

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

## MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

**Énergies Renouvelables**

*Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique*

**Intitulé :**

---

### ***DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE AVEC STOCKAGE POUR ALIMENTER UN SITE ISOLE (APPLIQUEE SUR L'ECOLE PRIMAIRE BELGHAZALI MOHAMMED-NAAMA-)***

---

**Présenté par :**

- Benabbas Noura.
- Chiha Nour El Houda.
- Benyahia Asma.

*Soutenu le : 09/07/2020 devant le Jury :*

<i><b>M. Taibi Ibrahim</b></i>	<i><b>MAA</b></i>	<i><b>Centre Universitaire Naâma</b></i>	<i><b>Président</b></i>
<i><b>M. Benmohammed Faycel</b></i>	<i><b>MCB</b></i>	<i><b>Centre Universitaire Naâma</b></i>	<i><b>Encadreur</b></i>
<i><b>M. Bouddou Riyadh</b></i>	<i><b>PhD</b></i>	<i><b>Centre Universitaire Naâma</b></i>	<i><b>Co-Encadreur</b></i>
<i><b>M. Brahimi Mohammed</b></i>	<i><b>MAA</b></i>	<i><b>Centre Universitaire Naâma</b></i>	<i><b>Examineur</b></i>

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## *Remerciement*

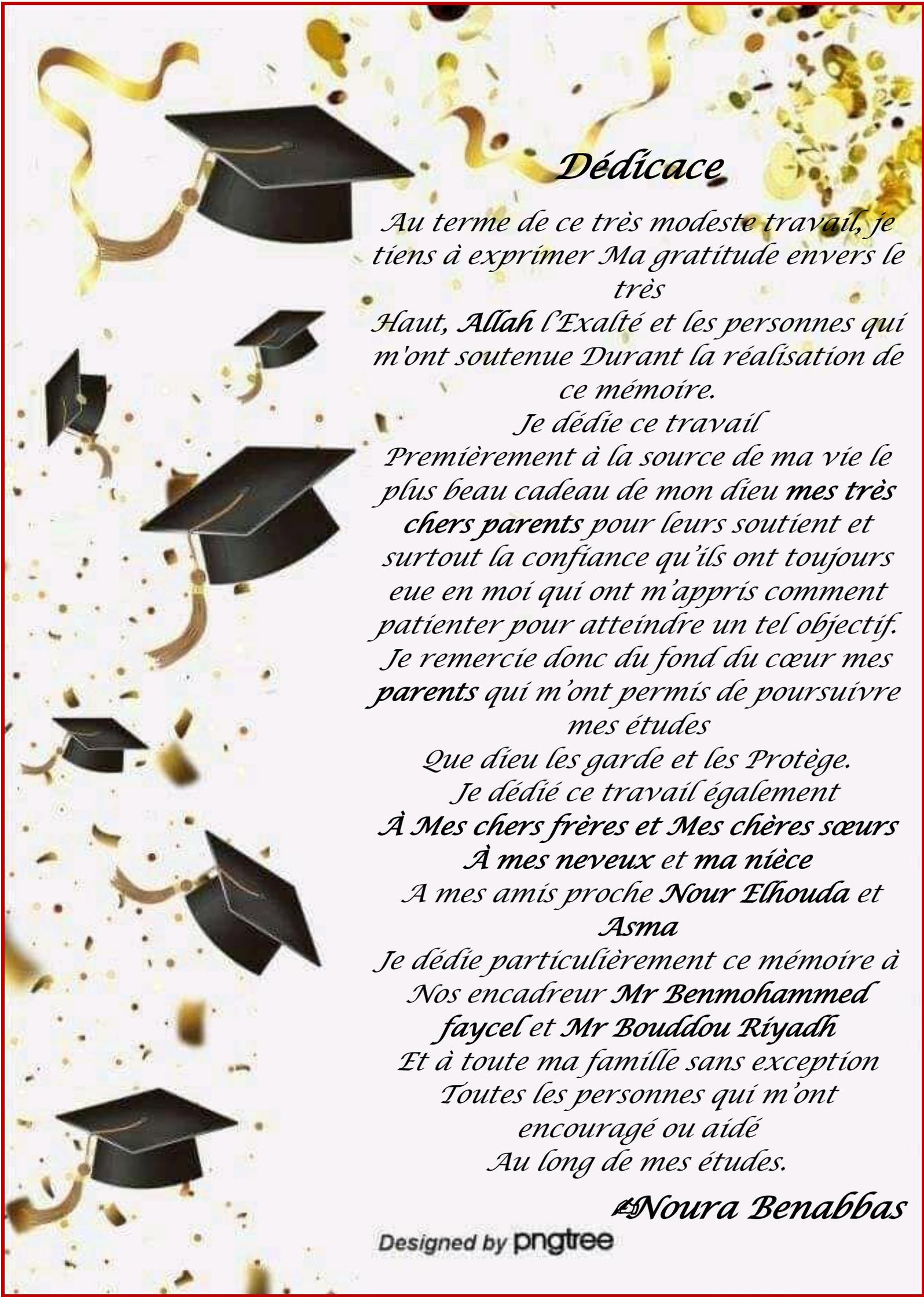
*Avant tout nous tenons nos remerciements à ALLAH de nous avoir donné le courage et la volonté pour Accomplir ce travail. A la suite Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos remerciements les plus chaleureux à notre encadreur Dr. Benmohammed Faycel et le co-encadreur Dr. Bouddou Riyadh, qui n'ont jamais épargné ni de leur temps ni de leur effort pour nous aider à la réalisation de ce projet,*

*Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance.*

*Et tous les professeurs du département de Science et de la technologie*

*Nous adressons aussi nos remerciements à la directrice du primaire Belghazali Mohammed qui nous a accueillie dans l'école pour la réalisation de ce travail, Sans oublier l'ingénieur d'électricité, nous les remercions également pour ses informations.*

*A tous ce qui furent à un moment ou à un autre et à tout instant partie prenante de ce travail. Nos plus chaleureux remerciements à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire.*



## *Dédicace*

*Au terme de ce très modeste travail, je tiens à exprimer Ma gratitude envers le très*

*Haut, Allah l'Exalté et les personnes qui m'ont soutenue Durant la réalisation de ce mémoire.*

*Je dédie ce travail*

*Premièrement à la source de ma vie le plus beau cadeau de mon dieu mes très chers parents pour leurs soutient et surtout la confiance qu'ils ont toujours eue en moi qui ont m'apprié comment patienter pour atteindre un tel objectif. Je remercie donc du fond du cœur mes parents qui m'ont permis de poursuivre mes études*

*Que dieu les garde et les Protège.*

*Je dédie ce travail également À Mes chers frères et Mes chères sœurs À mes neveux et ma nièce*

*A mes amis proche Nour Elhouda et Asma*

*Je dédie particulièrement ce mémoire à Nos encadreur Mr Benmohammed faycel et Mr Bouddou Riyadh Et à toute ma famille sans exception Toutes les personnes qui m'ont encouragé ou aidé Au long de mes études.*

*Noura Benabbas*



## *Dédicace :*

*Je dédie ce modeste travail avant tout à mes chers parents ma mère et mon père, qui ont toujours encouragé durant mes années d'étude.*

*A mes sœurs et mon frère Mohammed Yassine à qui je souhaite beaucoup de réussit dans leurs études.*

*A mes deux anges Ayat El Rahman, Douaa Tasnime et Mohammed et tout ma famille Benyahia.*

*A mes amies dans ce mémoire Nour El Houda et Noura et mes collagues d'études, sans oublier l'encadrement de Dr.Benmohammed .Faycel et Dr.Bouddou .Riyadh .*

*A tous ceux qui m'ont aidé dans l'élaboration de ce travail.*

*Benyahia Asma.*

# *Dédicace :*

*Je dédie cette mémoire à :*

*Mes parents :*

*A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que Allah te garde dans son vaste paradis, à toi mon père.*

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie, mon amour et mon bonheur ; maman que j'adore.*

*A mes frères et mes sœurs qui m'ont toujours aidé et encouragé, et toujours à mes côtés et à mon cœur, le poussin de la maison ; mon petit frère Anes et à toute ma famille (mes oncles et mes tantes.....)*

*A mes amies Noura et Asma , je vous souhaite le courage et le succès dans votre vie.*

*Ainsi qu'à mes encadreurs Dr. Benmohammed Faycel et Dr. Bouddou Riyadh qui m'ont aidé à avancer dans ma vie et mes professeurs et toutes les personnes que je connais de près ou de loin.*

*Je me souhaite un brillant avenir, Et être un cadre efficace et effectif dans mon pays, comme je vous souhaite le succès pour tous mes collègues, et merci.*

*#Chiha Nour ElHouda.*

*Designed by pngtree*

تقدم الأنظمة الكهروضوئية بديلاً واعداً، وخاصة في المناطق النائية، لإنتاج كمية صغيرة من الطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيل مواقع الشبكات البعيدة. ففي مختلف أنحاء العالم، هناك عدد من المجتمعات الصغيرة المنعزلة، مثل المواقع الصحراوية والقرى الريفية في الجزائر، والتي لا ترتبط بشبكة الكهرباء. فضلاً عن ذلك، ففي العديد من المواقع، وبسبب انعزالها وتكلفتها، من غير المرجح أن يتم إنشاء الارتباط بالخط الرئيسي على الإطلاق. ومع ذلك، لا تزال هناك حاجة إلى الطاقة الكهربائية. يشار إلى الأنظمة الكهربائية التي يمكنها توليد الكهرباء وإمدادها في هذه المواقع البعيدة باسم "اللامركزية، الاستقلال الذاتي". وتكنولوجيا توليد الطاقة المتجددة متاحة ويمكن الاعتماد عليها، حتى يعتمد انتشار التكنولوجيا أساساً على الجدوى الاقتصادية والتصميم المناسب للمكونات بغية تجنب الاخفاق وضمان نوعية العرض واستمراره. وقد تم تطوير عدة نماذج، ومحاكاة أنظمة اللوحات الكهروضوئية بأبعاد مختلفة باستخدام استراتيجيات تشغيل مختلفة. وتمثل هذه الذاكرة أبعداً مثالية لمولد ضوئي مزود بتخزين يوفر موقعاً معزولاً للشبكة، والذي يتألف بالتالي من اختيار عدد اللوحات الكهروضوئية في المجال الشمسي، ونظام تخزين مع نوع البطاريات من منظّم الشحن، والمحول (العاكس) إلخ... بعد تحديد البيانات الجغرافية وبيانات الأرصاد الجوية باستخدام برامج الأرصاد الجوية القياسية وكذلك بيانات استهلاك الحمل المعتمدة من هذا الموقع المعزول. يتم إجراء محاكاة التصميم باستخدام برنامج PVSYS.

