**P** : puissance d'un panneau (dans notre étude = 275)

5/ Capacité des batteries :

$$C_b = (P_t * J) / (V_b * \eta_b)$$

$$C_b = (8940 * 2) / (12 * 0.7) = 2128.57 \text{ Ah}$$

**C<sub>b</sub>** : Capacité des batteries

**P<sub>t</sub>** : Puissance totale consommée par jour

**J** : Nombre de jours nuageux

**V<sub>b</sub>** : Voltage de batterie

**η<sub>b</sub>** : rendement de batteries

6/ Nombre de batteries :

$$N_b = C_b / C$$

$$N_b = 2128.57 / 160 = 13.30 \approx 13 \text{ batteries}$$

$N_b$  : Nombre de batteries

$C_b$  : Capacité des batteries

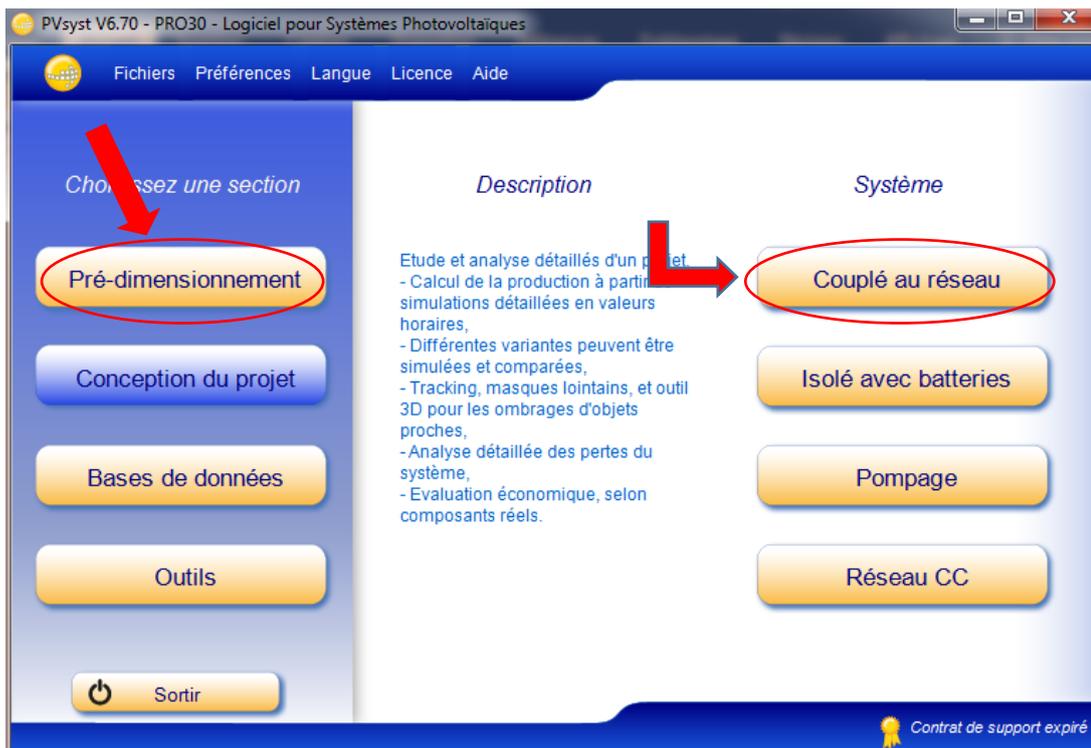
$C$  : Capacité d'une batteries (dans notre étude = 160 Ah)

**Résultats :** Donc, d'après le calcul manuel, la puissance mise en jeu par les équipements pour une consommation d'une journée égale 8940 Wh ; on a besoin de 12 panneaux et 13 batteries.

### III-5-2- Etude par PVsyst :

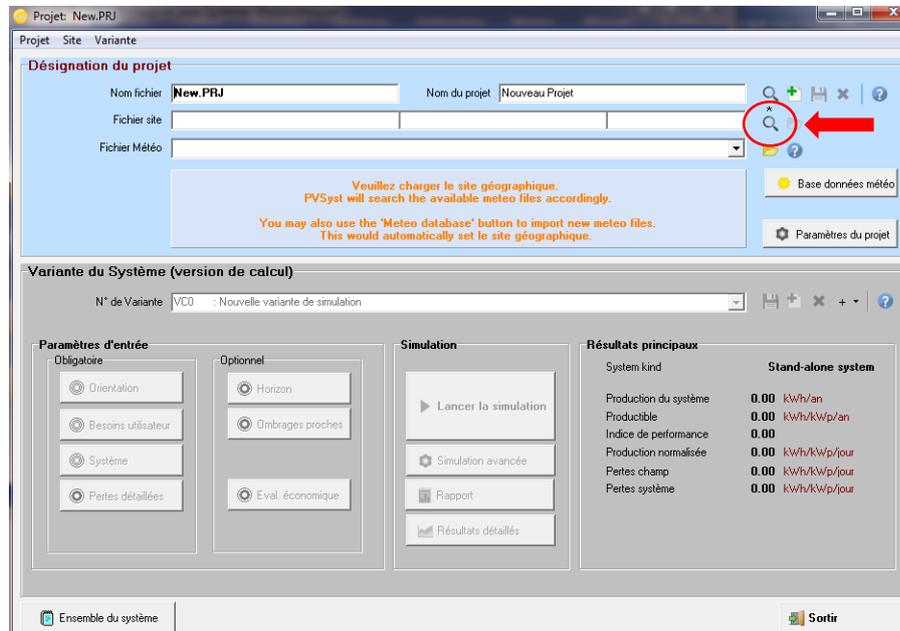
1/ Au début, on ouvre le logiciel « PVsyst » situé sur le bureau.

2/ On clique sur « conception du projet » et on choisit le system « isolé avec batteries »

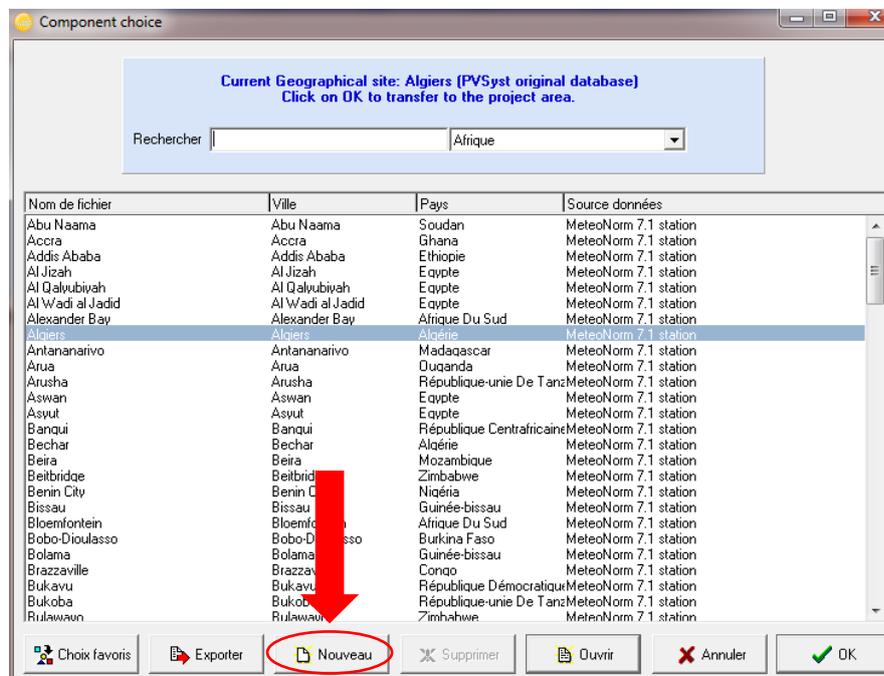


3/ On va déterminer la localisation géographique du projet en suivant les étapes suivantes :

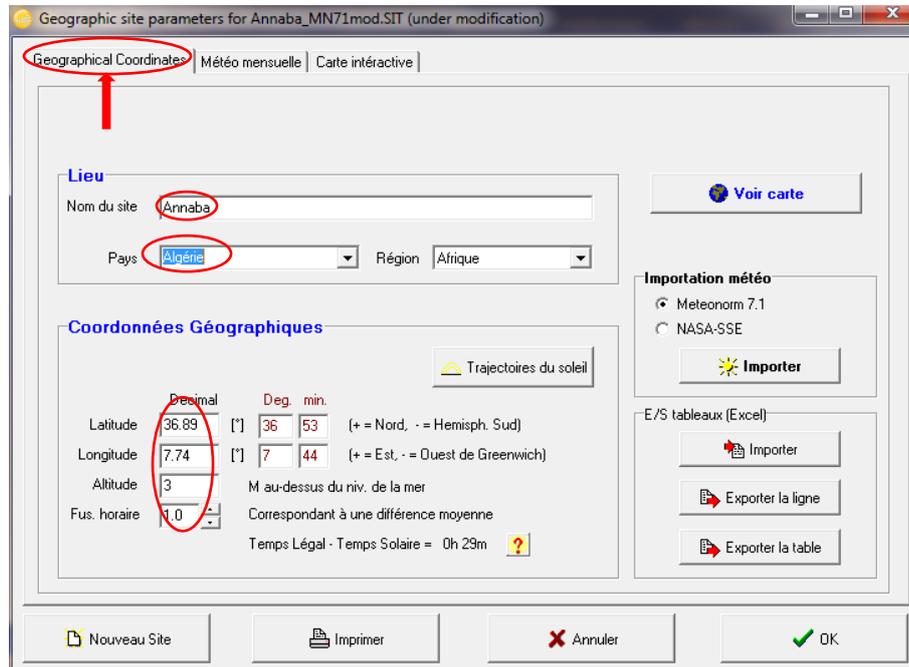
- La première étape consiste à cliquer sur l'indicateur de recherche pour ajouter un nouveau site, comme indiqué ci-dessous



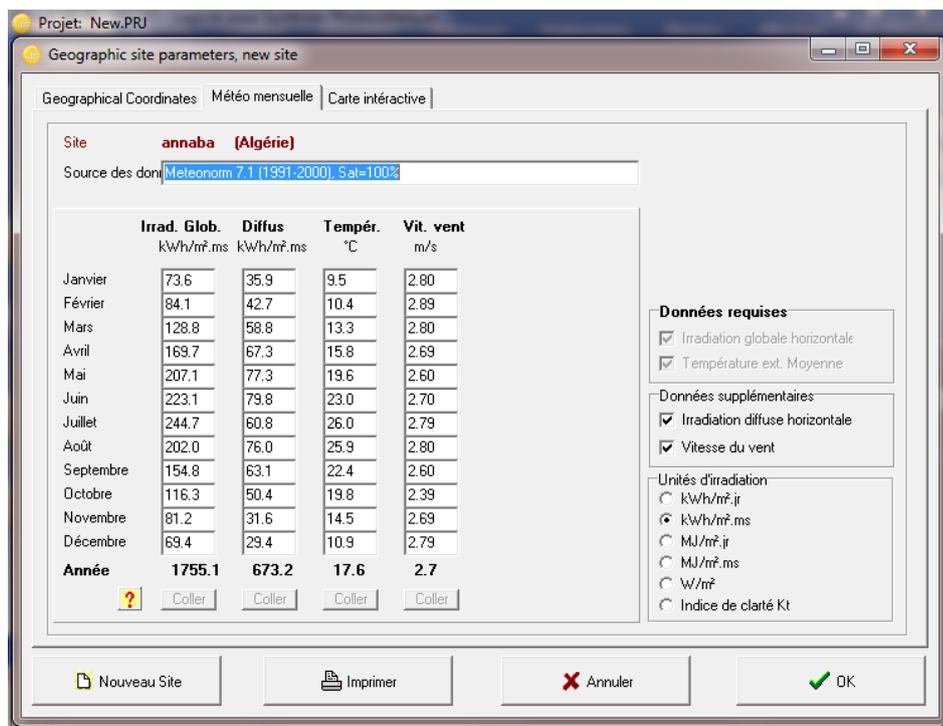
- La deuxième étape, et après l'apparition de cette fenêtre, on clique sur « nouveau »