**الكلمات الأساسية:** الأبعاد النظام الكهروضوئي (PV), بطارية التخزين, النظام الذاتي (معزول), محاكي PVSYS.

### Résumé :

*Les systèmes photovoltaïques (PV) peuvent offrir une alternative prometteuse, en particulier dans les régions isolées, pour la production d'une petite quantité nécessaire d'énergie électrique pour l'alimentation des sites éloigné de réseau électrique. Partout dans le monde, il existe un certain nombre de petites localités isolées, comme les sites sahariens et les villages ruraux en Algérie qui ne sont pas raccordés à un réseau électrique. De plus, dans de nombreux endroits, en raison de leur isolement et de leur coût, il est peu probable que le raccordement au réseau principal soit jamais établi. Cependant, le besoin d'énergie électrique existe toujours. Les systèmes électriques qui peuvent produire et fournir de l'électricité à ces endroits isolés sont appelés « décentralisés, autonomes ».*

*La technologie de production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables est disponible et fiable, de sorte que la pénétration de la technologie dépend principalement de la faisabilité économique et du dimensionnement approprié des composants afin d'éviter les pannes et d'assurer la qualité et la continuité de la fourniture. Plusieurs modèles ont été développés, simulant et dimensionnant des systèmes PV en utilisant différentes stratégies de fonctionnement.*

*Ce mémoire présent un dimensionnement optimal pour un générateur photovoltaïque avec stockage alimentant un site isolé de réseau électrique, ce qui a donc consisté à choisir le nombre des panneaux solaire de champ photovoltaïque, le système de stockage avec les batteries le type de régulateur de charge, convertisseur (onduleur), etc..., après la spécification des donnes*

*géographique et météorologique en utilisant logiciel Météo-norme et aussi le profil de consommation de la charge adoptée de ce site isolé. La simulation de dimensionnement est faite avec logiciel PVSYST.*

**Mots clés :** *Dimensionnement ; Système photovoltaïque (PV) ; Batterie de stockage ; Système autonome (isolé) ; PVSYST simulateur.*

**Abstract:**

*Photovoltaic (PV) systems can offer a promising alternative, particularly in remote areas, for the production of a small amount of electrical energy needed to power remote grid sites. All over the world, there are a number of small isolated localities, such as Saharan sites and rural villages in Algeria that are not connected to an electricity grid. Moreover, in many places, because of their isolation and cost, connection to the main grid is unlikely to ever be established. However, the need for electrical power still exists. Electrical systems that can generate and supply electricity to these isolated locations are called "decentralized, stand-alone".*

*The technology for generating electricity from renewable energy sources is available and reliable, so that the penetration of the technology depends mainly on economic feasibility and the appropriate sizing of the components. in order to avoid breakdowns and ensure quality and continuity of supply. Several models have been developed, simulating and dimensioning PV systems using different strategies of operation.*

*This memory provides an optimal dimensioning for a generator photovoltaic with storage supplying a site isolated from the power grid, thus to choose the number of photovoltaic field solar panels, the storage system with the batteries the type of charge regulator, inverter, etc., after the specification geographical and meteorological data using Meteo-norm software and also the profile consumption of the adopted load of this isolated site. The sizing simulation is made with PVSYST software.*

**Keywords:** *Sizing; Photovoltaic (PV) system; Storage battery; Stand-alone (isolated) system; PVSYST simulator.*

**Sommaire :****Remerciement****Dédicaces.****Résumé.****Liste des figures.****Liste des Tableaux.****Liste des abréviations.****Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques.**

<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
I.1. Introduction .....	<b>3</b>
I.2. Historique .....	<b>3</b>
I.3. Les notions générales sur les systèmes photovoltaïques .....	<b>4</b>
I.3.1. Définition de l'énergie solaire photovoltaïque .....	<b>4</b>
I.3.2. L'effet photovoltaïque .....	<b>4</b>
I.3.3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	<b>5</b>
I.3.3.1. Semi-conducteur .....	<b>5</b>
I.3.3.2. Dopage de silicium .....	<b>6</b>
I.3.3.3. Formation de jonction PN .....	<b>7</b>
I.4. Différents technologies .....	<b>8</b>
I.4.1. Cellules au silicium cristallin .....	<b>8</b>
I.4.1.1. Silicium monocristallin .....	<b>8</b>
I.4.1.2. Silicium polycristallin .....	<b>8</b>
I.4.2. Cellules au silicium amorphe (couche mince) .....	<b>9</b>
I.4.3. Cellule organique .....	<b>10</b>
I.5. Modélisation des cellules photovoltaïques .....	<b>11</b>
I.5.1. Modèle a une diode .....	<b>11</b>
I.5.2. Modèle a deux diodes .....	<b>11</b>
I.6. Caractéristique des modules photovoltaïques .....	<b>12</b>
I.6.1. Tension en circuit ouvert( $V_{OC}$ ) .....	<b>12</b>
I.6.2. Courant en court circuit( $I_{CC}$ ) .....	<b>13</b>
I.6.3. Puissance maximale( $P_{max}$ ) .....	<b>13</b>
I.6.4. Facteur de forme( $FF$ ) .....	<b>13</b>

---

I.6.5. Rendement .....	13
I.7. Assemblage des modules photovoltaïques .....	14
I.7.1. Assemblage en série .....	14
I.7.2. Assemblage en parallèle .....	14
I.7.3. Assemblage en série / parallèle .....	14
I.8. Différentes types des panneaux solaires .....	15
I.8.1. Panneaux solaires thermiques .....	15
I.8.2. Panneaux solaires photovoltaïques .....	15
I.9. Centrales photovoltaïques .....	16
I.10. Potentiel et programme de développement de l'énergie solaire en Algérie .....	16
I.11. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....	17
I.11.1. Avantages .....	17
I.11.2. Inconvénients .....	17
I.12. Conclusion .....	17
<b>Chapitre II : Régulateurs de charge et systèmes de stockage.</b>	
II.1. Introduction .....	18
II.2. Régulateur de charge .....	18
II.2.1. Définition de régulateur de charge .....	18
II.2.2. Principe de fonctionnement .....	18
II.2.3. Types de régulateurs de charge .....	19
II.2.3.1. Régulateur parallèle .....	19
II.2.3.2. Régulateur série .....	19
II.3. Types de convertisseurs .....	20
II.3.1. Convertisseur continu-alternative .....	20
II.3.2. Convertisseur continu-continu .....	20
II.3.3. Définition de MPPT et PWM .....	20
II.3.3.1. Régulateurs MPPT .....	20
II.3.3.2. Régulateurs MLI ( PWM) .....	20
II.4. Système de stockage d'énergie .....	21
II.4.1. Définition de stockage d'énergie .....	21
II.5. Différents types et formes de stockage d'énergie .....	22
II.5.1. Les batteries .....	22
II.5.1.1. Batteries au plomb-acide.....	24

II.5.1.2. Batteries au cadmium-Nickel .....	24
II.5.1.3. Batteries au Nickel-Zinc .....	24
II.5.1.4. Batteries au lithium .....	24
II.5.1.5. Caractéristique des principale technologie d’accumulateur .....	24
II.5.2. Pile à combustible .....	26
II.5.3. Stockage électrochimique .....	28
II.5.4. Stockage mécanique .....	29
II.5.5. Stockage par hydrogène .....	29
II.5.6. Super-condensateur .....	30
II.6. Conclusion .....	31
<b>Chapitre III : Dimensionnement et modélisation du système photovoltaïque autonome</b>	
III.1. Introduction .....	32
III.2. Différents types de système photovoltaïque .....	32
III.2.1. Système autonome .....	32
III.2.1.1. Systèmes autonomes sans stockage d’énergie (alimentation directe) .....	32
III.2.1.2. Systèmes autonomes avec stockage d’énergie.....	32
III.2.1.3. Systèmes autonomes hybrides .....	32
III.2.2. Système connectés au réseau .....	34
III.2.3. Système hybride .....	34
III.3. Dimensionnement d’un système photovoltaïque autonome .....	35
III.3.1. Définition de dimensionnement d’un système photovoltaïque .....	35
III.3.2. Types de dimensionnement .....	35
III.3.2.1. Dimensionnement de régulateur.....	35
III.3.2.2. Dimensionnement d’onduleur .....	35
III.3.2.3. Dimensionnement des batteries.....	35
III.4. Modélisation du système autonome .....	37
III.4.1. Composants du système photovoltaïque autonome .....	37
III.4.1.1. Modules solaires .....	37
III.4.1.2. Régulateur .....	37
III.4.1.3. Batterie de stockage .....	37
III.4.1.4. Onduleur .....	37
III.4.1.5. Charges (utilisateurs) .....	37
III.4.2. Méthode de dimensionnement d’un système autonome .....	39

III.4.2.1. Méthode de la probabilité d'erreur dans la consommation .....	39
III.4.2.2. Méthode du mois le plus défavorable .....	39
III.4.2.3. Méthode de la moyenne annuelle .....	39
III.4.2.4. Méthode LPSP .....	39
III.4.2.5. Méthode des heures équivalentes .....	39
III.4.2.6. Méthode itérative .....	40
III.4.2.7. Méthode utilisabilité solaire .....	40
III.4.2.8. Méthode simplifiée .....	40
<b>III.5. Avantages et inconvénients d'un système photovoltaïque autonome .....</b>	<b>41</b>
III.5.1. Avantages .....	41
III.5.2. Inconvénients .....	42
<b>III.6. Conclusion .....</b>	<b>42</b>
 <b>Chapitre IV : Simulation et interprétation des résultats.</b> 	
<b>IV.I. Introduction .....</b>	<b>43</b>
<b>IV.2. Etude sur le site isolé choisit .....</b>	<b>43</b>
IV.2.1. Localisation du site .....	43
IV.2.2. L'orientation des modules photovoltaïques .....	45
<b>Partie I : Présentation de logiciel PVSYS .....</b>	<b>46</b>
IV.I.1. Organigramme de logiciel PVSYS .....	46
IV.I.2. Présentation de projet .....	46
IV.I.2.3. Données géographique .....	48
IV.I.2.2. Coordonnée géographique .....	48
IV.I.2.3. Données météorologiques .....	48
IV.I.3. Conception du projet .....	48
IV.I.3.1. Etapes pour une conception du projet (isole avec batteries) .....	48
<b>Partie II : Résultats et discussions de la simulation .....</b>	<b>53</b>
IV.II.1. Paramètres du système (Isolé avec batteries) .....	53
IV.II.1.2. Caractéristiques du champ de capteurs .....	54
IV.II.1.2. Caractéristiques du Batterie .....	54
IV.II.2. Profil de charge .....	54
IV.II.3. Performance ratio .....	54
IV.II.4. Les productions normalisées .....	55
IV.II.5. Bilan énergétique .....	56

## Sommaire

---

IV.II.6. Diagramme des pertes sur l'année entière .....	56
IV.II.7. Evaluation technico-économique .....	56
IV.3. Conclusion .....	57
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>58</b>
<b>Annexes</b>	
<b>Bibliographie</b>	

Liste des figures :

**Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques.**

**Figure I.1 :** Coupe transversale d'une cellule PV typique .....5

**Figure I.2 :** Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....5

**Figure I.3 :** Forme quatre liaisons covalentes avec un atome voisin .....6

**Figure I.4 :** Dopage de type N .....6

**Figure I.5 :** Dopage de type P .....7

**Figure I.6 :** Génération de la paire électron-trou .....7

**Figure I.7 :** La jonction PN .....8

**Figure I.8 :** Silicium Monocristallin .....8

**Figure I.9 :** Silicium Polycristalline .....9

**Figure I.10 :** Cellule au silicium amorphe .....9

**Figure I.11 :** Schéma d'une cellule solaire organique .....10

**Figure I.12 :** Modèle a une diode .....11

**Figure I.13 :** Circuit électrique équivalent à double diode de la cellule solaire .....11

**Figure I.14 :** Assemblage de cellules en série .....14

**Figure I.15 :** Assemblage de cellules en parallèle .....14

**Figure I.16 :** Assemblage série parallèle des cellules PV .....14

**Figure I.17 :** Energie solaire thermique .....15

**Figure I.18 :** Carte representant l'irradiation globale journalière en Algérie .....16

**Chapitre II : Régulateurs de charge et systèmes de stockage.**

**Figure II.1 :** Schéma de principe d'un régulateur de charge parallèle .....19

**Figure II.2 :** Schéma de principe d'un régulateur de charge série .....19

**Figure II.3 :** Rôle de l'onduleur .....20

**Figure II.4 :** Principe de la régulation MLI .....21

**Figure II.5 :** Schéma énergétique .....22

**Figure II.6 :** Cellule électrochimique de base Schéma de principe d'un régulateur de charge série .....22

**Figure II.7 :** Les différents composants d'un accumulateur au plomb .....23

**Figure II.8 :** Batteries au cadmium-Nickel .....24

**Figure II.9 :** Batteries au Nickel-Zinc .....25

<b>Figure II.10 : Accumulateur lithium</b>	<b>195</b>
<b>Figure II.11 : Schéma d'une cellule Li-ion</b>	<b>25</b>
<b>Figure II.12 : Schéma de principe d'une pile à combustible</b>	<b>26</b>
<b>Figure II.13 : Représentation schématique d'une cellule de pile à combustible</b>	<b>27</b>
<b>Figure II.14 : Principe d'un accumulateur électrochimique</b>	<b>29</b>
<b>Figure II.15 : Différentes possibilités de restitution de l'électricité à partir de l'hydrogène stocké...</b>	<b>30</b>
<b>Figure II.16 : Structure d'un super condensateur</b>	<b>30</b>
<b>Chapitre III : dimensionnement et modélisation du système photovoltaïque autonome.</b>	
<b>Figure III.1 : Système autonome</b>	<b>33</b>
<b>Figure III.2 : Système autonome avec stockage</b>	<b>33</b>
<b>Figure III.3 : Principe d'un système autonome hybride</b>	<b>34</b>
<b>Figure III.4 : Structure d'un système PV connecté au réseau</b>	<b>34</b>
<b>Figure III.5 : Exemple d'un système hybride</b>	<b>35</b>
<b>Figure III.6 : Exemple de Connexion des batteries (série-parallèle)</b>	<b>37</b>
<b>Figure I.1 : Coupe transversale d'une cellule PV typique. [9]</b>	
<b>Chapitre IV : Simulation et interprétation des résultats.</b>	
<b>Figure IV.1 : Site de primaire de Belghazali Mohamed</b>	<b>43</b>
<b>Figure IV.2 : Définition de l'orientation et de l'inclinaison d'un panneau</b>	<b>45</b>
<b>Figure IV.3 : Présentation de logiciel PVSYS</b>	<b>46</b>
<b>Figure IV.4 : Coordonnée géographique d'école primaire Belghazali Mohammed -Naama-</b>	<b>47</b>
<b>Figure IV.5 : Paramètres climatique d'école primaire Belghazali Mohammed –Naama-(CDER-DATA2020)</b>	<b>48</b>
<b>Figure IV.6 : Conception du projet</b>	<b>48</b>
<b>Figure IV.7 : Angle d'orientation</b>	<b>49</b>
<b>Figure IV.8 : Horizon d'école primaire Belghazali Mohammed –Naama-</b>	<b>50</b>
<b>Figure IV.9 : La consommation</b>	<b>51</b>
<b>Figure IV.10 : Le profile de charge et le temps d'utilisation</b>	<b>51</b>
<b>Figure IV.11 : Dimensionnement du champ PV</b>	<b>52</b>
<b>Figure IV.12 : Dimensionnement des batteries</b>	<b>52</b>
<b>Figure IV.13 : Schéma simplifié d'une centrale PV raccordé à la batterie(PVSYST)</b>	<b>53</b>
<b>Figure IV.14 : Profil de charge</b>	<b>54</b>