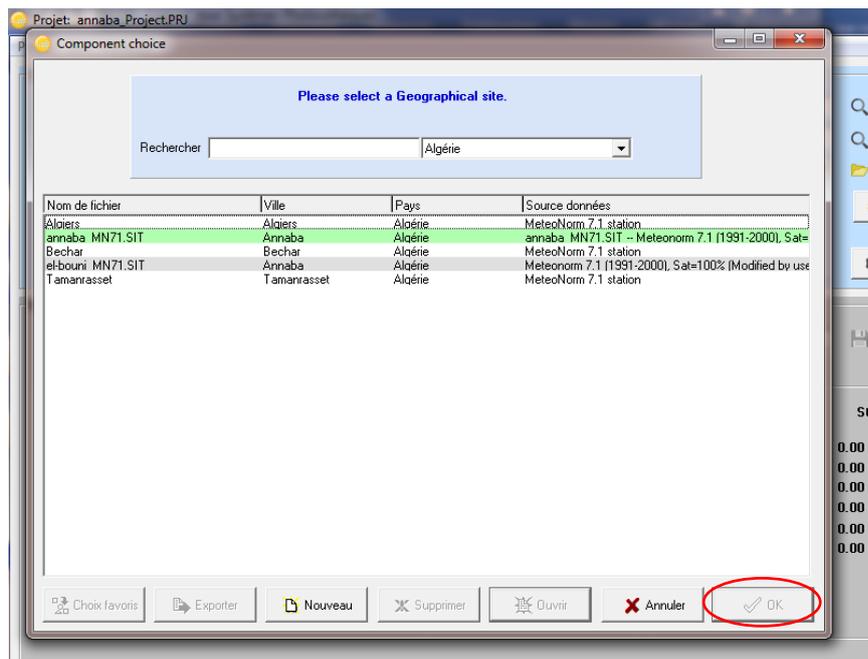
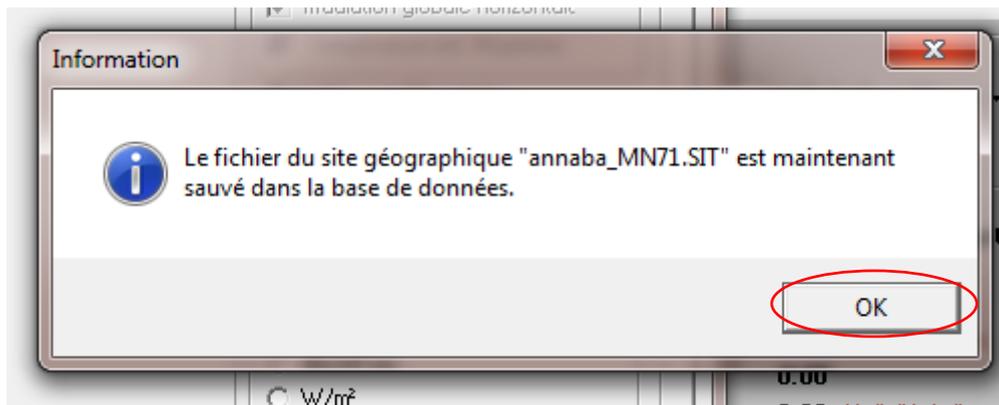
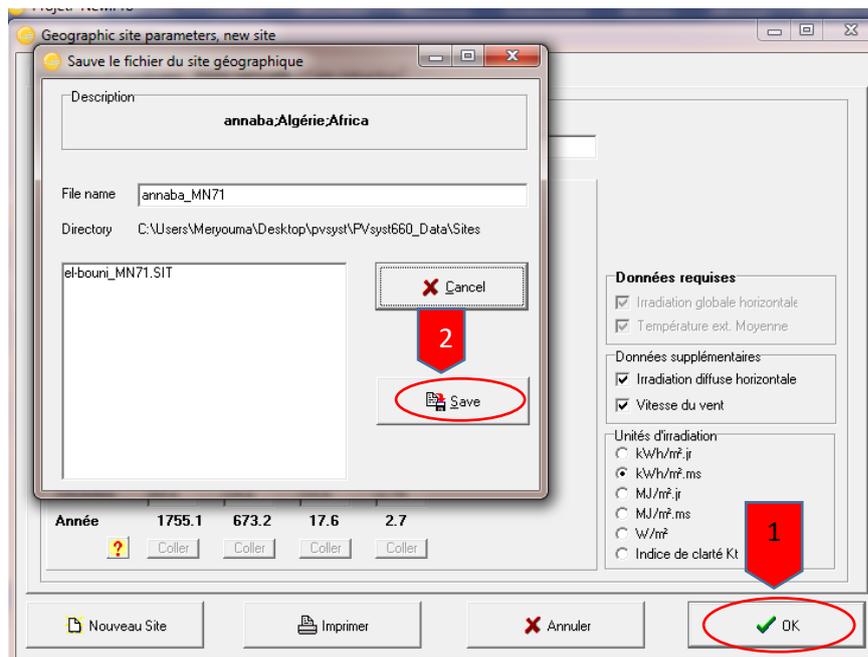
- La troisième étape dans laquelle on détermine le site par son nom, son pays et ses coordonnées géographiques (longitude et latitude)



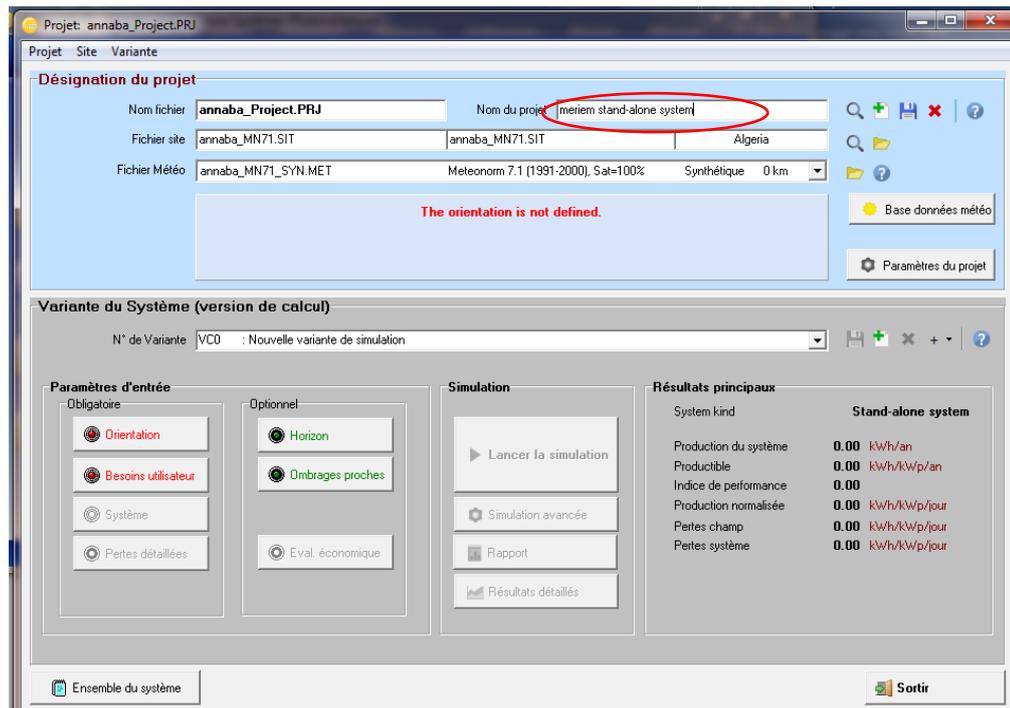
- La quatrième étape, après la détermination du site dans « PVsyst », un tableau de données pour deux types de rayonnement solaire mensuelle (globale et diffus) est remis, ainsi que la température et la vitesse du vent du site à étudier, par « meteonorm ».



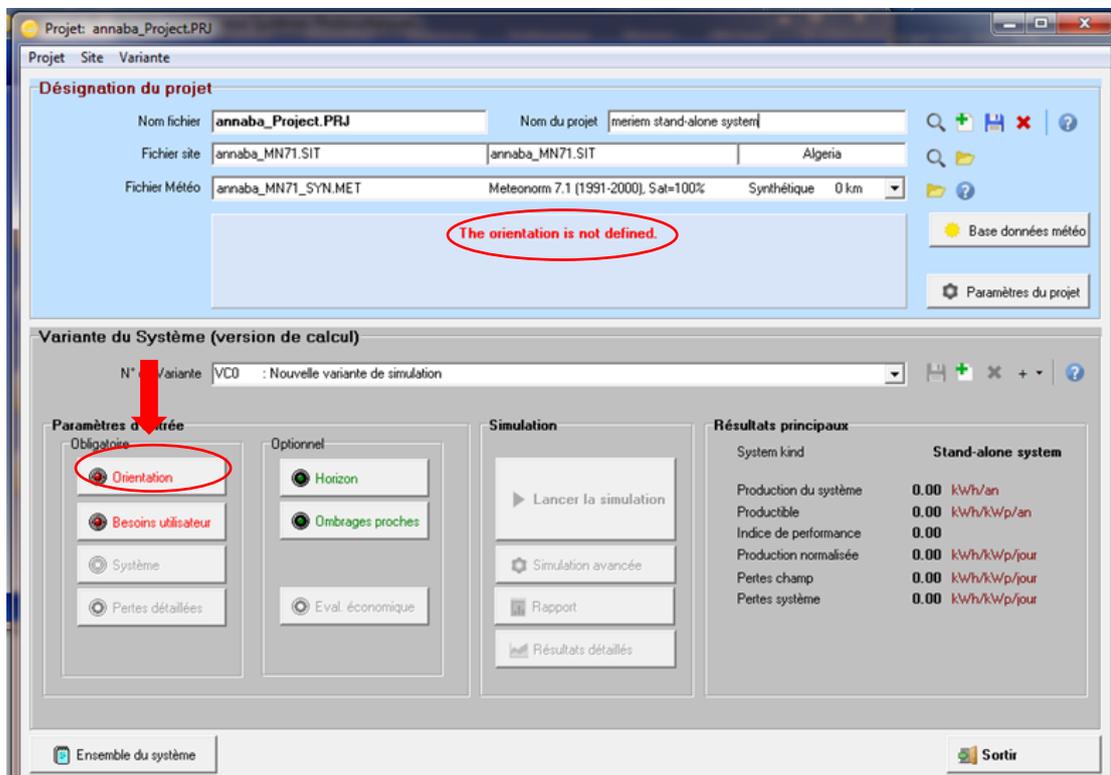
- On suit les étapes suivantes pour sauvegarder le site