<b>Figure IV.15</b> : Indice de performance .....	<b>55</b>
<b>Figure IV.16</b> : Les productions normalisées .....	<b>55</b>

**Liste des tableaux :**

**Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques.**

**Tableau I.1 :** les principaux avantages et inconvénients de différentes catégories des cellules.....10

**Chapitre II : Régulateurs de charge et systèmes de stockage.**

**Tableau II.1 :** les principales technologies d'accumulateur .....26

**Tableau II.2 :** Caractéristique des types des piles à combustible .....28

**Chapitre IV : Simulation et interprétation des résultats.**

**Tableau IV.1 :** Caractéristique des équipements d'école .....44

**Tableau IV.2 :** Tableau des données géographique du site d'école primaire Belghazali Mohammed  
–Naama-Error! Bookmark not defined.....46

**Tableau IV.3 :** Caractéristique. du champ de capteurs .....53

**Tableau IV.4 :** Bilan énergétique .....56

**Tableau IV.5 :** Les pertes de la production de système PV .....56

**Tableau IV.6 :** Evaluation étude technico-économique du système PV autonome .....57

Liste des abréviations :

<i>Symboles</i>	<i>Définitions</i>	<i>Unités</i>
<b>R<sub>p</sub></b>	La résistance modélisant les courants de fuites de la jonction.	[Ω]
<b>I<sub>0</sub></b>	Courant de saturation inverse de la diode.	[A]
<b>V<sub>T</sub></b>	Potentielle thermodynamique de la diode.	[V]
<b>I<sub>d1</sub></b>	Le courant de saturation de la première diode.	[A]
<b>I<sub>d2</sub></b>	Le courant de saturation de la deuxième diode.	[A]
<b>I<sub>01</sub></b>	Le courant de saturation de la première diode D <sub>1</sub> .	[A]
<b>I<sub>02</sub></b>	Le courant de saturation de la seconde diode D <sub>2</sub> .	[A]
<b>V<sub>t1</sub></b>	La tension thermique de la diode D <sub>1</sub> .	[V]
<b>V<sub>t2</sub></b>	La tension thermique de la diode D <sub>2</sub> .	[V]
<b>P<sub>max</sub></b>	Puissance maximum délivrée par la cellule.	[W]
<b>V<sub>max</sub></b>	Tension correspondant au maximum de la puissance.	[V]
<b>I<sub>max</sub></b>	Courant correspondant au maximum de la puissance	[A]
<b>P<sub>in</sub></b>	Puissance incidente.	[W]
<b>I<sub>e</sub></b>	Le courant de charge maximal (courant d'entrée).	[A]
<b>I<sub>s</sub></b>	L'intensité du courant de sortie du régulateur.	[A]
<b>P</b>	Puissance totale des récepteurs.	[W]
<b>C<sub>T</sub></b>	La capacité totale de banc de batteries nécessaires.	[Ah]
<b>C<sub>n</sub></b>	La capacité nominale d'une unité de batterie.	[Ah]
<b>V<sub>n</sub></b>	La tension du système DC.	[V]
<b>V<sub>bat</sub></b>	La tension de la batterie.	[V]
<b>P<sub>j</sub></b>	Puissance journalière d'un équipement.	[W]
<b>E<sub>cj</sub></b>	Consommation journalière.	[Wh/j]

## Liste des abréviations

<b><math>P_{ppv}</math></b>	Production journalière.	[W]
<b><math>P_g</math></b>	Puissance globale.	[W]
<b><math>P_{batt}</math></b>	Puissance de batterie.	[W]
<b><math>E_j</math></b>	Energie journalière.	[Wh/j]
<b><math>t_j</math></b>	Temps de fonctionnement.	[H]

# Introduction générale

### Introduction générale :

Le regain actuel d'intérêt pour les énergies renouvelables est dû sans aucun doute à la prise de conscience mondiale qui débouche sur la nécessité de revoir les politiques énergétiques, à la fois pour lutter contre les émissions de CO<sub>2</sub> et pour prévenir une pénurie majeure d'énergie classique.

Alors de nombreuses énergies non polluantes, ou renouvelables, ou abondantes partout à la surface du globe pourraient être utilisées par l'homme tel que l'énergie éolienne, l'énergie nucléaire, l'énergie hydroélectrique et l'énergie solaire qui sont des énergies à ressource illimitée qui regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie solaire qui est donc une possibilité de développement efficace et durable tant que le soleil brille encore, c'est pour cela que les recherches scientifiques se développent dans le sens de généraliser, améliorer et optimiser l'exploitation des systèmes solaires.

L'optimisation des systèmes solaires est basée sur des critères de dimensionnement et de maximisation de la puissance générée pour avoir un bon rendement.

L'exploitation directe de l'énergie solaire relève une technologie bien distincte c'est de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire photovoltaïque.

Elle provient de la transformation directe d'une partie de rayonnement solaire en énergie électrique, cette conversion d'énergie s'exécute par le biais d'une cellule dite cellule photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée au soleil. La tension générée par une cellule (PV) peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule.

L'association de plusieurs cellules (PV) en séries/parallèles donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV), qui a une caractéristique courant-tension non linéaire présentant un point de puissance maximale, dépendant de niveau d'éclairement et de la température, ainsi que de vieillissement de l'ensemble de composants.

Bien que la cellule photovoltaïque soit connue depuis de nombreuses années comme source pouvant produire de l'énergie électrique allant de quelques milliwatts au mégawatt, cette technologie reste encore sous le débat notamment à cause de rendement de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique qui est encore faible.

Les systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau.

Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes ont les possibilités de couplage direct à une charge adaptée ou couplage avec adaptateur d'impédance MPPT (Maximum Power Point Tracking), fonctionnement au fil du soleil ou avec stockage d'énergie électrique.

Dans notre travail, nous proposons l'étude du dimensionnement d'un système solaire photovoltaïque pour l'approvisionnement en énergie électrique d'une école primaire située dans Naama.

Ce travail est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré aux installations solaires photovoltaïques. Nous présentons tout d'abord, des généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque et ainsi que les systèmes PV qui sont actuellement établis dans la pratique.

Le deuxième chapitre, nous présentons régulateurs de charge et systèmes de stockage.

Dans le troisième chapitre, nous nous intéressons au dimensionnement et de conception de l'installation photovoltaïque pour l'approvisionnement en énergie électrique d'une école primaire située au Naama, à savoir les différents éléments constituant le système PV (module, batterie, régulateur, onduleur...).

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude par simulation de notre système : nous présentons le logiciel que nous avons utilisé **PVSYST**, ensuite, nous présentons les résultats obtenus de l'installation PV, pour statuer sur la rentabilité économique de l'installation solaire photovoltaïque.

# Chapitre I

**I.1. Introduction :**

L'énergie renouvelable est l'énergie produite à partir de ressources naturelles. Les flux d'énergie renouvelable impliquent des phénomènes naturels tels que la lumière du soleil, le vent, les marées et la chaleur géothermique [1]. L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant des photons, comprise dans le rayonnement solaire, en énergie électrique, par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible (nommés cellules photovoltaïques), [2] les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. [3] Un générateur photovoltaïque est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel, ces modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. [4]

Ce chapitre est consacré à des notions générale sur l'énergie solaire photovoltaïques, ainsi que le fonctionnement physique d'une cellule photovoltaïque avec les différentes technologies des cellules photovoltaïques et leurs regroupements (séries ou parallèles), les différentes caractéristiques des modules photovoltaïques aussi le potentielle de l'énergie photovoltaïque en Algérie et le programme nationale de développement de cette énergie.

**I.2. Historique :**

En 1839 le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide, nommé l'effet photovoltaïque, après en 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs, mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire. Albert Einstein découvre en 1905 que la lumière pouvait entrer à l'intérieur des atomes, et que la collision entre les photons et les atomes pouvait faire sortir des électrons de leurs orbites et permettre la création d'un courant électrique, il était le premier qui a expliqué le phénomène d'effet photovoltaïque et reçoit le prix Nobel de physique en 1921 pour cette explication. En 1954 trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites, après ça en 1958 une cellule avec un rendement de 9% est mise au point, les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace. La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware aux États-Unis, ainsi La première voiture

alimentée par l'énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km a été inventé à Australie en 1983. [5]

En 1985, les cellules à base de Si donnent un rendement > 20% sous le rayonnement solaire, puis des rendements > 30 % avec des cellules à concentration multi jonctions à base de GaInP/GaAs (NREL, USA) en 1994.

Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne en 1995, après une année les cellules solaires hybrides à colorants atteignent un rendement de 11% (EPFL, Switzer land). Ensuite les cellules couches minces Cu(InGa) Se2 atteignent un rendement de 19% (NREL, US) en 1998.

Le photovoltaïque installé mondial cumulatif atteint 2000 MW 2007 Cellules solaires organiques en structure tandem avec un rendement de 6,5 % (UCSB, USA) en 2002, après ça en 2008 un rendement homologué de 5,9% sur une surface active de 2 cm<sup>2</sup> obtenu par Heliatek, BASF et l'institut de photovoltaïque appliquée (IAPP) de l'université technique de Dresde (Allemagne). [6]

### **I.3. Les notions générales sur les systèmes photovoltaïques :**

#### **I.3.1. Définition de l'énergie solaire photovoltaïque :**

Le mot « Photovoltaïque » est la combinaison de deux mots « photo », mot d'origine grecque qui signifie lumière et « voltaïque », qui vient de « volt » et représente l'unité utilisée pour mesurer le potentiel électrique. [5] Le photovoltaïque est la technologie qui génère du courant électrique continu (CC) mesuré à partir de semi-conducteurs quand ils sont éclairés par des photons solaire. [7]

#### **I.3.2. L'effet photovoltaïque :**

La photopile, qu'on appelle aussi cellule solaire ou photovoltaïque, est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs, on peut la représenter comme une diode plate qui est sensible à la lumière.

La cellule photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique, une cellule comporte deux parties qui sont dopées différemment, couche N présente un excès d'électrons périphériques et la couche P présente un déficit d'électrons périphériques, les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel comme le montre la figure (I.1). [8]

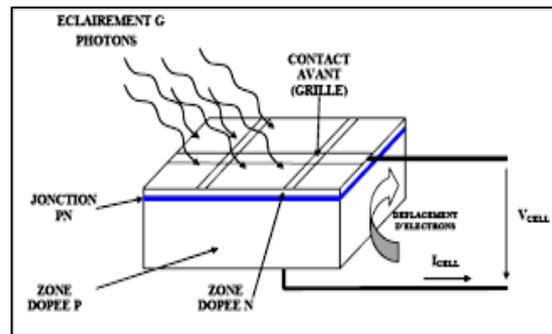


Figure I.1 : Coupe transversale d'une cellule PV typique. [9]

### I.3.3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

La conversion photovoltaïque, aujourd'hui largement utilisée, peut-être simplement définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière. Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière, ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein de la matière et se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique. Généralement, la paire électron-trou revient rapidement à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique. [10]

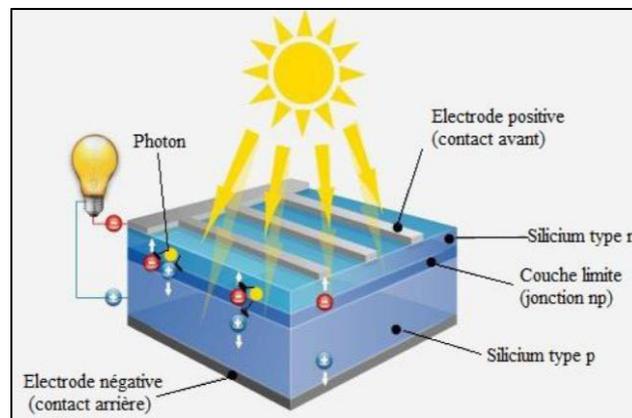


Figure I.2 : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. [11]

#### I.3.3.1. Semi-conducteur :

Les matériaux semi-conducteurs sont des isolants au zéro absolu et conducteurs de façon limitée de l'électricité à température ambiante. Ils peuvent être dopés grâce à des impuretés pour altérer leurs propriétés électriques. Les matériaux semi-conducteurs les plus communs sont des solides inorganiques cristallins qui peuvent être classés suivant les groupes des atomes qui les composent. [12]

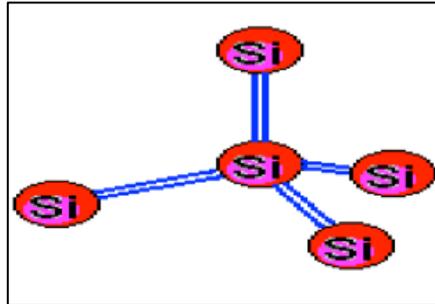


Figure I.3 : Forme quatre liaisons covalentes avec un atome voisin. [13]

### I.3.3.2. Dopage de silicium :

Dans le cas du silicium, l'énergie solaire peut permettre de le rendre conducteur par agitation thermique, cependant, les atomes de silicium se lient entre eux dans un réseau cristallin pour entrer dans un état stable, qui le rendent moins conducteur. En effet, comme l'atome a quatre électrons sur sa couche externe, il les met en commun avec les électrons des atomes voisins. [14]

#### ❖ Dopage de type N :

Il consiste à introduire dans la matrice de (Si) des atomes d'impuretés pentavalentes tels que le phosphore (P), qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire (charge négative) libre de se mouvoir dans le cristal, le matériau est donc potentiellement « donneur » d'électrons disponibles pour la conduction. Les principaux atomes d'impuretés sont : [15]

- L'Arsenic (As)
- Le phosphore (P)
- Le bismuth (Bi)
- L'antimoine (Sb)

La figure suivante montre le dopage de type N :

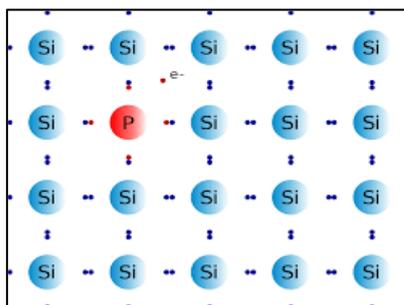


Figure I.4 : dopage de type N. [14]

#### ❖ Dopage de type P :

Il consiste d'utiliser des atomes dont l'insertion dans le réseau cristallin donnera un trou excédentaire, le bore (B) est le dopant de type P le plus couramment utilisé pour le silicium. Lorsque l'on effectue deux dopages différents (type N et type P), il en résulte après recombinaison

des charges libres (électrons et trous) un champ électrique constant créé par la présence d'ions fixes positifs et négatifs. Les charges électriques générées par l'absorption du rayonnement pourront contribuer au courant de la cellule photovoltaïque comme le montre la figure (I.5). [14]

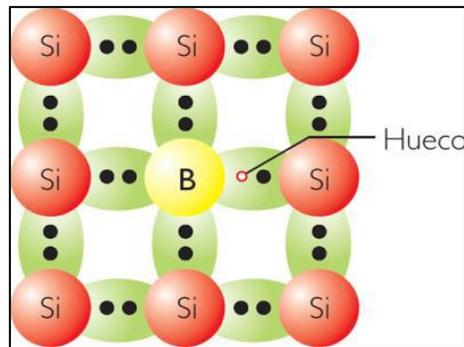


Figure I.5 : dopage de type P.

**I.3.3.3. Formation de la jonction PN :**

Le silicium, comme tous les semi-conducteurs, a une bande de valence pleine et une bande de conduction vide, mais grâce à un apport énergétique suffisant, il est possible de faire passer des électrons de la bande de valence (BV) à la bande de conduction (BC), d'où la génération d'électrons libres, la figure (I.6) montre la génération de la paire électron-trou. [16]

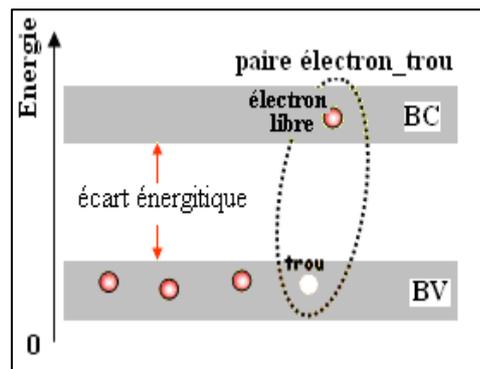


Figure I.6 : génération de la paire électron-trou.

La présence d'électrons libres dans la bande de conduction d'un matériau n'est pas suffisante pour générer un courant. Il est nécessaire de créer une différence de potentiel aux bornes du photogénérateur afin d'entraîner les charges positives d'un côté et les charges négatives de l'autre (Figure I.7). Cette opération est possible par l'assemblage de deux barreaux de silicium, un de type N dopé en électrons de concentration de l'ordre de  $10^{17} \text{cm}^{-3}$  et l'autre de type P dopé en trous (environ  $10^3 \text{cm}^{-3}$ ). La mise en contact des deux couches à dopages opposés dans un semi-conducteur en y ajoutant des contacts métalliques constitue un élément connu la diode. [13]

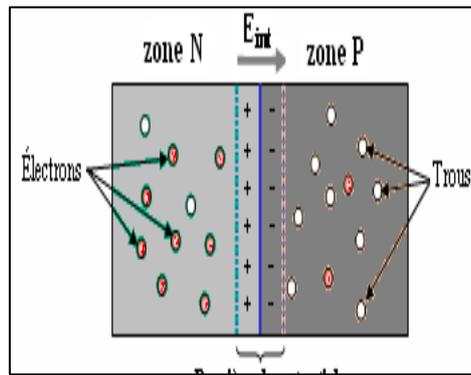


Figure I.7 : la jonction PN.

## I.4. Différents technologies :

### I.4.1. Cellules au silicium cristallin :

#### I.4.1.1. Silicium monocristallin :

Ce sont des cellules qui ont le meilleur rendement mais aussi celle qui ont le coût le plus élevé (figure I.8), du fait d'une fabrication compliquée. [17]



Figure I.8 : Silicium monocristallin.

#### I.4.1.2. Silicium poly cristalline :

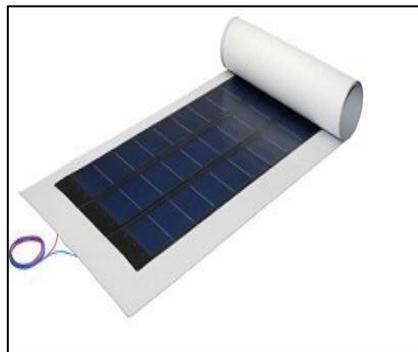
Le silicium multicristallin (poly cristallin) est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée (figure I.9), elle représente près de 50% du marché. Ces cellules sont obtenues par couplage de cristaux de silicium, ce qui rend sa structure hétérogène, son rendement est légèrement inférieur au silicium 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 réduits. [18]



**Figure I.9 :** Silicium polycristalline.

#### **I.4.2. Cellules au silicium amorphe (couche mince) :**

Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé (figure I.10), elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres. [17]



**Figure I.10 :** Cellule au silicium amorphe.

Tableau I.1 : Les principaux avantages et inconvénients de différentes catégories des cellules. [19]

Matériau de cellule	Avantages	Inconvénients	Utilisations
<b>Monocristallin</b>	-Très bon rendement, Le plus retrouvé sur le marché mondial.	-Coût élevé. -Sensible à la température élevée.	Aérospatiale, modules pour toits, façades.
<b>Polycristalline</b>	-Bon rendement de conversion, environ 100 w/m <sup>2</sup> , Lingot moins cher à produire, Le moins sensible à la température élevée, Adapté à la production à grande échelle.	-Rendement faible sous un faible éclairement. -Rendement faible en plein soleil.	Dans les zones chaudes pour toits, façades et générateurs . Appareils électroniques pour
<b>Amorphe</b>	-Très faibles épaisseurs. -Fonctionne avec un faible éclairement et sous ombrage Partiel. -Moins sensible aux températures élevées.	-Dégradation sous lumière (instabilité dite de Staebler-Wronski).	l'intégration dans le bâtiment.

**I.4.3. Cellule organique :**

Une cellule photovoltaïque organique est constituée d'une couche photosensible organique (formée des matériaux de type A et D), prise en sandwich entre deux électrodes, dont l'une d'elle doit être transparente afin de permettre le passage des photons dans la couche active. Lors de l'absorption de la lumière par la couche active, des porteurs de charges sont générés puis transportés au sein de la couche et collectés au niveau des électrodes, de cette façon, une cellule photovoltaïque organique convertit la lumière en électricité (figure I.11). [20]

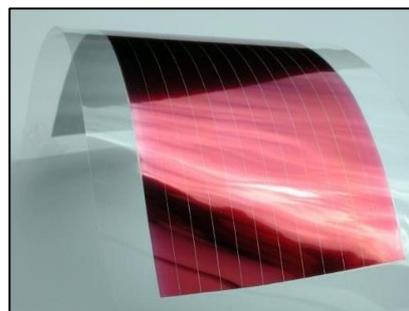


Figure I.11 : Schéma d'une cellule solaire organique. [21]

**I.5. Modélisation des cellules photovoltaïques :**

**I.5.1. Modèle a une diode :**

Ce modèle est désigné aussi par (Rp-Model). Ce model tient compte non seulement des pertes en tension exprimée par la résistance série (Rs) mais aussi des fuites de courants exprimées par une résistance parallèle (Rp).

C'est le modèle sur lequel s'appuient les constructeurs en donnant les caractéristiques techniques de leurs cellules solaires (Data Sheets), il est aussi considéré satisfaisant et même une référence pour les constructeurs pour cataloguer typiquement les modules solaires. [22]

La figure suivante montre le modèle a une diode :

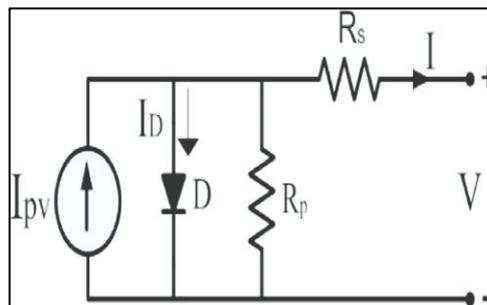


Figure I.12: Modèle a une diode.

L'équation du courant délivré par la cellule photovoltaïque est décrite comme suit :

$$I = I_{pv} - I_0 \left( \exp \left( \frac{V+IR_s}{A V_T} \right) - 1 \right) - \left( \frac{V+IR_s}{R_p} \right) \tag{I.1}$$

**R<sub>p</sub>** : La résistance modélisant les courants de fuites de la jonction

**I<sub>0</sub>** : courant de saturation inverse de la diode.

**V<sub>T</sub>** : potentielle thermodynamique de la diode.

**A** : le facteur d'idéalité de la jonction de la diode.

**I.5.2. Modèle a deux diodes :**

Le comportement réel de la cellule solaire PV est maintenant modélisé par un circuit électrique qui contient double diode D1 et D2 tel que ceci est représenté dans le schéma de la figure(I-13) ci-dessous :

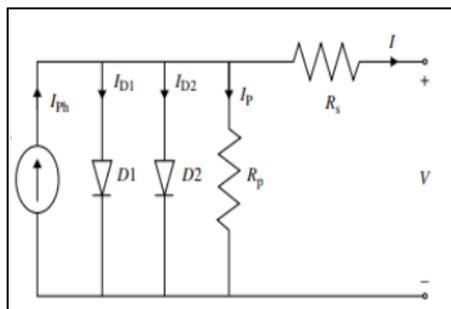


Figure I.13 : Circuit équivalent à double diode de la cellule solaire.