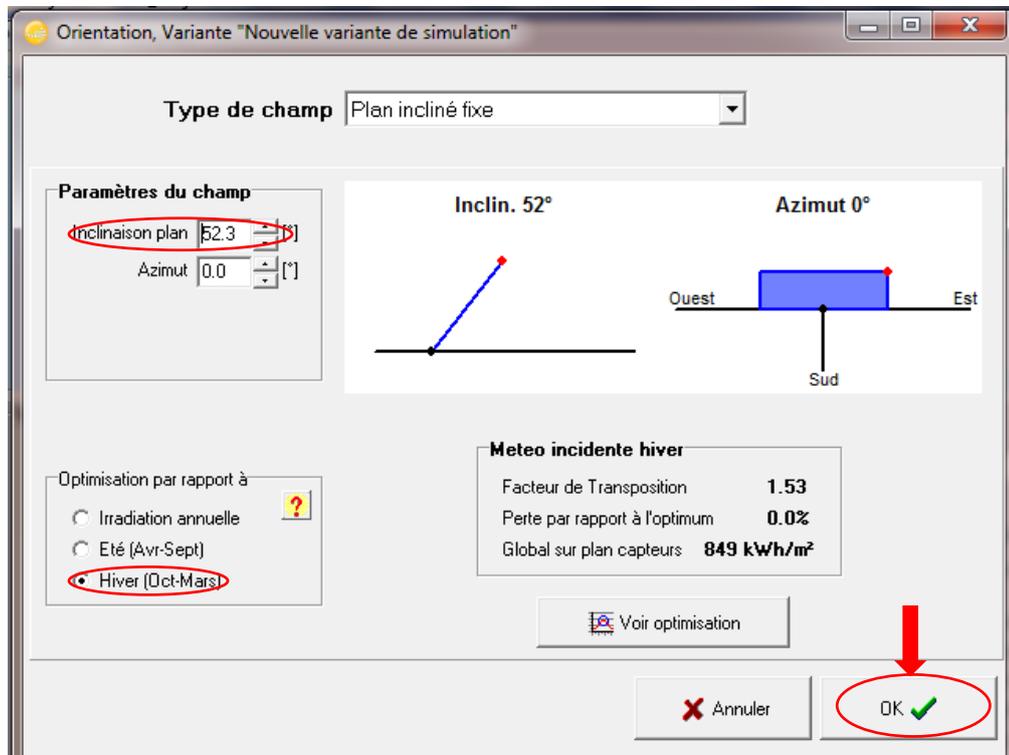
4/ on va citer le nom du notre projet



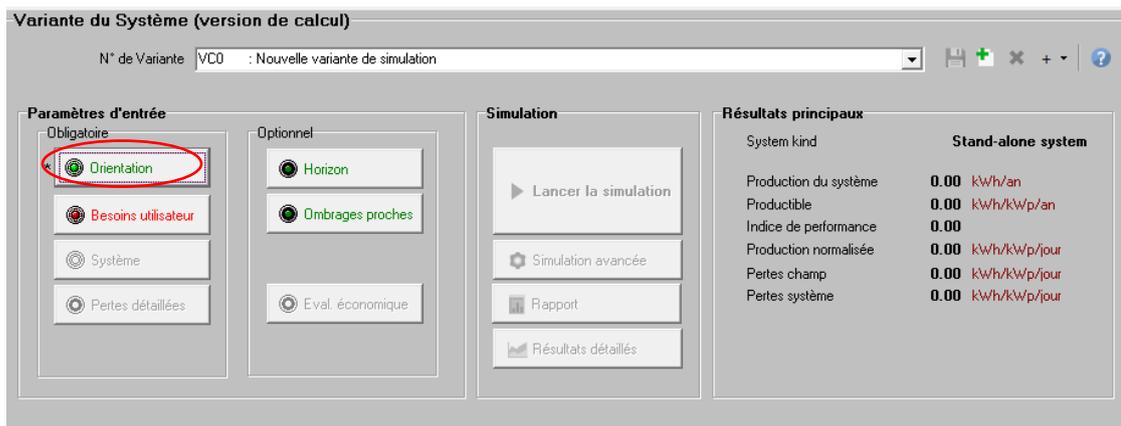
5/ A cette étape, un message apparaît en rouge, puis on clique sur « orientation » pour déterminer le message requis

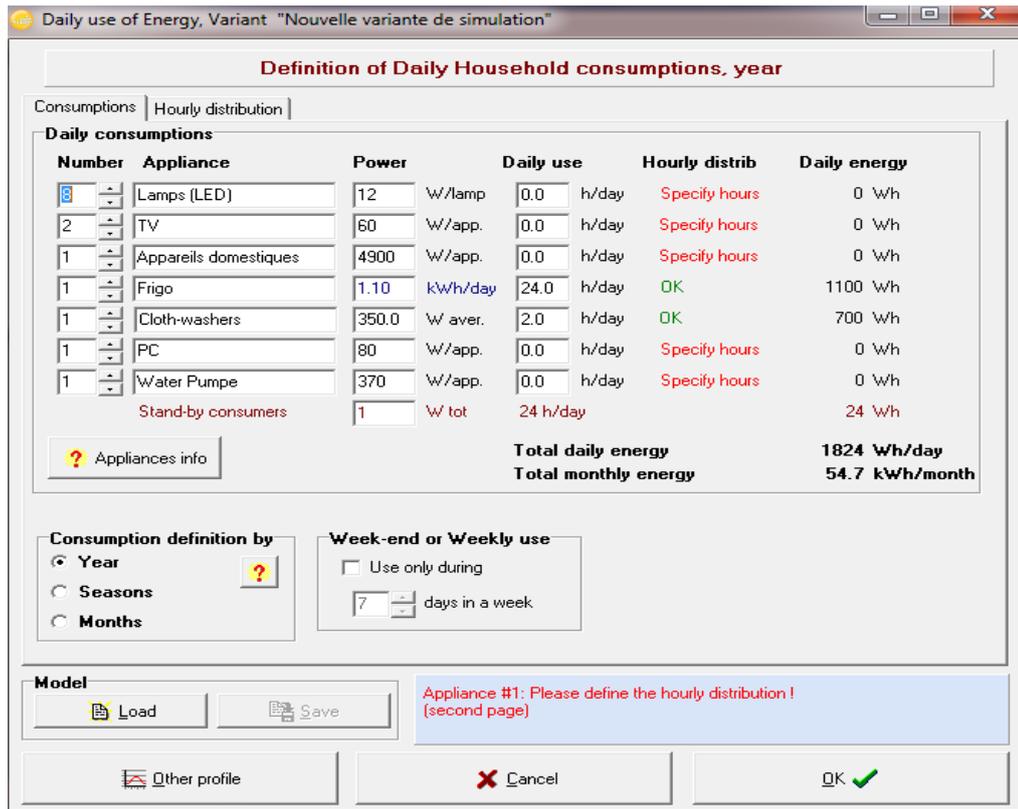


6/ Ci-dessous, on va définir l'angle, la direction et la position du panneau solaire, dans ce cas on va choisir un plan incliné fixe, et on va indiquer que la bonne optimisation du panneau solaire est prise en hiver, après on clique sur « OK »

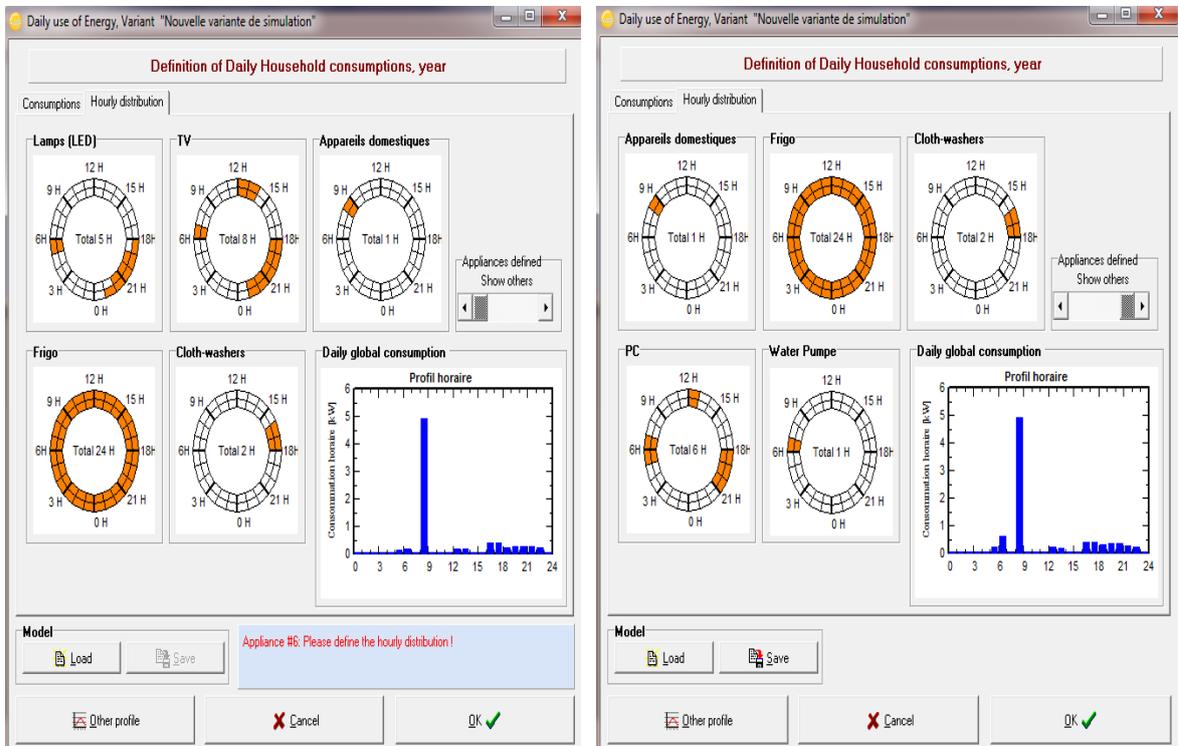


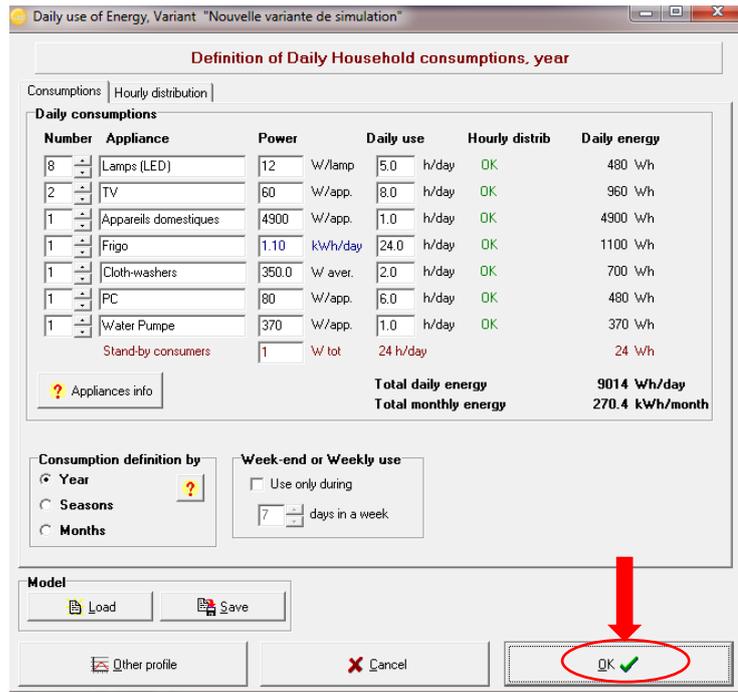
7/ on clique sur « besoins utilisateur » et on va préciser tous les besoins de notre utilisateur



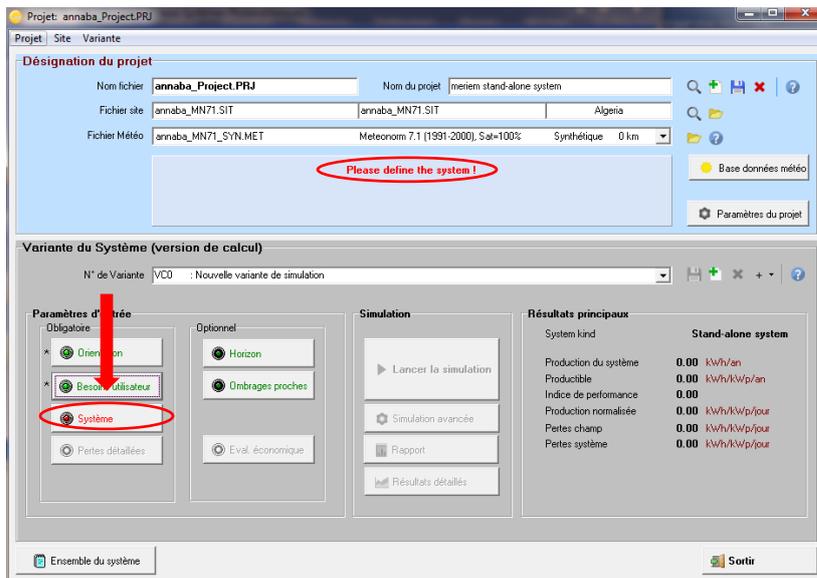


8/ après la précision de tous les besoins on va déterminer les heures quotidiennes de travail de chaque appareil comme indiqué ci-dessous





9/ après avoir confirmé l'étape précédente, un autre message apparaît en rouge, on clique sur « système » pour déterminer le message requis



10/ après avoir cliqué sur « system », la fenêtre suivante apparaît, nous déterminons le pourcentage de la probabilité de déconnecter le système quotidiennement (5%), la tension du système (48V) et le nombre de jours possibles lorsque l'absence soleil (2 jours par semaine).

- Après on clique sur « Storage » pour déterminer tout ce qui concerne les batteries en termes de nombre, de type, de tension et de méthode de connexion, ainsi que le

fabricant, en plus de déterminer la température mensuelle de l'environnement dans lequel les batteries sont situées.

Design of a Standalone system, Variant "Nouvelle variante de simulation"

Specified User's needs | Pre-sizing suggestions | System summary

Av. daily needs : 9.0 kWh/day

Enter accepted LOL: 5.0 %

Enter requested autonomy: 4.0 day(s)

Detailed pre-sizing

Battery (user) voltage: 48 V

Suggested capacity: 884 Ah

Suggested PV power: 2.53 kWc (nom.)

Storage | Champ PV | Back-up | Schema

**Procedure**

The Pre-sizing suggestions are based on the Monthly meteo and the user's needs definition

- Pre-sizing: Define the desired Pre-sizing conditions (LOL, Autonomy, Battery voltage)
- Storage: Define the battery pack (default checkboxes will approach the pre-sizing)
- PV Array design: Design the PV array (PV module) and the control mode. You are advised to begin with a universal controller.
- Back-up: Define an eventual Genset

**Specify the Battery set**

Sort Batteries by:  voltage  capacity  manufacturer

Generic

Toutes les technol.

1 Batterys in serie Number of batterys: 1

1 Batterys in parallel Number of elements: 1

Battery pack voltage: 2 V

Global capacity: 100 Ah

Stored energy (80% DOD): 0.2 kWh

Total weight: 0 kg

Nb. cycles at 50% DOD: 1475

Total stored energy during the battery life: 164 kWh

**Operating battery temperature**

Temper. mode: Fixed (tempered local)

Fixed temperature: 20 °C

Please choose a battery model !

Cancel OK

Design of a Standalone system, Variant "Nouvelle variante de simulation"

Specified User's needs | Pre-sizing suggestions | System summary

Av. daily needs : 9.0 kWh/day

Enter accepted LOL: 5.0 %

Enter requested autonomy: 2.0 day(s)

Detailed pre-sizing

Battery (user) voltage: 48 V

Suggested capacity: 442 Ah

Suggested PV power: 2.61 kWc (nom.)

Storage | Champ PV | Back-up | Schema

**Procedure**

The Pre-sizing suggestions are based on the Monthly meteo and the user's needs definition

- Pre-sizing: Define the desired Pre-sizing conditions (LOL, Autonomy, Battery voltage)
- Storage: Define the battery pack (default checkboxes will approach the pre-sizing)
- PV Array design: Design the PV array (PV module) and the control mode. You are advised to begin with a universal controller.
- Back-up: Define an eventual Genset

**Specify the Battery set**

Sort Batteries by:  voltage  capacity  manufacturer

Generic | 12V 160Ah Pb Sealed Gel Solar 12V / 160 Ah

Pb-acide

4 Batterys in serie Number of batterys: 12

3 Batterys in parallel Number of elements: 72

Battery pack voltage: 48 V

Global capacity: 480 Ah

Stored energy (80% DOD): 18.4 kWh

Total weight: 890 kg

Nb. cycles at 50% DOD: 2700

Total stored energy during the battery life: 33229 kWh

**Operating battery temperature**

Temper. mode: Monthly specified values

Monthly values

Veillez choisir le module PV !

Cancel OK

11/ Après avoir cliqué sur « champ PV », on fait ce qui suit :

- On choisit la taille du système en fonction de la capacité de production
- On choisit le fabricant de panneaux solaires, son type, sa capacité et le nombre totale des modules
- On va sélectionner le type d'onduleur et ses caractéristiques
- Ensuite, la méthode de connexion des panneaux en série et en parallèle
- Enfin, on clique sur « OK » pour sortir et trouver le system prêt à la simulation

Design of a Standalone system, Variant: "Nouvelle variante de simulation"

Specified User's needs | Pre-sizing suggestions | System summary

Av. daily needs : 9.0 kWh/day | Enter accepted LOL: 5.0 % | Enter requested autonomy: 2.0 day(s) | Battery (user) voltage: 48 V | Suggested capacity: 442 Ah | Suggested PV power: 2.61 kWc (nom.)

Storage: Champ PV | Back-up | Schema

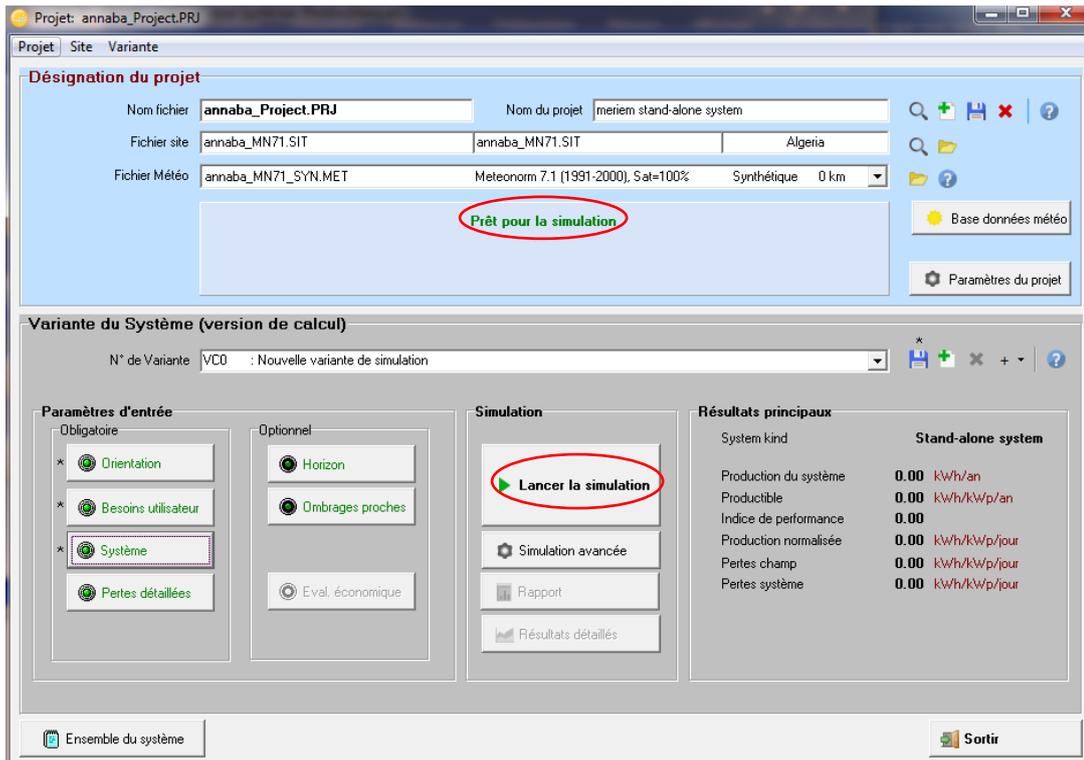
Sub-array name and Orientation: Name: Champ PV | Orient: Plan incliné fixe | Tilt: 52° | Azimut: 0° | Presizing help: No Sizing | Enter planned power: 2.40 kWc | ... or available area: 0 m²

Select the PV module: Prod. depuis 2015 | Sort modules by: power | Jinkosolar | 275 Wp 27V | Si-mono | JKMS275M-60V Maxim | Since 2017 | Manufacturer/Ma | modules nécessaires approx. 9 | Sizing voltages: Vmpp (60°C) 26.8 V | Voc (-10°C) 42.7 V

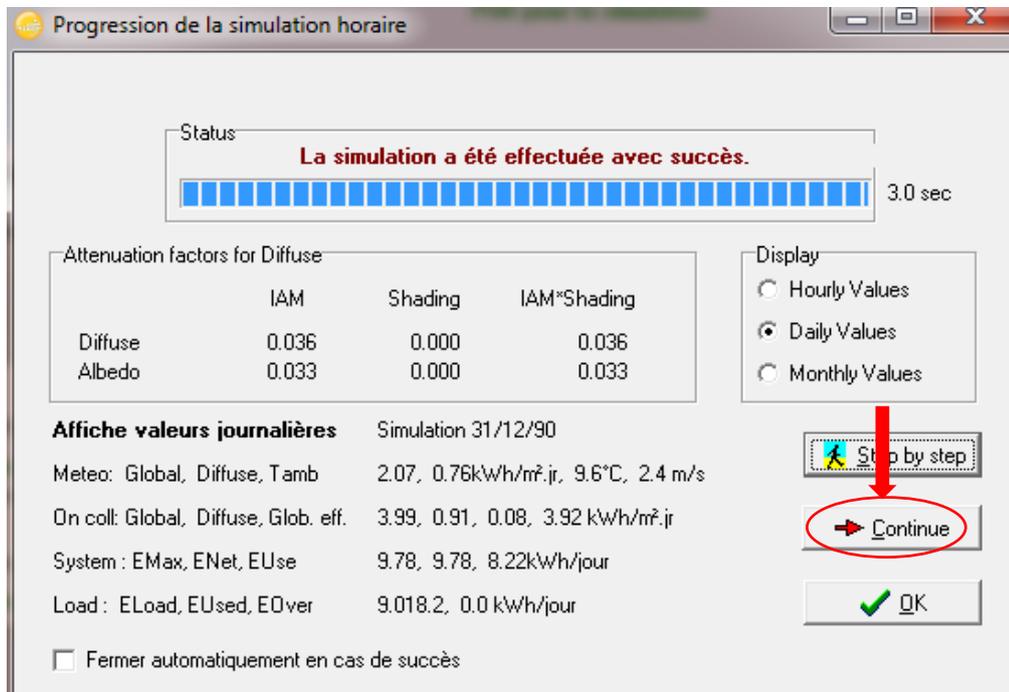
Select the control mode and the controller: MPPT power converter | Universal controller | All Manufacturers | Max. Charging - Discharging current | Operating mode: MPPT converter | MPPT 360 W | 48 V | 60 A | 8 A | Universal controller with MPPT conv.