Le modèle à une seule diode offre un comportement satisfaisant dans des conditions de fonctionnement normales mais offre souvent un comportement dégradé sous faible rayonnement solaire. Cependant, certains chercheurs ont exprimé l'effet des pertes de recombinaison des porteurs de charge dans la région d'appauvrissement par une diode supplémentaire. Ce modèle est appelé modèle PV à double diode. [23]

Le courant de sortie de la cellule solaire est décrit par l'équation ci-dessous :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_p \quad (I.2)$$

Où  $I_{d1}$  et  $I_{d2}$  sont les courants de saturation de la première et de la deuxième diode respectivement. Le courant prédit par le circuit présenté par la figure I-13 peut être exprimé comme suit :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_{01} \left( -1 + \exp \left( \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{A_1 V_{t1}} \right) \right) - I_{02} \left( -1 + \exp \left( \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{A_2 V_{t2}} \right) \right) - \left( \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_p} \right) \quad (I.3)$$

$I_{01}$  : représente le courant de saturation de la première diode  $D_1$ .

$I_{02}$  : représente le courant de saturation de la seconde diode  $D_2$ .

$A_1$  et  $A_2$  : représentent respectivement, les facteurs d'idéalité de deux diodes  $D_1$  et  $D_2$ .

$V_{t1}$  et  $V_{t2}$  représentent, respectivement, les tensions thermiques des deux diodes  $D_1$  et  $D_2$ .

Ces tensions peuvent être définies par :

$$V_t = V_{t1} = V_{t2} = N_s \cdot \frac{K \cdot T}{q} \quad (I.4)$$

Le courant de saturation inverse de l'une des diodes ( $I_0 = I_{01} = I_{02}$ ) peut être trouvé en utilisant l'équation ci-après :

$$I_0 = I_{rs} \left( \frac{T}{T_n} \right)^{\frac{3}{A}} \cdot \exp \left( \frac{q \cdot E_g}{A \cdot K} \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad (I.5)$$

Le courant  $I_{rs}$  est défini par :

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{-1 + p \left( \frac{V_{oc}}{A \cdot V_t} \right)} \quad (I.6)$$

## **I.6. Caractéristique des modules photovoltaïques :**

### **I.6.1. Tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) :**

C'est la tension  $V_{co}$  pour laquelle le courant débité par le générateur PV est nul (la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur PV). Son expression est déduite de l'équation suivante :

$$0 = I_{ph} - I_{sat} \cdot \left[ \exp \left( \frac{V_{co}}{V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_{co}}{R_p} \quad (I.7)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = \frac{n.k.T}{q} . \ln. \left( \frac{I_{cc} + I_{sat}(T)}{I_{sat}(T)} \right) = V_t . \ln. \left( 1 + \frac{I_{cc}}{I_{sat}(T)} \right) \quad (I.8)$$

Pour une photopile en silicium, la tension du circuit ouvert est de 0.55 à 0.6V.  $V_{co}$ . [24]

### I.6.2. Courant en court circuit( $I_{CC}$ ) :

Le courant de court-circuit défini le courant fourni par la cellule solaire à un circuit de résistance nulle (fil métallique par exemple). A partir de l'expression générale du courant, le courant de court-circuit s'écrit pour  $V=0$ . [25]

$$I_{cc} = \frac{R_p}{R_s + R_p} \left( I_s \left( \exp \left( -\frac{qIR_s}{nKT} \right) - 1 \right) - I_{ph} \right) \quad (I.9)$$

### I.6.3. Puissance maximale( $P_{max}$ ) :

La puissance utile maximale( $P_m = V_m \times I_m$ ), s'obtient en optimisant le produit courant tension, soit : [24]

$$\frac{I_m}{V_m} = - \left( \frac{dI_{pv}}{dV} \right)_M \quad (I.10)$$

### I.6.4. Facteur de forme(FF) :

La notation FF vient de fill factor (facteur de remplissage). Il s'agit d'un rapport qui rend compte de la qualité de la forme de la caractéristique courant-tension. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co}I_{cc}} \text{ avec } P_{max} = V_{max}I_{max} \quad (I.11)$$

$P_{max}$  : puissance maximum délivrée par la cellule (W).

$V_{max}$  : tension correspondant au maximum de la puissance (V).

$I_{max}$  : courant correspondant au maximum de la puissance (A).

Il représente donc l'écart entre la cellule réelle et une cellule pour laquelle  $R_s=0$  et  $R_p=\infty$  (cellule idéale), plus il est proche de 1, plus la cellule est proche de l'idéale. Le facteur de forme théorique est compris entre 0,25 et 1. [25]

### I.6.5. Rendement :

Le rendement des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{in}$ .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \times V_{co} \times I_{cc}}{P_{in}} \quad (I.12)$$

$P_{max}$  : puissance délivrée par la cellule(W).

$P_{in}$  : puissance incidente(W).

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert. [26]

**I.7. Assemblage des modules photovoltaïques :**

**I.7.1. Assemblage en série :**

Lorsque l'on associe  $N_s$  cellules PV en série, les tensions de ces cellules s'additionnent et le courant généré est le même dans toute la branche. La caractéristique I-V résultante de l'assemblage de la figure.I-14 est obtenue en multipliant point par point et pour un même courant, la tension individuelle  $V_i$  par  $N_s$ . On note aussi que l'impédance optimale de l'assemblage sera  $N_s$  fois plus grande que celle de la cellule de base. [27]

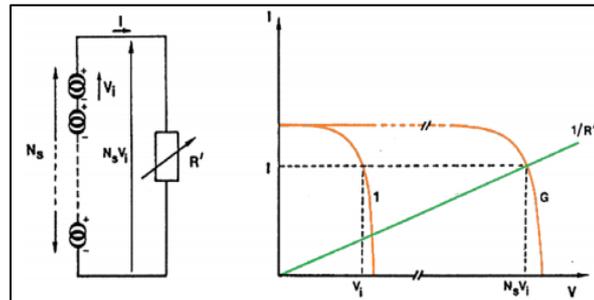


Figure I.14 : Assemblage de cellules en série.

**I.7.2. Assemblage en parallèle :**

Pour augmenter le courant fourni à une charge on connecte les cellules en parallèle. La figure I.15 présente la courbe I(V) d'un groupement de  $N_p$  cellules en parallèle. On ne monte que des cellules ayons la même tension de fonctionnement, les courants s'ajoutent, la nouvelle courbe est obtenue en multipliant point par point et pour chaque valeur de tension, le courant  $I_i$  de la cellule élémentaire par  $N_p$ . [28]

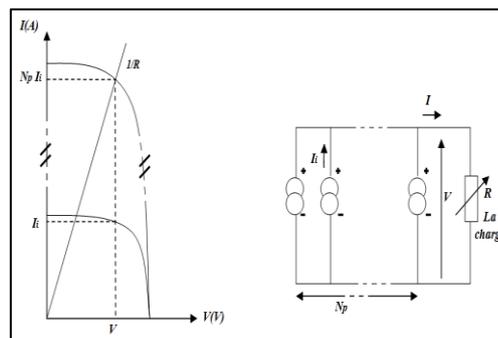


Figure I.15 : Assemblage de cellules en parallèle.

**I.7.3. Assemblage en série / parallèle :**

La puissance des modules disponibles sur le marché étant limitée d'où l'assemblage des cellules ou modules photovoltaïques en série – parallèle pour obtenir des caractéristiques {courant-tension} exploitables pour certaines applications : éclairage, pompage, ...

Nous ne pouvons associer que des cellules identiques pour obtenir un module fiable, et des modules identiques pour obtenir un champ photovoltaïque stable. Comme nous le montre la figure I.16. [29]

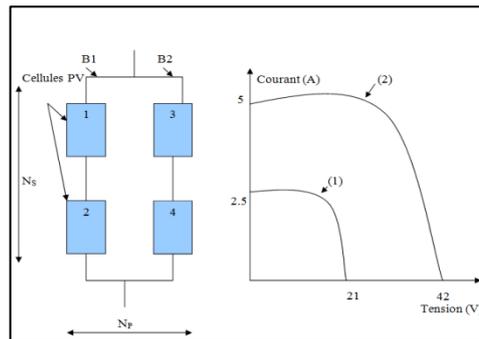


Figure I.16 : Assemblage série parallèle des cellules PV.

## I.8. Différentes types des panneaux solaires :

### I.8.1. Panneaux solaires thermiques :

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, (figure I-17). 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). [30]

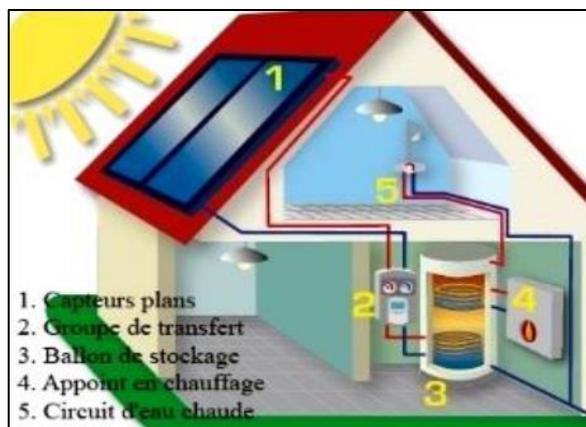


Figure I.17 : Energie solaire thermique. [31]

### I.8.2. Panneaux solaires photovoltaïques :

La conversion directe du rayonnement lumineux en électricité par des capteurs (cellule photovoltaïque), c'est le solaire photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques composés de cellules à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. La technique photovoltaïque est en très forte croissance, en 2001 on comptait en Europe environ 250 MW installés et en 2003 ce chiffre est monté à 560 MW. La production d'électricité par générateur

photovoltaïque est liée à l'intensité, la durée de l'ensoleillement et à l'orientation du panneau par rapport au soleil. [32]

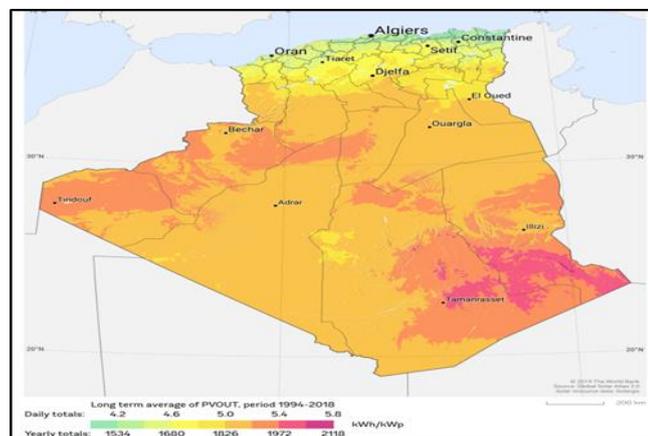
### **I.9. Centrales photovoltaïques :**

Une centrale solaire photovoltaïque est formée par un ensemble de panneaux solaires photovoltaïques, à base de silicium, reliés entre eux en série ou en parallèle, et branchés sur un ou plusieurs onduleurs. Ces derniers sont utilisés pour transformer le courant continu basse tension en courant alternatif haute tension, utilisable directement par les appareils classiques. La quantité d'énergie obtenue dépend toutefois de plusieurs facteurs, à savoir, la surface des modules utilisées ainsi que leur rendement et de l'ensoleillement qui varie selon la latitude, la saison et la météo par exemple. [11]

### **I.10. Potentiel et programme de développement de l'énergie solaire en Algérie :**

L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation du territoire national dépasse 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/ m<sup>2</sup> /an. [15]

La figure suivante montre une carte représentant l'irradiation globale journalière en Algérie :



**Figure I.18 :** Carte représentant l'irradiation globale journalière en Algérie.

Source : solargis 2019

L'Algérie vise la mise en service de près de 22.000MW en énergie verte à l'horizon 2035-2040 et compte lancer prochainement un appel d'offres aux investisseurs pour la réalisation d'un méga projet de centrales solaires photovoltaïques de 4.050MW. Le projet sera scindé en trois lots de 1.350 MW chacun et adossé à la construction d'une ou plusieurs usines de fabrication d'équipements et composants de centrales solaires photovoltaïques.