PV Array design: Number of modules and strings: Mod. in serie 2 | Nb. strings 5 | Nb modules 10 | Area 16 m² | Operating conditions: Vmpp (60°C) 54 V | Vmpp (20°C) 64 V | Voc (-10°C) 85 V | Plane irradiance 1000 W/m² | Imp (STC) 44.2 A | Isc (STC) 47.6 A | Isc (at STC) 47.0 A | Max. operating power à 1000 W/m² et 50°C 2.5 kW | Array's nom. power (STC) 2.8 kWp

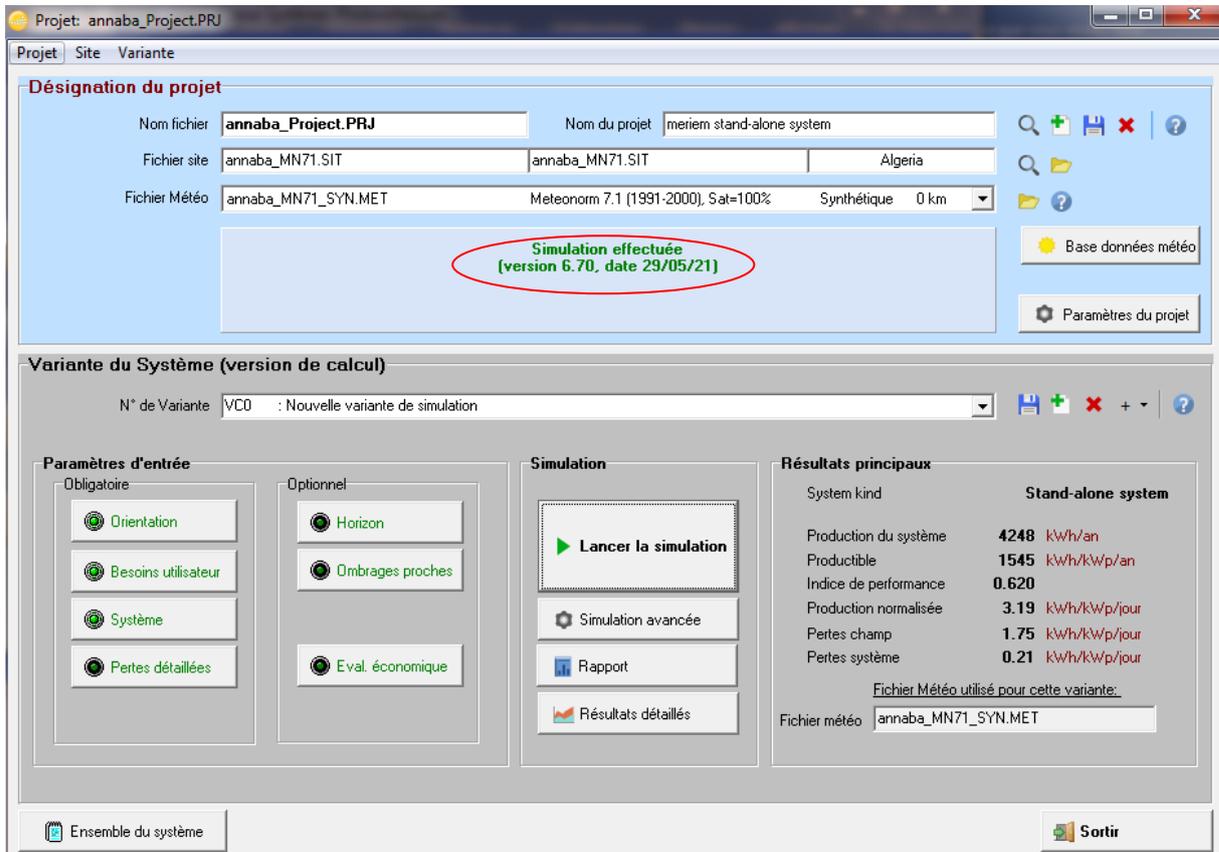
Cancel | OK



12/ après avoir cliqué sur « lancer la simulation », la fenêtre suivante apparaît, une fois la simulation est terminée, on clique sur « OK »



13/ A la fin, un message apparaît que la simulation est effectuée avec un rapport détaillé



### III-6- Rapport finale de la simulation :

PVSYST V6.70		29/05/21	Page 1/4
<b>Système isolé avec batteries: Paramètres de simulation</b>			
<b>Projet : meriem stand-alone system</b>			
<b>Site géographique</b>	<b>Annaba</b>	<b>Pays</b>	<b>Algeria</b>
<b>Situation</b>	Latitude	36.89° N	Longitude 7.74° E
Temps défini comme	Temps légal	Fus. horaire TU+1	Altitude 3 m
	Albédo	0.20	
<b>Données météo:</b>	<b>annaba</b>	Meteonorm 7.1 (1991-2000), Sat=100% - Synthétique	
<b>Variante de simulation : Nouvelle variante de simulation</b>			
	Date de la simulation	29/05/21 à 12h44	
<b>Paramètres de simulation</b>	Type de système	<b>Stand-alone system</b>	
<b>Orientation plan capteurs</b>	Inclinaison	52°	Azimut 0°
<b>Modèles utilisés</b>	Transposition	Perez	Diffus Perez, Meteonorm
<b>Caractéristiques du champ de capteurs</b>			
<b>Module PV</b>	Si-mono	Modèle	<b>JKMS275M-60V Maxim</b>
Original PVSyst database		Fabricant	Jinkosolar
Nombre de modules PV		En série	2 modules
Nombre total de modules PV		Nbre modules	10
Puissance globale du champ		Nominale (STC)	<b>2750 Wc</b>
Caractéristiques de fonct. du champ (50°C)		U mpp	56 V
Surface totale		Surface modules	<b>16.4 m²</b>
		En parallèle	5 chaînes
		Puissance unitaire	275 Wc
		Aux cond. de fonct.	2483 Wc (50°C)
		I mpp	44 A
		Surface cellule	14.2 m²
<b>Facteurs de perte du champ PV</b>			
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	21 mOhm	Frac. pertes 1.5 % aux STC
Perte diode série	Chute de tension	0.7 V	Frac. pertes 1.1 % aux STC
Perte de qualité module			Frac. pertes -0.8 %
Perte de "mismatch" modules			Frac. pertes 1.0 % au MPP
Perte de "mismatch" strings			Frac. pertes 0.10 %
Effet d'incidence, paramétrisation ASHRAE	IAM =	1 - bo (1/cos i - 1)	Param. bo 0.05
<b>Paramètres du système</b>	Type de système	<b>Système isolé avec batteries</b>	
<b>Batterie</b>	Modèle	<b>Solar 12V / 160 Ah</b>	
	Fabricant	Generic	
Caractéristiques du banc de batteries	Tension	48 V	Capacité nominale 480 Ah
	Nombre d'unités	4 en série x 3 en parallèle	
	Température	Valeurs mensuelles données	
<b>Régulateur</b>	Modèle	Universal controller with MPPT convertter	
	Technologie	MPPT convertter	Coeff. de temp. -5.0 mV/°C/elem.
Convertisseur	Efficacité maxi et EURO	97.0 / 95.0 %	
Seuils de régulation batterie	Seuils de commande selon	SOC calculation	
	Charge	SOC = 0.90 / 0.75	i.e. approx. 53.4 / 50.1 V
	Décharge	SOC = 0.20 / 0.45	i.e. approx. 47.2 / 48.9 V
<b>Besoins de l'utilisateur :</b>	Consomm. domestique moyenne	Constants sur l'année 9.0 kWh/Jour	

## Système isolé avec batteries: Besoins de l'utilisateur

**Projet :** meriem stand-alone system

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

Principaux paramètres système	Type de système	Isolé avec batteries		
Orientation plan capteurs	inclinaison	52°	azimut	0°
Modules PV	Modèle	JKMS275M-60V Maxim	Pnom	275 Wc
Champ PV	Nombre de modules	10	Pnom total	<b>2750 Wc</b>
Batterie	Modèle	Solar 12V / 160 Ah	Technologie	Pb-acide, scellée, Gel
Batteries	Nombre d'unités	12	Tension / Capacité	<b>48 V / 480 Ah</b>
Besoins de l'utilisateur	Consomm. domestique	Constants sur l'année	Global	3290 kWh/an

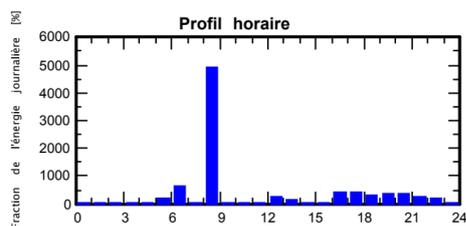
**Consomm. domestique, Constants sur l'année, moyenne = 9.0 kWh/jr**

### Valeurs annuelles

	Nombre	Puissance	Utilisation	Energie
Lamps (LED)	8	12 W/lampe	5 h/jour	480 Wh/jour
TV	2	60 W/app	8 h/jour	960 Wh/jour
Appareils domestiques	1	4900 W/app	1 h/jour	4900 Wh/jour
Frigo	1		24 Wh/jour	1100 Wh/jour
Cloth-washers	1		2 Wh/jour	700 Wh/jour
PC	1	80 W tot	6 h/jour	480 Wh/jour
Water Pumpe	1	370 W tot	1 h/jour	370 Wh/jour
Consomm. de veille			24 h/jour	24 Wh/jour

Energie journalière totale

9014 Wh/jour



## Système isolé avec batteries: Résultats principaux

**Projet :** meriem stand-alone system

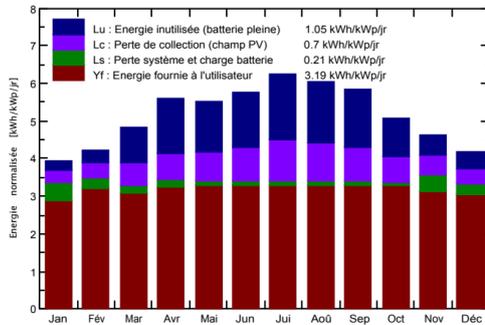
**Variante de simulation :** Nouvelle variante de simulation

Principaux paramètres système		Type de système	Isolé avec batteries	
Orientation plan capteurs		inclinaison	52°	azimut 0°
Modules PV		Modèle	JKMS275M-60V Maxim	Pnom 275 Wc
Champ PV		Nombre de modules	10	Pnom total <b>2750 Wc</b>
Batterie		Modèle	Solar 12V / 160 Ah	Technologie Pb-acide, scellée, Gel
Batteries		Nombre d'unités	12	Tension / Capacité <b>48 V / 480 Ah</b>
Besoins de l'utilisateur		Consomm. domestique	Constants sur l'année	Global 3290 kWh/an