La puissance installée d'énergie photovoltaïque en Algérie en fin de février 2016 est de 74.1 MW, cette puissance va augmenter avant l'achèvement des projets en cours de réalisation. [33]

**I.11. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :****I.11.1. Avantages :**

- ✓ Energie solaire gratuite.
- ✓ Pas de pollution.
- ✓ Sa fiabilité et la longue vie de l'installation.
- ✓ Sa structure fixe.
- ✓ Son coup de maintenance bas.
- ✓ Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
- ✓ L'installation ne produit aucun bruit.
- ✓ Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts suffiraient pour alimenter la planète entière. [11]

**I.11.2. Inconvénients :**

- ✓ La fabrication du module PV relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- ✓ Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs PV ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- ✓ Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- ✓ Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.
- ✓ Occupation d'un espace important pour les installations de grandes dimensions. [34]

**I.12. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe de la conversion photovoltaïque ainsi que les différentes technologies utilisées pour y parvenir. Trois types de cellules ont été présentées l'une cristalline, la deuxième amorphe, la troisième organique pour un critère de comparaison.

Dans la deuxième partie nous avons entamé la modélisation d'un modèle simplifié du générateur photovoltaïque. Les différentes caractéristiques qui interviennent pour un module photovoltaïque ont été présentées. Aussi bien et dans la même partie, différents types des panneaux ont été étudiées ainsi que le potentiel solaire en Algérie.

# Chapitre II

**II.1. Introduction :**

Les moyens de stocker l'énergie électrique sont divers et variés et peuvent être classés dans différentes catégories en fonction de leurs performances (capacité de stockage, énergie/puissance, ...) et de leurs caractéristiques : stockage centralisé ou décentralisé, direct ou indirect. Le stockage est dit « centralisé » lorsque le moyen de stockage est couplé au réseau de distribution de l'énergie électrique. Il est « décentralisé » lorsque le dispositif de stockage est embarqué dans un dispositif mobile et autonome en termes d'énergie. [35]

Dans un système stationnaire ou embarqué, l'énergie est « transportée » par un vecteur énergétique, puis elle est transformée, convertie et mise en forme pour convenir à son application finale. Il existe plusieurs vecteurs énergétiques dont les principaux sont la chaleur, l'électricité et le dihydrogène.

En particulier, les sites géographiquement isolés et non raccordés au réseau intégrant une source d'énergie renouvelable telle que l'énergie solaire nécessitent un système de stockage décentralisé. Ainsi le problème des fluctuations, commun à la plupart des sources d'énergie renouvelable, peut être pallié. [36]

Dans le deuxième chapitre on présente les différents types de convertisseurs continus continu (MPPT, PWM etc...) permettant de réguler, abaisser ou élever la tension délivrée par le générateur photovoltaïque, le stockage d'énergie par batterie avec différent types sera également cité.

**II.2. Régulateur de charge :****II.2.1. Définition de régulateur de charge :**

Le régulateur de charge 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. [37]

**II.2.2. Principe de fonctionnement :**

La densité de l'électrolyte de la batterie est théoriquement un excellent indicateur d'état de charge, mais souvent cet indicateur ne prend sa valeur caractéristique que plusieurs jours après sa charge.

De plus, il faudrait agiter l'électrolyte pour faire une bonne mesure. Enfin, cette mesure est difficile à automatiser. Finalement l'indicateur utilisé est la tension aux bornes de la batterie. Cette grandeur est la seule facilement mesurable capable de donner une estimation de l'état de charge. [38]

II.2.3. Types de régulateurs de charge :

II.2.3.1. Régulateur parallèle :

Ce type de régulateur est utilisé en dérivation sur le panneau solaire. Il permet de dissiper l'énergie excédentaire sous forme calorifique grâce à des composants de puissances selon le principe suivant :

- Lorsque la tension de la batterie est faible, le transistor T est bloqué, le courant et la tension aux bornes de la résistance est faible alors tout le courant délivré par le générateur charge la batterie. Si la tension aux bornes de la diode Zener atteint la valeur de référence, le courant I augmente brusquement, le transistor T devient passant et il délivre une partie du courant de charge. [39]

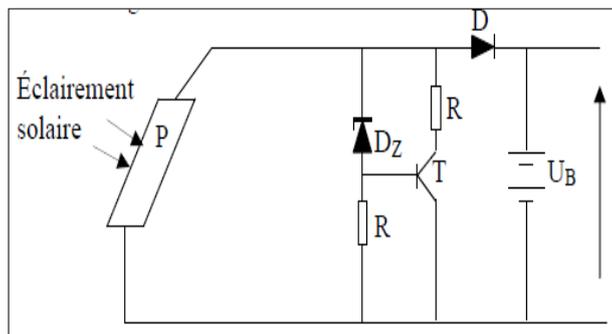


Figure II.1 : Schéma de principe d'un régulateur de charge parallèle.

II.2.3.2. Régulateur série :

Le courant de charge des batteries est occasionnellement coupé par l'ouverture d'un circuit entre les panneaux solaires photovoltaïques et les batteries ; il convient aux applications de moyenne puissance. Ces deux méthodes ont en commun qu'elles utilisent le niveau de tension des batteries pour déterminer le moment où réduire ou stopper complètement la charge des batteries. [40]

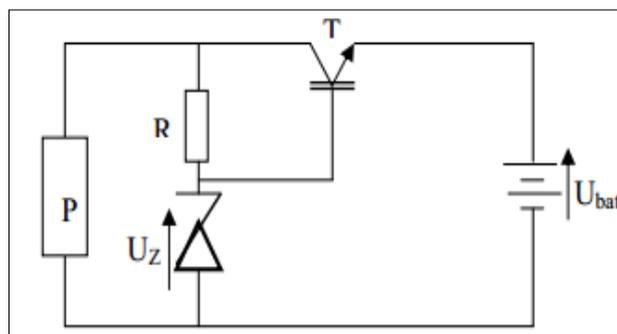
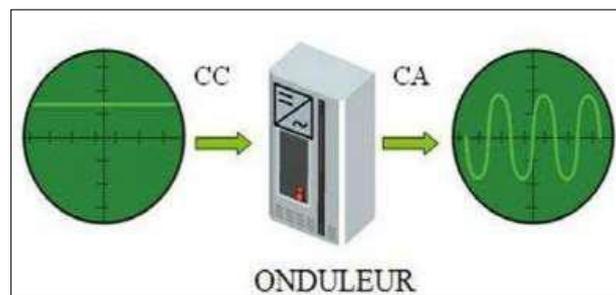


Figure II.2 : Schéma de principe d'un régulateur de charge série. [39]

**II.3. Types de convertisseurs :****II.3.1. Convertisseur continu-alternatif :**

Un onduleur est un convertisseur statique qui permet d'alimenter une charge en courant alternatif à partir d'une source continue. C'est un convertisseur continue-alternatif, l'onduleur est dit autonome quand il impose sa propre fréquence à la charge.

- Si la source continue est une source de tension, l'onduleur est appelé onduleur de tension. Il impose la forme d'onde de la tension aux bornes de la charge, la forme d'onde du courant dépend de la charge.
- Si la source continue est une source de courant, l'onduleur est appelé onduleur de courant. Il impose la forme d'onde du courant (alternatif) qui traverse la charge. On parle de commutateur de courant. Par contre la forme d'onde de la tension aux bornes de la charge dépend de la nature de la charge. [41]



**Figure II.3 :** Rôle de l'onduleur. [39]

**II.3.2. Convertisseur continu-continu :**

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95%.

Ce système présente deux inconvénients pour un PV de faible puissance :

- ★ Prix élevé.
- ★ Le gain énergétique annuel par rapport à un système moins complexe (cas d'une régulation de la tension) n'est pas important. [42]

**II.3.3. Définition de MPPT et PWM :****II.3.3.1. Régulateurs MPPT :**

Dans ce régulateur, un circuit mesure en permanence la tension et le courant du panneau pour tirer de l'énergie au point de puissance maximale (MPPT Max Power Point Tracker). Ceci permet

de garantir que le maximum d'énergie sera récupéré, quels que soient la température et l'ensoleillement. En général, ces régulateurs fonctionnent soit en élevant, soit en réduisant la tension. Un premier circuit ajuste la demande au point de puissance maximale de l'ensemble des panneaux et un deuxième circuit transforme le courant et la tension pour l'adapter au type de batterie. L'avantage de ce type de régulateur est qu'il permet de travailler dans une grande plage de température et ainsi récupérer l'excès non négligeable de tension en hiver lorsque le point de puissance maximale peut monter au-dessus de 17 à 18 V dans un système 12 V. [43]

### II.3.3.2. Régulateurs MLI (PWM) :

Le régulateur MLI a été conçu, vers la fin des années 1990, afin de lever l'inconvénient majeur des régulateurs "tout ou rien" vis-à-vis de la fin de charge. Sa valeur ajoutée est donc une fin de charge optimale avec un état de charge de 100% (au lieu de 75% pour le régulateur "tout ou rien").

Le régulateur MLI est en fait un hacheur qui abaisse la tension du champ photovoltaïque afin que celle-ci soit supportable par le parc de batteries notamment en fin de charge (à partir d'un état de charge de l'ordre de 70%). En début de charge, le régulateur MLI fonctionne comme le régulateur "tout-ou-rien". [44]

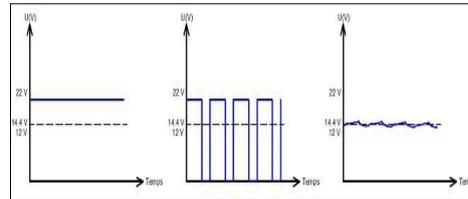


Figure II.4 : Principe de la régulation MLI.

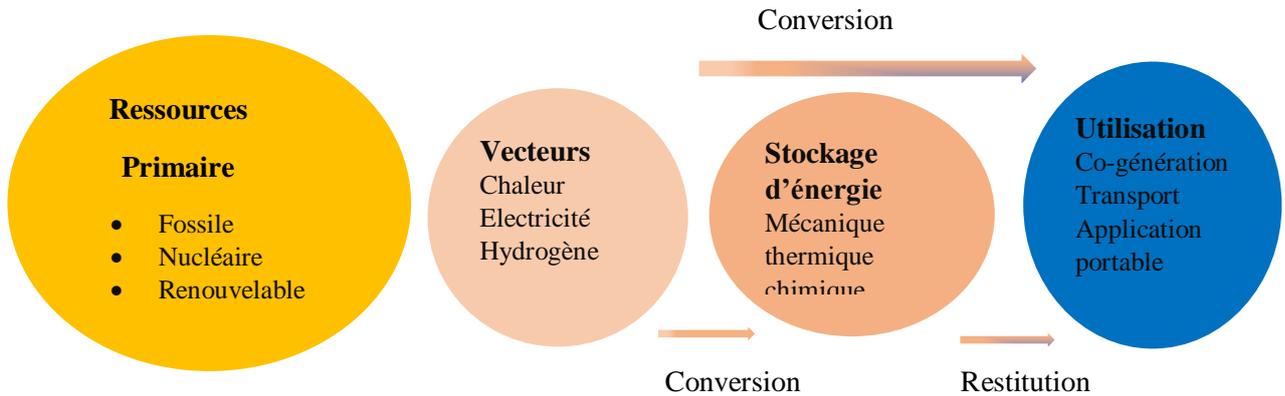
## II.4. Système de stockage d'énergie :

Le stockage d'énergie est une solution transverse et complémentaire pour répondre à la demande d'énergie en période de basse production. Il est difficile de stocker directement l'électricité. Il faut dès lors la transformer en une autre forme d'énergie plus facilement stockable, ce qui entraîne bien évidemment des pertes. [45]

### II.4.1. Définition de stockage d'énergie :

Le stockage de l'énergie électrique (SEE) est un processus de conversion de l'énergie électrique d'un réseau électrique sous une forme qui peut être stockée pour être reconvertie en énergie électrique lorsque nécessaire. Un tel processus permet de produire de l'électricité à des moments soit de faible à faible coût de production ou à partir de sources d'énergie intermittentes et à

utiliser en période d'une demande élevée, un coût de production élevé ou lorsqu'aucun autre moyen de production n'est disponible. [46]