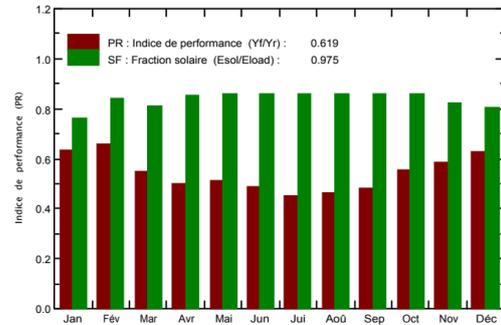
### Principaux résultats de la simulation

Production du système	<b>Energie disponible</b>	<b>4254 kWh/an</b>	Productible	1547 kWh/kWc/an
	Energie utilisée	3206 kWh/an	En excès (inutilisée)	1058 kWh/an
	Indice de performance (PR)	61.89 %	Fraction solaire (SF)	97.45 %
Besoins non satisfaits	Fraction du temps	2.3 %	Energie manquante	84 kWh/an

Productions normalisées (par kWp installé): Puissance nominale 2750 Wc



Indice de performance (PR) et Fraction solaire (SF)



### Nouvelle variante de simulation

#### Bilans et résultats principaux

	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	E Avail kWh	EUnused kWh	E Miss kWh	E User kWh	E Load kWh	SolFrac
Janvier	73.6	119.4	287.7	19.6	31.63	247.8	279.4	0.887
Février	84.1	115.0	274.7	22.0	4.61	247.8	252.4	0.982
Mars	128.8	146.1	345.5	82.2	16.37	263.1	279.4	0.941
Avril	169.7	162.8	383.4	118.7	1.59	268.8	270.4	0.994
Mai	207.1	164.4	384.3	112.9	0.00	279.4	279.4	1.000
Juin	223.1	165.3	382.2	119.8	0.00	270.4	270.4	1.000
Juillet	244.7	186.1	421.0	150.5	0.00	279.4	279.4	1.000
Août	202.0	180.7	408.9	138.2	0.00	279.4	279.4	1.000
Septembre	154.8	170.2	389.9	127.9	0.00	270.4	270.4	1.000
Octobre	116.3	153.9	354.3	85.9	0.00	279.4	279.4	1.000
Novembre	81.2	135.8	316.6	42.2	11.69	258.7	270.4	0.957
Décembre	69.4	127.8	305.5	38.7	17.86	261.6	279.4	0.936
Année	1755.1	1827.5	4253.8	1058.5	83.75	3206.4	3290.1	0.975

Légendes:	GlobHor	Irradiation globale horizontale	E Miss	Energie manquante
	GlobEff	Global "effectif", corr. pour IAM et ombrages	E User	Energie fournie à l'utilisateur
	E Avail	Energie solaire disponible	E Load	Besoin d'énergie de l'utilisateur
	EUnused	Energie inutilisée (batterie chargée)	SolFrac	Fraction solaire (Eutile / Ebesoin)

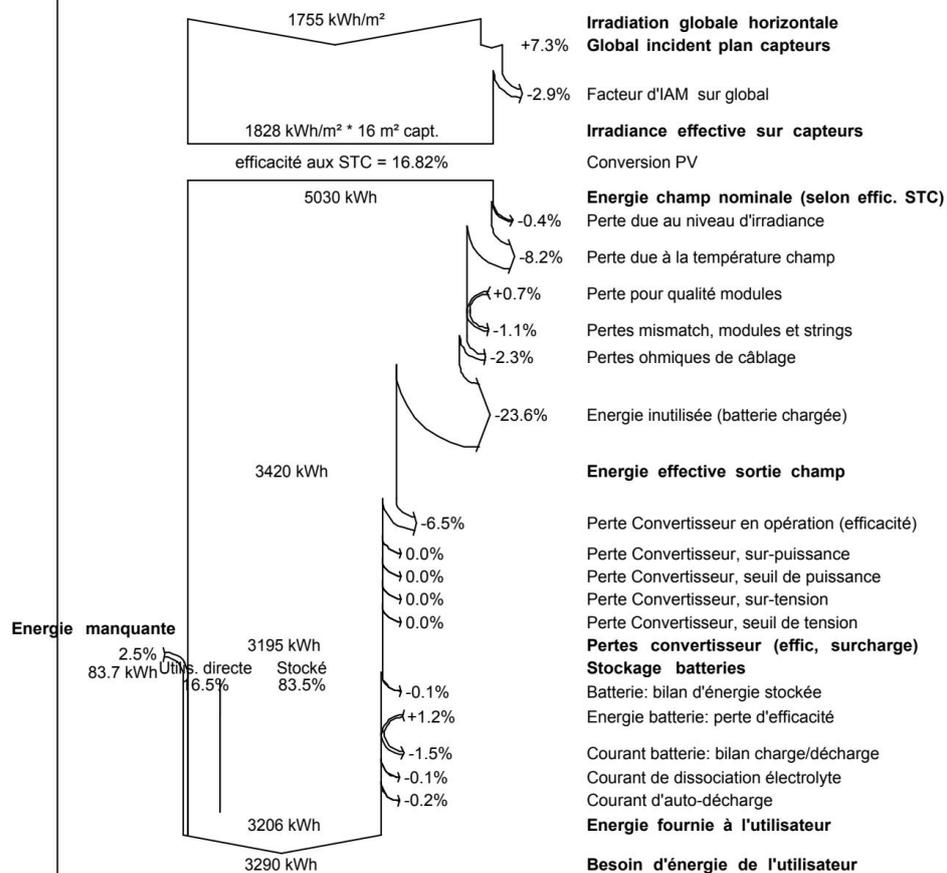
## Système isolé avec batteries: Diagramme des pertes

**Projet :** meriem stand-alone system

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

Principaux paramètres système	Type de système	Isolé avec batteries		
Orientation plan capteurs	inclinaison	52°	azimut	0°
Modules PV	Modèle	JKMS275M-60V Maxim	Pnom	275 Wc
Champ PV	Nombre de modules	10	Pnom total	<b>2750 Wc</b>
Batterie	Modèle	Solar 12V / 160 Ah	Technologie	Pb-acide, scellée, Gel
Batteries	Nombre d'unités	12	Tension / Capacité	<b>48 V / 480 Ah</b>
Besoins de l'utilisateur	Consomm. domestique	Constants sur l'année	Global	3290 kWh/an

Diagramme des pertes sur l'année entière



### III-7- Etude comparative :

Tableau 3: Tableau comparative entre l'étude manuel et l'étude par PVsyst

	<b>Etude technique</b>	<b>Etude par PVsyst</b>
<b>Puissance totale</b>	8940	9013
<b>Nombre de panneaux</b>	12	10
<b>Nombre de batteries</b>	14	12

On note que le nombre de panneaux et de batteries par simulation est inférieur au calcul manuel de telle sorte que nous avons 10 panneaux et 12 batteries dans la simulation, 12 panneaux et 14 batteries dans le calcul, ce qui est dû à la supériorité du logiciel PVsyst sur les équations manuelles, Ces dernières diffèrent d'un ingénieur à un autre, mais elles conduisent toutes à des résultats convergents, grâce à l'amélioration et au développement des concepteurs de logiciel pour les équations arithmétiques et leur vérification ainsi qu'à l'étude du site une étude serrée et précise, donc il a été adopté comme le meilleur logiciel pour la conception de systèmes solaires, et cela permet d'économiser beaucoup d'efforts et de temps.

### III-8- Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les étapes nécessaires pour concevoir un système photovoltaïque autonome. Ensuite, nous avons donné une présentation du logiciel « PVsyst », la présentation et la conception de notre projet étudié en utilisant le calcul manuel et le logiciel PVsyst avec le rapport final de la simulation. Enfin, nous avons fait une étude comparative entre les deux méthodes.

## **Chapitre IV :**

Pompage solaire automatique commandé  
par Arduino.

## **IV-1- Introduction :**

Dans les communautés rurales des pays en développement, l'eau est très souvent collectée à l'aide de pompes à main. L'utilisation de tels systèmes nécessite un temps et un effort physique considérables de la part des utilisateurs. L'introduction de systèmes de pompage motorisés peut réduire l'effort de collecte d'eau et libérer du temps pour d'autres activités. Parmi les différentes alternatives, le pompage photovoltaïque (PV) est déjà un concurrent économique et une solution prometteuse.

Désormais, le solaire photovoltaïque fournit l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement d'une motopompe permettant de puiser l'eau à des profondeurs pouvant aller jusqu'à 350 mètres.

Il existe deux options de pompage photovoltaïque :

- **Avec batterie** : pour stocker l'énergie électrique produite, ce qui permet d'avoir une disponibilité de l'eau en dehors des heures d'ensoleillement
- **Sans batterie** : la disponibilité de l'eau pendant la nuit ou pendant les journées à faible ensoleillement est assurée par un réservoir de stockage d'eau.

Afin d'aller vers l'optimisation du système, le couplage entre la motopompe et le capteur de niveau d'eau est considéré ici comme une première étape. Mais cet appariement nécessite quelques composants qui lui permettent de commander et d'optimiser.

Pour que l'eau puisse être transportée automatiquement et régulièrement de la source vers le réservoir, dans ce chapitre, on va faire une étude d'un mini système de pompage solaire automatique commandé par Arduino.

## **IV-2- Avantages :**

- Extraire de quelques centaines de litres à plusieurs mètres-cubes d'eau par heure.
- Installation simple et rapide.
- Entretien minimal.
- Très grande fiabilité et longue durée de vie.
- Retour sur investissement rapide.
- Faibles coûts d'exploitation.

### IV-3- Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement de ce système consiste à commander la pompe en fonction du niveau d'eau détecté dans le réservoir. En effet, la pompe s'active automatiquement une fois le niveau bas détecté, afin d'éviter le manque d'eau dans le réservoir, puis s'arrête lorsque le niveau haut est atteint. Et le cycle recommence. Cependant, cette commande ne fonctionne qu'à l'aide de certains composants électroniques comme l'Arduino, interface de sortie, capteurs de niveau...