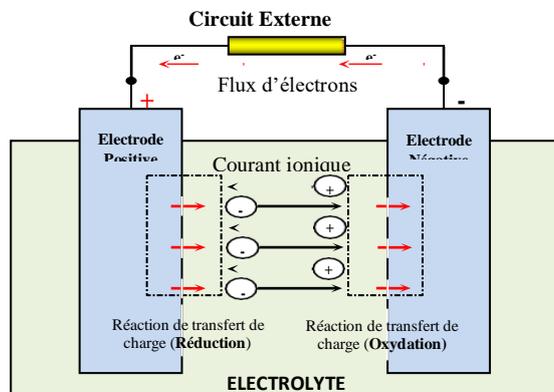
**Figure II.5 :** Schéma énergétique. [47]

**II.5. Différents types et formes de stockage d'énergie :**

**II.5.1. Les batteries :**

Une batterie est un dispositif destiné à stocker l'énergie électrique afin de pouvoir l'utiliser ultérieurement, elle est composée de plusieurs cellules élémentaires connectées en série et/ou parallèle pour obtenir la tension et la capacité souhaitée. La cellule élémentaire est constituée d'une électrode positive (cathode) et d'une électrode négative (anode) immergées dans un électrolyte. Le fonctionnement d'une batterie repose sur une réaction chimique d'oxydo-réduction qui permet l'échange réversible d'ions entre les électrodes positive et négative, tout au long des cycles de charge ou de décharge. Une fois ces électrodes connectées (au niveau des bornes), deux réactions électrochimiques se produisent simultanément (l'oxydation à l'anode et la réduction à la cathode) en donnant naissance au passage du courant électrique. [48]

La batterie est un élément très sensible, son rendement pouvant être influencé par plusieurs paramètres. [43]. La figure suivante montre cellule électrochimique de base :



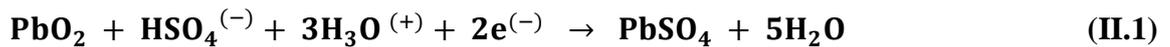
**Figure II.6 :** Cellule électrochimique de base. [49]

**II.5.1.1. Batteries au plomb-acide :**

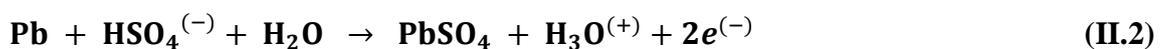
L'accumulateur plomb-acide à pleine charge est constitué de deux électrodes, la cathode en dioxyde de plomb (PbO<sub>2</sub>) et l'anode en plomb (Pb), plongées dans une solution d'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), l'électrolyte. [50]

L'ensemble électrodes-électrolyte est le lieu d'une réaction d'oxydoréduction dont voici les équations :

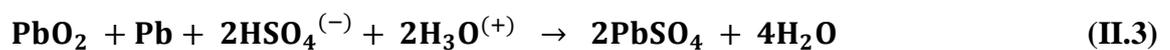
Electrode positive (anode) : [51]



Electrode negative (cathode):



Ce qui nous donne globalement :



Que l'on peut condenser en :

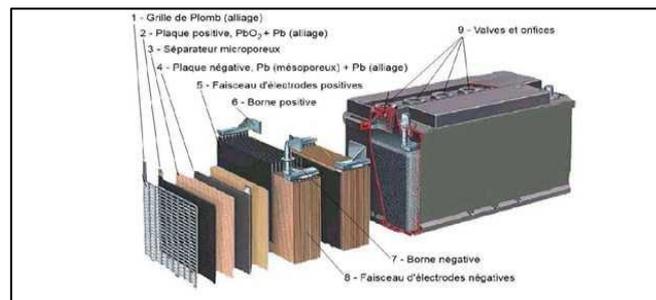


Figure II.7 : Les différents composants d'un accumulateur au plomb. [52]

**II.5.1.2. Batteries au cadmium-Nickel :**

Les batteries nickel-cadmium sont apparues au milieu des années 1960. Elles sont composées d'une électrode négative en cadmium, d'une électrode positive en oxyde de nickel et d'électrolyte est une solution d'hydroxyde de potassium. Ces accumulateurs ont notamment été utilisés dans divers prototype de véhicules électriques qui ont donné lieu à une production industrielle de batterie Ni/Cd dans les années 1990, pour des systèmes stationnaires et pour des applications portables. [53]

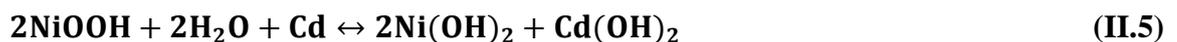




Figure II.8 : Batteries au cadmium-Nickel. [54]

### II.5.1.3. Batteries au Nickel-Zinc :

Les batteries au nickel-zinc sont le choix idéal lorsqu'on a besoin d'une source d'énergie petite et légère avec une excellente capacité de décharge à haut débit à un coût nettement inférieur à celui du lithium-ion. Il est une technologie tolérante aux abus, capable de remplacer à la fois le nickel-cadmium et le nickel-métal les batteries à hydrure dans la plupart des applications à haut volume. Applications portables à forte consommation de courant sont bien adaptés aux batteries nickel-zinc en raison de leur densité de puissance exceptionnelle et des valeurs d'énergie spécifique élevées, qui se situent actuellement entre 70 Wh/kg et 110 Wh/kg. Les cycles de vie qui dépassent 900 cycles à 80 % de profondeur de décharge sont compétitifs par rapport à ceux des meilleurs nickel-cadmium et les technologies lithium-ion.

La chimie du système de batterie nickel-zinc est similaire à celle du nickel-cadmium, sauf que Le cadmium est remplacé par le zinc. L'électrolyte est généralement une solution d'hydroxyde de métal alcalin de 3 à 8 M dans laquelle des additifs spécifiques sont parfois ajoutés pour "gérer" le comportement charge-décharge de l'électrode de zinc. [55]



Ce couple à l'avantage d'être moins coûteux que le Ni-Cd et d'avoir une tension d'utilisation 25% plus élevée. En revanche, son plus gros défaut est une mauvaise résistance au cyclage (environ 600 à 1000 cycles). [42]



Figure II.9 : Batteries au Nickel-Zinc.

#### II.5.1.4. Batteries au lithium :

Un accumulateur de lithium figure (II.10) est un accumulateur électrochimique qui est basé sur le lithium.



Figure II.10 : Accumulateur lithium.

Il existe trois sortes d'accumulateur lithium :

- Accumulateur lithium métal, où l'électrode négative est composé de lithium métallique.
- Accumulateur lithium ion, où le lithium reste à l'état ionique grâce à l'utilisation d'un composé d'insertion aussi bien à l'électrode négative (généralement en graphite) qu'à l'électrode positive (dioxyde de cobalt, manganèse, phosphate de fer).
- Accumulateur lithium polymère est une alternative d'accumulateur lithium-ion, il délivre un peu moins d'énergie, mais beaucoup plus surs. [56]

La figure suivante montre schéma d'une cellule Li-ion :

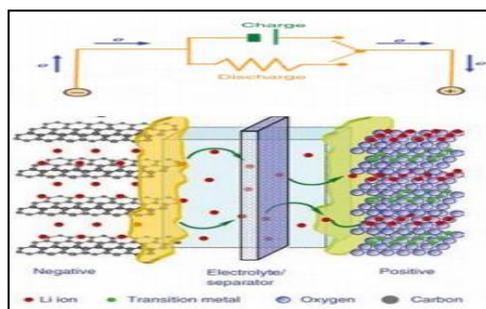


Figure II.11 : Schéma d'une cellule LiGion. [57]

II.5.1.5 Caractéristique des principales technologies d'accumulateur :

Tableau II.1 : suivant montre les principales technologies d'accumulateur. [58]

	Li-ion	Ni-MH	Ni-Cd	Pb-Acide
Tension nominal	3.7	1.2	1.2	2
Densité d'énergie volumique (Wh/l)	200-600	140-435	60-150	50-80
Densité d'énergie massique (Wh/Kg)	75-250	30-110	50-75	30-50
Densité de puissance (W/Kg)	100-5000	250-2000	150-230	500-1200
Cycle de vie	1000-10,000	200-1500	1000-2500	500-1200
Cout(\$/kWh)	600-2500		800-1500	200-400

II.5.2. Pile à combustible :

Une pile à combustible est un générateur électrochimique qui convertit l'énergie chimique d'un combustible (l'hydrogène, le gaz naturel, le monoxyde de carbone et le méthanol,) en énergie électrique par une réaction chimique. Elle est composée des cellules unitaires. Chaque cellule est constituée de deux électrodes (anode et cathode) où se déroulent les réactions électrochimiques, séparées par un électrolyte qui assure le transfert des ions et bloque le passage des électrons. [59]

La figure suivant explique le principe de fonctionnement d'un P à C :

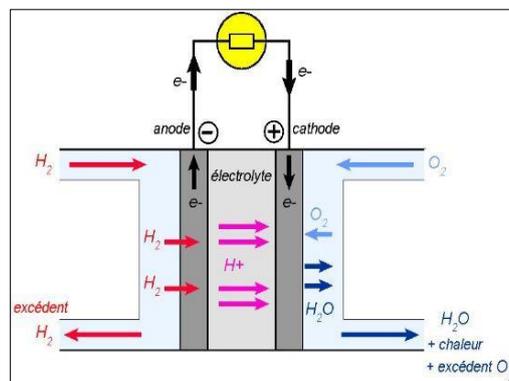


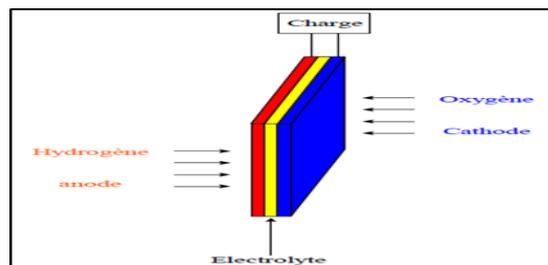
Figure II.12 : Schéma de principe d'une pile à combustible.

★ Principe de fonctionnement :

Le principe de base de fonctionnement de la pile à combustible repose sur celui de l'électrolyse inverse de l'eau. Les combustibles utilisés sont l'hydrogène pur ou les hydrocarbures.

Pour pouvoir utiliser des combustibles de type méthane ou autres alcools, il faudrait des températures de fonctionnement élevées. Pour cette raison, on privilégie l'emploi de l'hydrogène pur pour les piles à combustible fonctionnant à basse température, les carburants traditionnels s'avérant trop peu réactifs à ces températures.

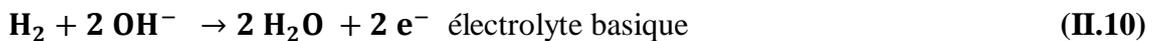
Une pile à combustible est constituée d'un empilement d'éléments anode-électrolyte-cathode qu'on nomme cellule Figure (II.13). Cet empilement est contenu entre deux plaques bipolaires qui, par un système de rainure, assurent une arrivée des gaz combustible et comburant de manière homogène sur toute la surface des électrodes. L'hydrogène entre dans la pile du côté de l'anode et l'oxygène du côté de la cathode. Les gaz sont amenés sur les électrodes par des couches de diffusion, hydrophobes et conductrices qui permettent d'une part l'alimentation en gaz sur toute la surface des électrodes et d'autre part un contact électrique entre la couche réactive et la plaque bipolaire. [60]



**Figure II.13 :** Représentation schématique d'une cellule de pile à combustible.

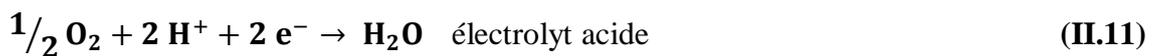
Dans le cas d'une pile hydrogène-oxygène, on a oxydation de l'hydrogène à l'anode selon :

[61]



Il s'agit d'une réaction catalysée. L'atome d'hydrogène réagit en libérant deux électrons, qui circulent dans le circuit électrique qui relie l'anode à la cathode.