### IV-4- Schéma synoptique :

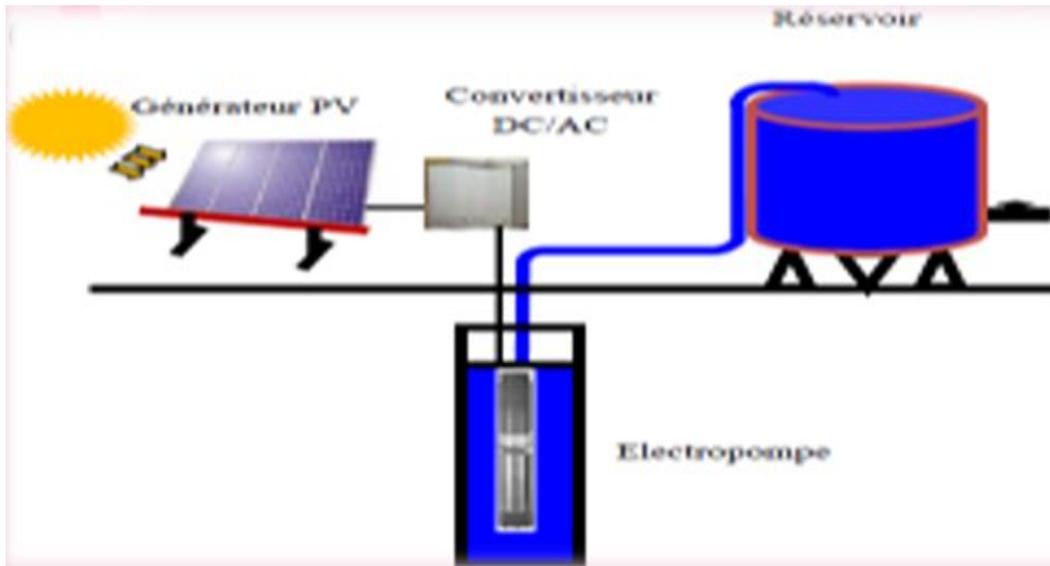


Figure 34: Schéma synoptique simplifié de pompage solaire

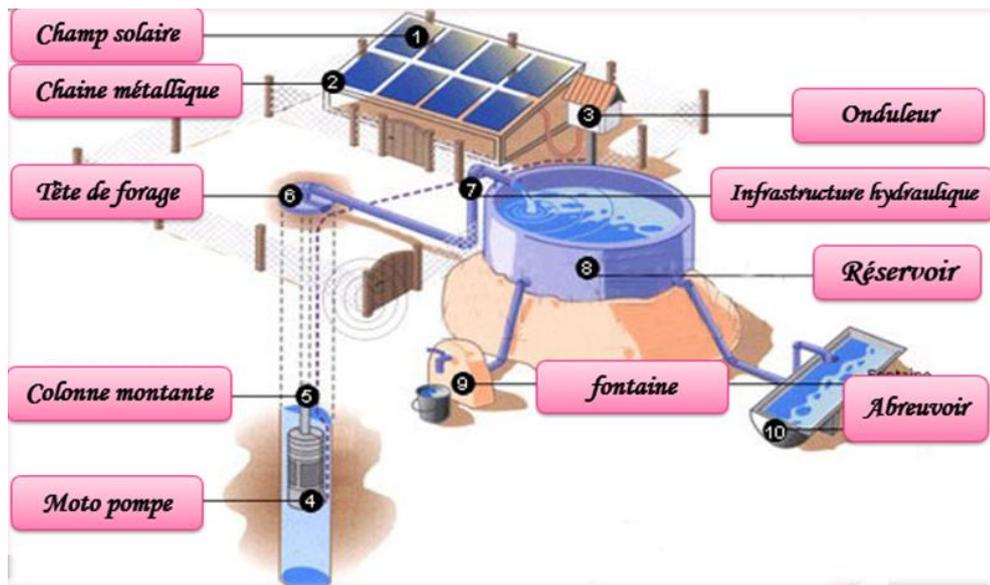


Figure 35: Schéma détaillé de pompage solaire

#### IV-5- Schéma de la partie électronique :

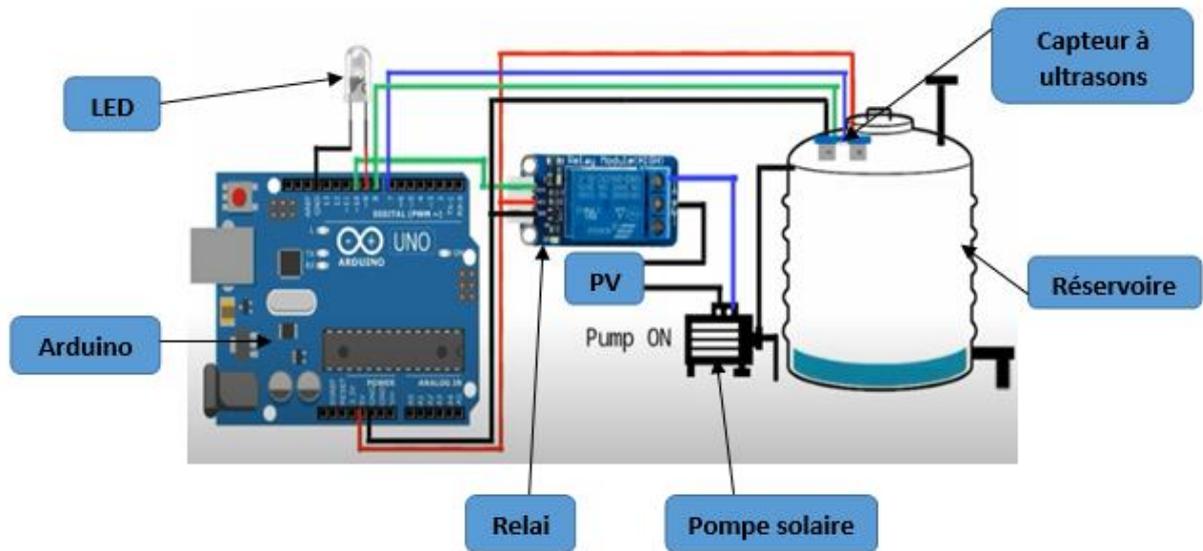


Figure 36: Schéma détaillé de la partie électronique

#### IV-6- Matériels utilisés :

##### IV-6-1- Pompe à eau solaire :

Une pompe à eau est une pompe qui permet la mise en mouvement de l'eau. Une pompe solaire peut être composée avec plusieurs technologies différentes, volumétrique (Shurflo), centrifuge ou hélicoïdale (Lorentz) et pour des utilisations variées comme le pompage de surface (étang, lac, rivière, cuve) et le pompage immergé (puits, forage). La principale caractéristique qui différencie la pompe "solaire" des pompes classiques branchées sur le réseau électrique 230V alternatif est sa tension d'alimentation qui est en continu, de 12 V et 24 V pour les plus petites à plus de 200 V, que l'on peut obtenir grâce à des panneaux solaires ou à des batteries. L'avantage de cette alimentation en courant continu est que l'on va pouvoir adapter la vitesse de rotation en fonction de l'énergie disponible, ce qui va permettre de pomper même avec un ensoleillement ou une tension batterie faible. De plus, la technologie ou via un contrôleur, on se débarrasse des pointes de courant au démarrage. [32]

##### IV-6-2- L'Arduino :

L'Arduino est une plate-forme de prototypage d'objets interactifs à usage créatif constituée d'une carte électronique et d'un environnement de programmation.

Sans tout ne connaître ni tout comprendre de l'électronique, cet environnement matériel et logiciel permet à l'utilisateur de formuler ses projets par l'expérimentation directe avec l'aide de nombreuses ressources disponibles en ligne.

Une carte Arduino est une petite (5,33 x 6,85 cm) carte électronique équipée d'un microcontrôleur.

Le microcontrôleur est un circuit intégré (une puce électronique) rassemblant un microprocesseur, de la mémoire ROM pour stocker un programme, de la mémoire vive pour stocker des états de variables et une interface d'entrées – sorties (les pattes). [32]

#### IV-6-3- Capteur à ultrasons HC-SR04 :

Le HC-SR04 est un capteur de distance à ultrasons peu coûteux qui fonctionne immédiatement avec un Arduino.

##### Spécifications :

- Alimentation : 5V DC
- Courant De Repos : <2ma
- Angle Effectif : <15°
- Distance De Portée : 2cm – 500 Cm
- Résolution : 0,3 Cm
- Fonctionne Avec Arduino

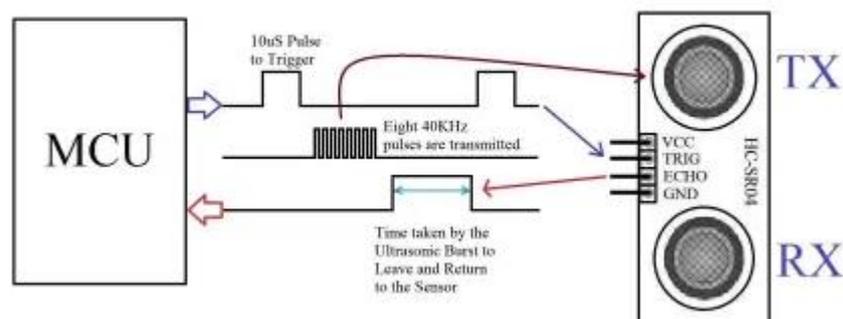


Figure 37: Principe de fonctionnement du capteur à ultrasons

#### IV-6-4- Le relais :

Un relais électromécanique est un organe électrique permettant de distribuer la puissance à partir d'un ordre émis par la partie commande. Ainsi, un relais permet l'ouverture et la fermeture d'un circuit électrique de puissance à partir d'une information logique. [33]

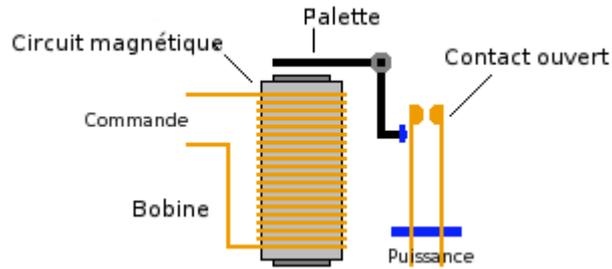
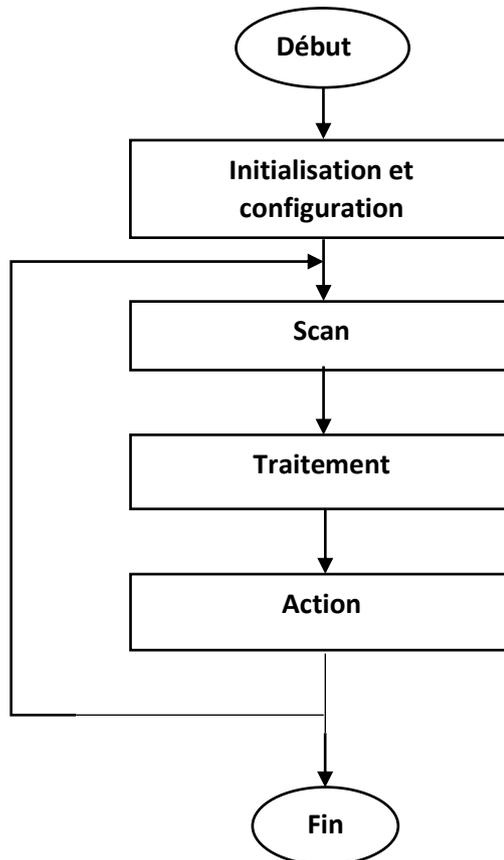


Figure 38: Schéma d'un relais électromécanique

#### IV-6-5- LED :

Une diode électroluminescente (led) est une source lumineuse à semi-conducteur à deux fils. Il s'agit d'une diode à jonction pn, qui émet de la lumière lorsqu'elle est activée.

#### IV-7- L'organigramme principale du programme :



## IV-8- Le programme :

```
float d;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(7, INPUT); //echo pin of ultraSonic
  pinMode(8, OUTPUT); //trig pin of ultraSonic
  pinMode(10, OUTPUT); // relay
  pinMode(9, OUTPUT); // buzzer pin
}
int low=25;
int high=5;
void vol() //distance calculaion...
{
  digitalWrite(8,HIGH);
  delayMicroseconds(8);
  digitalWrite(8,LOW);
  delayMicroseconds(2);
  d=pulseIn(7,HIGH);
  d=d/69;
}
void loop() {
  vol();
  while(1)
  {
    b:
    digitalWrite (10, HIGH); // Pump On...
    delay (5000);
    vol();
    if(d>low) //check high...
    {
```

```
digitalWrite(9,HIGH); // buzzer on.....
delay(2000);
digitalWrite(9,LOW);
goto a;
}
}
while(1)
{
a:
digitalWrite(10,LOW); // pump off...
delay(100);
vol();
if(d<high) //check low
{
digitalWrite(9,HIGH); //Buzzer beeping.....
delay(1000);
digitalWrite(9,LOW);
delay(1000);
digitalWrite(9,HIGH);
delay(1000);
digitalWrite(9,LOW);
delay(1000);
goto b;
}
}
}
```

#### **IV-9- Résultats et discussion :**

Dans la partie électronique de notre projet on a créé un code avec langage Arduino. En effet, notre microcontrôleur est un « Arduino UNO ».

Lorsque notre code fut complètement terminé, nous avons réalisé une série de tests sur notre montage.

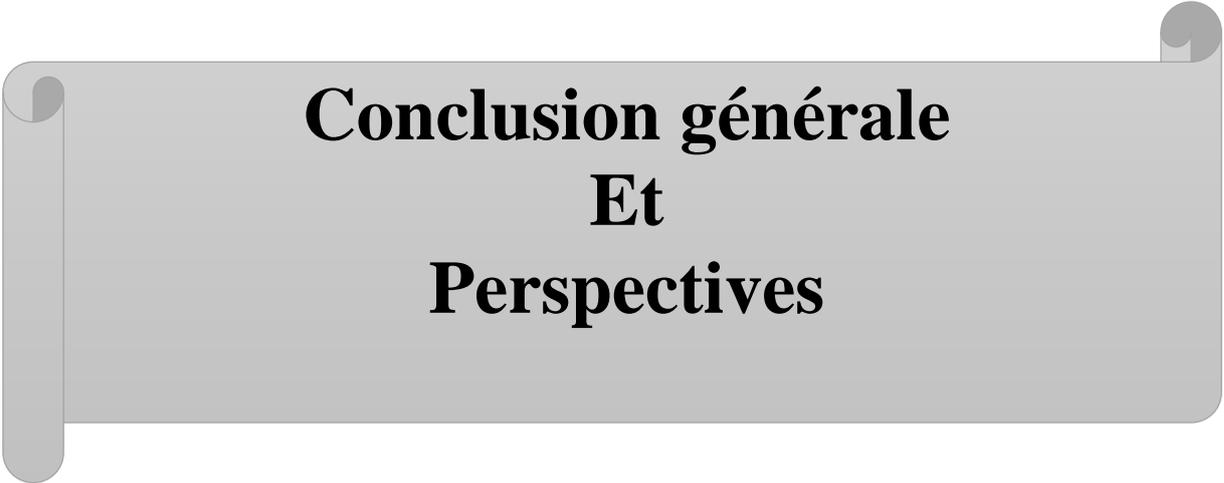
On a placé le capteur à ultrasons sur le dessus du réservoir. Le capteur à ultrasons calcule la distance et selon le code si la distance est inférieure à 5cm il éteint la pompe et si la distance est supérieure à 25 (ce qui est recommandé de changer selon votre besoin) le relais allume la pompe.

#### **IV-10- Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons parlé d'une façon générale sur le système du pompage solaire, ses avantages et le principe de fonctionnement de notre système de commande.

Ensuite, nous avons donné le schéma synoptique simplifié et détaillé de pompage solaire, avec le schéma détaillé de la partie électronique accompagné par le matériel utilisé dans cette partie.

De plus, nous avons donné l'organigramme et le programme Arduino de notre système de commande. A la fin, nous avons discuté les résultats et le principe de fonctionnement.



**Conclusion générale  
Et  
Perspectives**

## **Conclusion générale :**

Le travail qu'on a présenté, lié à une étude et réalisation d'une installation photovoltaïque pour une habitation par logiciel « PVsyst ». De plus, une réalisation d'un mini système de pompage solaire piloté par Arduino.

Les premiers objectifs ont été de présenter les différentes sources d'énergies renouvelables existantes accompagné par le principe de fonctionnement de chacune.

On a étudié, dans un deuxième temps, les bases indispensables à la compréhension de l'énergie solaire, quelques notions sur le rayonnement solaire. Ainsi, on a cité les différentes technologies solaires et les différents types des systèmes photovoltaïques, la cellule photovoltaïque et ces différents types, les modules photovoltaïques, le régulateur, l'onduleur et les types de stockage utilisés dans ce domaine. A la fin, nous avons cité quelques consignes d'utilisation, les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

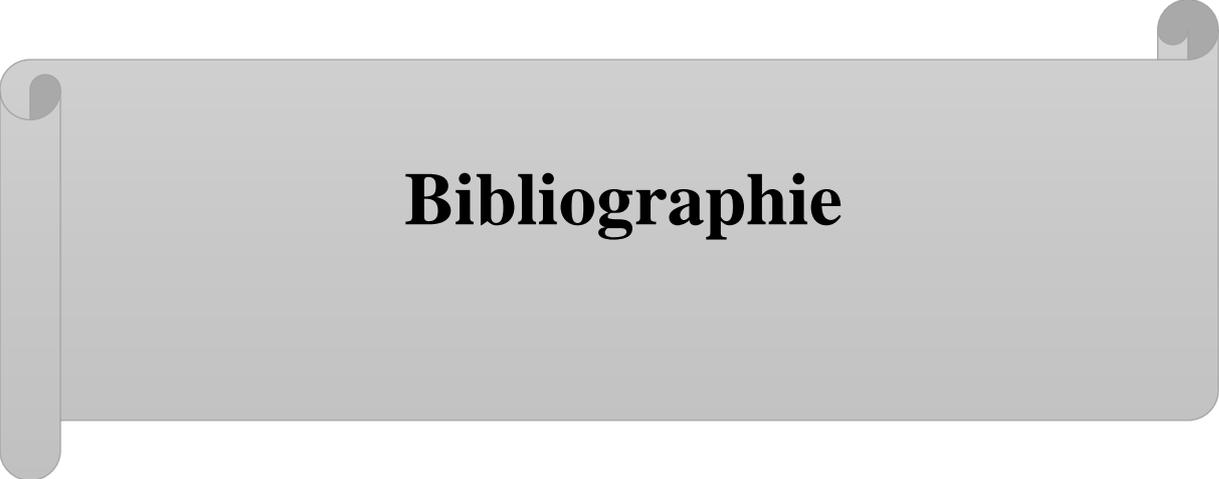
Puis, nous avons présenté les étapes nécessaires pour concevoir un système photovoltaïque autonome, une petite présentation du logiciel « PVsyst », la présentation et la conception du notre projet étudié, accompagné par le rapport final de la simulation.

D'autre part, le dernier chapitre, est basé sur le mini système de pompage solaire, ses avantages et le principe de fonctionnement de système de commande, le schéma synoptique simplifier et détaillé de pompage solaire. Ensuite, nous avons donné le schéma de la partie électronique accompagné par le matériel utilisé dans cette partie, l'organigramme et le programme Arduino du notre système de commande. Et à la fin, on a discuté les résultats et le principe de fonctionnement.

Enfin, l'Algérie est un pays très ensoleillé ; L'énergie solaire est disponible avec des degrés d'ensoleillement différents d'une région à une autre ; elle est entièrement renouvelable et parfaitement capables, à long terme, de satisfaire la majeure partie de nos besoins ; de plus elle est utilisée pour opérer dans diverses applications terrestres telle que l'électrification des zones isolées privées du réseau électrique. Finalement, l'énergie solaire représente aujourd'hui une solution rentable d'avenir à envisager pour une large utilisation dans le futur.

## **Perspectives :**

- Réaliser un panneau hybride aérovoltaïque.
- Ajouter un programme arduino qui nous permet de suivre le niveau d'eau dans le réservoir.



# **Bibliographie**

## Bibliographie :

- [1] F. Poitiers, "Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne - machine asynchrone à cage autonome - machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau", Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, Décembre 2003.
- [2] <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/energie-renouvelable-energie-eolienne-13745/>
- [3] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-eolienne>
- [4] <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/energie-renouvelable-energie-hydraulique-6659/>
- [5] <https://prezi.com/>
- [6] [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_mar%C3%A9motrice](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_mar%C3%A9motrice)
- [7] <https://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9othermie>
- [8] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-la-biomasse>
- [9] A. Benabda, " Contribution à l'étude d'une alimentation à base panneaux photovoltaïques avec stockage", Thèse de Doctorat de l'Université de Annaba, année 2018
- [10] A. Azizi, " Modélisation optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride ", Thèse de Doctorat de l'Université de Annaba, année 2019
- [11] Cabal Cédric, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [12] José Miguel Navarro, "Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible", Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
- [13] L. de Schoulepnikoff et Gymnase Auguste Piccard, "Quelle source d'énergie pour les vingt prochaines années ? " , Travail de maturité Alexandra Catana, 3M7, 2009.
- [14] José Miguel Navarro, "Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible", Thèse de doctorat. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
- [15] Antonio Luque and Steven Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", John Wiley & Sons Ltd, 2003
- [16] Jellad abdelhak, "modélisation et optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque –Eolienne", thèse de doctorat université d'Annaba, Algeria, 2014.
- [17] Angel CidPastor, "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques", Thèse de Doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.
- [18] Vighetti Stéphane, "Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion", Thèse de doctorat, Université Grenoble, Institut polytechnique de Grenoble, 2010.

- [19] Loïc Bailly, "Cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface", Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 2010.
- [20] Helali Kamelia, "Modelisation d'une cellule photovoltaïque. Etude comparative", These de doctorat Université de Tizi Ouzou, Algeria, 2012.
- [21] Akassewa tchapo singo, "Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome", These de doctorat université Henri Poincaré, Nancy-I,2010.
- [22] Lila Croci, "gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batterie/ supercondensateurs", thèse de doctorat de l'université de Poitiers,2013.
- [23] M. A. Tankari, "Système Multi-sources de Production d'Énergie Électrique", Thèse de doctorat de l'université du Havre, Décembre 2010.
- [24] R. Khezzar, "Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque", revue des Energie Renouvelables Vol.13 N° 3, pp 379-388, 2010.
- [25] A.Benkherif et B.Seddiki, "Etude technico économique d'un système photovoltaïque en site isolé par pvsyst", Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master, université Mohamed Boudiaf - m'sila, Juin 2018.
- [26] FOGELMAN & Régis MONTLOIN, "Installations Photovoltaïques dans l'habitat isolé", livre édité par : EDISUD, 1983.
- [27] S. Petibon, "nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques", thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2009.
- [28] A. LABOURET et M. VILLOZ, "Energie Solaire Photovoltaïque", livre édité par : DUNOD, 2006.
- [29] [http://www.photovoltaique.guidenr.fr/cours-photovoltaique-autonome/cours\\_photovoltaique-autonome.php](http://www.photovoltaique.guidenr.fr/cours-photovoltaique-autonome/cours_photovoltaique-autonome.php)
- [30] K. Amara, "contribution à l'étude de conception d'une centrale PV", mémoire Magister université de Tizi Ouzou 2015.
- [31] D.MAZILLE et V.BOITIER, "Documentation pour l'utilisation du logiciel PVSyst V5".
- [32] RAZAKARIASY Herinavalona Dimitrine, " ETUDE DE DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTÈME DE POMPAGE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE RÉALISATION D'UN MINI SYSTÈME DE POMPAGE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE PILOTÉ PAR ARDUINO ", mémoire master d'Ingénierie en Energies Renouvelables, juillet 2019.
- [33] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Relais\\_%C3%A9lectrom%C3%A9canique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Relais_%C3%A9lectrom%C3%A9canique)