A la cathode, on assiste à la réduction cathodique (également catalysée) de l'oxygène selon :



Le bilan donne donc :



II.5.2.1. Différents types de piles à combustible :

Tableau II.2 : Caractéristique des types de pile à combustible. [62]

Type de pile	AFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC DEFC
Nom	Alkaline Fuel Cell	Polymer Exchange Membran Fuel Cell	Acide Phosphorique Fuel Cell	Molten Carbonate Fuel Cell	Solid Oxid Fuel Cell	Direct Methanol (ethanol) Fuel Cell
Electrolyte	Solution alcaline KOH	Membrane Echangeuse de protons	Acide phosphorique $H_3PO_4$	Mélange de $Li_2CO_3K_2O_3$ dans une matrice $LiAlO_2$	Oxyde de zirconium $ZrO_2$ et yttrium $Y_2O_3$	MEP ou $H_2SO_4$
Combustible	$H_2$	$H_2$ produit à partir hydrocarbone ou du méthanol	$H_2$ produit à partir hydrocarbone	$H_2$ produit à partir hydrocarbone $CO_2$	$H_2$ et CO produit à partir hydrocarbures	Méthanol
Oxydants	$O_2$	Air / $O_2$	Air / $O_2$	Air / $O_2$	Air / $O_2$	Air / $O_2$
Applications	NASA	Véhicules	Stationnaires	Stationnaires	Stationnaires	Stationnaires

II.5.3. Stockage électrochimique :

Le stockage d'énergie électrochimique couvre tous les types de batteries secondaires. Les batteries convertissent l'énergie chimique contenue dans leurs matières actives en énergie électrique par une réaction inverse d'oxydation-réduction électrochimique. [46]

★ Principe de fonctionnement :

À l'anode, électrode négative en décharge, s'opère une réaction d'oxydation selon la relation  $M_1 \rightarrow M_1^{n+} + ne^-$  de potentiel redox  $E_1$ .  $M_1$  étant l'espèce active de l'anode. Les électrons libérés transitent dans le circuit extérieur pour atteindre finalement la cathode (électrode positive en décharge) où s'opère une réaction de réduction  $M_2^{n+} + ne^- \rightarrow M_2$  de potentiel redox  $E_2$ .  $M_2$  étant l'espèce active de la cathode. L'électrolyte assure le transport des espèces ioniques mises en jeu dans la réaction globale d'oxydoréduction, qui s'écrit :  $M_1 + M_2^{n+} \rightarrow M_1^{n+} + M_2$ .

Le transport engendre une force électromotrice  $E = E_2 - E_1$ . [36]

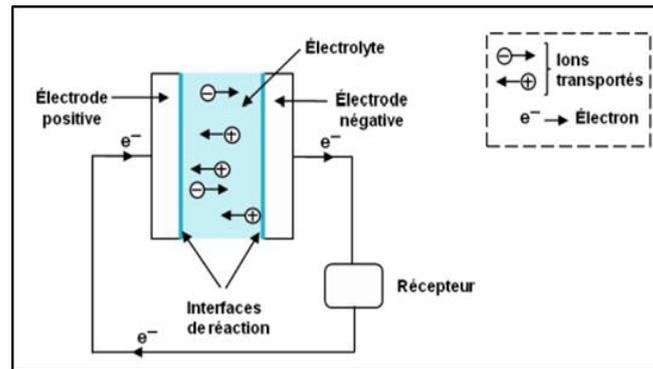


Figure II.14 : Principe d'un accumulateur électrochimique.

#### II.5.4. Stockage mécanique :

Le stockage gravitaire consiste à pomper de l'eau en phase de stockage vers une retenue située en altitude, puis à récupérer l'énergie gravitaire hydraulique disponible à travers une turbine couplée un générateur situé en contrebas. Ce type de stockage présente un bon rendement technique et économique et est de loin le plus utilisé dans le monde.

Le stockage par air comprimé consiste à comprimer et à stocker de l'air. Pour stocker un volume important, on peut utiliser un stockage souterrain, par exemple une cavité saline.

Le stockage inertiel fait appel à un volant d'inertie tournant à grande vitesse, pouvant atteindre 100000 tours/min, il délivre surtout de la puissance dans des temps courts. [63]

#### II.5.5. Stockage par hydrogène :

Le stockage par la filière hydrogène nécessite une transformation de l'énergie électrique en dihydrogène (H<sub>2</sub>) puis une deuxième transformation du dihydrogène en électricité. [64]

##### ★ Principe de fonctionnement :

L'excès de l'énergie produit par le système PV est utilisé par un électrolyseur (passage d'un courant continu à travers deux électrodes immergées dans un électrolyte liquide ou solide) pour décomposer l'eau en oxygène et en hydrogène suivant l'équation :



L'hydrogène ainsi produit est stocké sous forme gazeuse, liquide ou solide. Durant les périodes de fortes consommations, il existe différents moyens pour produire de l'électricité à partir de l'hydrogène stocké :

- ✓ Le premier consiste à alimenter une pile à combustible qui utilise l'hydrogène et l'oxygène comme couple électrochimique.
- ✓ Le deuxième consiste à synthétiser du gaz naturel selon un procédé de la méthanation qui

consiste à utiliser l'hydrogène produit par l'électrolyseur pour produire du méthane. Le méthane ainsi obtenu peut certes être injecté directement dans le réseau de gaz ou être utilisé pour alimenter une centrale à gaz « classique », produisant de l'électricité.

- ✓ Le troisième consiste à utiliser l'hydrogène directement dans une centrale à gaz spécialement conçue à cet effet, afin de produire de l'électricité. Le principe de restitution de l'énergie à partir de l'hydrogène stocké est résumé sur la Figure suivant. [64]

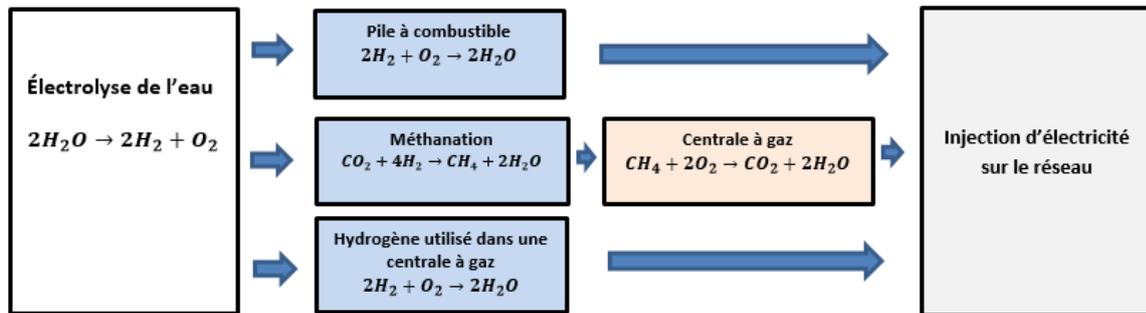


Figure II.15 : Différentes possibilités de restitution de l'électricité à partir de l'hydrogène stocké.

II.5.6. Super-condensateur :

Le super-condensateur (également appelé ultra-condensateur, ultra-condensateur, super-condensateur ou condensateur à double couche) est un condensateur électrochimique dont la densité énergétique n'est pas habituellement élevée. Ces dispositifs ne nécessitent pas de diélectrique, de sorte qu'ils peuvent être intégrés dans presque toutes les tailles, depuis la taille d'un timbre, idéale pour les téléphones portables, jusqu'aux plus grandes tailles utilisées dans les véhicules hybrides. [65]

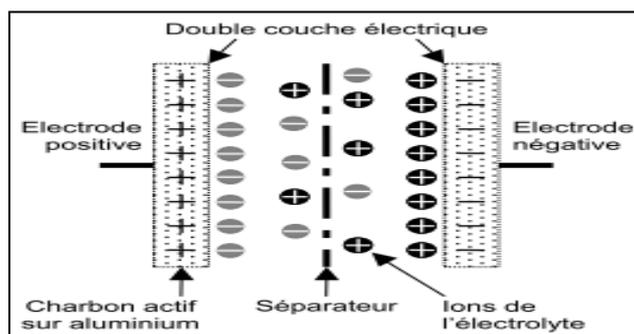


Figure II.16 : Structure d'un super condensateur. [66]

★ Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement d'un super-condensateur est basé sur le stockage de l'énergie par distribution des ions provenant de l'électrolyte au voisinage de la surface des deux électrodes. En effet, lorsque l'on applique une tension aux bornes d'un super-condensateur, on crée une zone de charge d'espace aux deux interfaces électrode-électrolyte. C'est ce que l'on appelle la double

couche électrique. Ainsi, dans le super-condensateur, l'énergie est stockée sous forme électrostatique. [64]

**II.6. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe de régulateur de charge ainsi que les différents types, on a parlé également sur les convertisseurs.

Dans la deuxième partie nous avons parlé sur le système de stockage d'énergie par batterie avec différents types utilisés.

# Chapitre III

## **Chapitre III : Dimensionnement et modélisation du système photovoltaïque autonome**

---

### **III.1. Introduction :**

Aujourd'hui, une part croissante de l'énergie électrique est produite à partir des sources d'énergies renouvelables. Les systèmes solaire et éolien sont les plus répandus, mais l'important potentiel solaire en Algérie avantage les systèmes solaires. Plus précisément, l'installation des systèmes PV, isolés ou connectés au réseau, peuvent être utilisés dans presque tous les lieux avec des dimensionnements appropriés. Les systèmes PV isolés ont fait leurs apparitions grâce aux expéditions spatiales, afin de leurs assurer la production d'énergie nécessaire. Plus tard, ces systèmes ont été largement installés dans les sites isolés où le coût d'un système PV est inférieur au coût du raccordement au réseau. [67]

Dans ce chapitre nous présentons les différents types de système photovoltaïque et on a fait étude sur le site isolé choisit (école primaire), le dimensionnement et la modélisation d'un système photovoltaïque autonome.

### **III.2. Différents types de système photovoltaïque :**

Les systèmes PV sont des générateurs, qui convertissent directement l'énergie du soleil en électricité [68]. Parmi les systèmes PV, nous trouvons les systèmes autonomes pour alimenter les sites isolés, les systèmes hybrides, ainsi que les systèmes PV raccordés au réseau électrique.

#### **III.2.1. Système autonome :**

Un système PV autonome est également appelé système hors réseau (non connectés au réseau) et est utilisé dans les régions éloignées où le réseau électrique n'existe pas. Ce type de système photovoltaïque comprend la production d'électricité par la conversion photovoltaïque, le stockage de l'énergie sous forme de batteries ou de piles à combustible et la régulation. L'utilisateur peut utiliser l'énergie qui est stockée dans des batteries produites par des panneaux solaires à tout moment (figure III.1), conformément à la demande de charge. Un régulateur est utilisé pour réguler correctement la tension générée à l'extrémité de la charge. A un générateur de secours peut être utilisé en cas d'urgence. [69]

## Chapitre III : Dimensionnement et modélisation du système photovoltaïque autonome

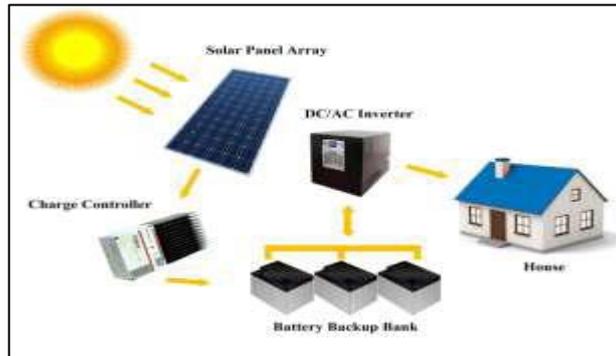


Figure III.1 : Système autonome.

### III.2.1.1. Systèmes autonomes sans stockage d'énergie (alimentation directe) :

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence de lumière et dès que l'éclairement sera suffisant pour atteindre la puissance demandée. [70]

### III.2.1.2. Systèmes autonomes avec stockage d'énergie :

Il est important de stocker l'électricité chaque fois que la demande énergétique est décalée dans le temps par rapport à l'apport du soleil. Les durées de stockage peuvent être très variables, de quelques heures (passage de nuages), d'une nuit, à plusieurs jours ou plusieurs mois pour des systèmes autonomes, et selon le degré que l'on se fixe au niveau de la sécurité d'approvisionnement, Les batteries servent à stocker l'énergie produite par le générateur PV tel que l'illustre la figure III.2. Ils y ont nécessité de stockage chaque fois que la demande énergétique est décalée dans le temps vis-à-vis de l'apport énergétique solaire. [71]

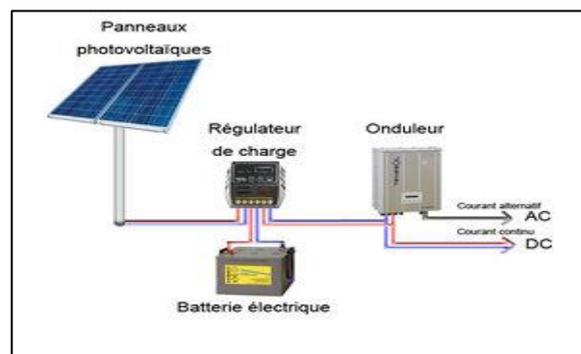


Figure III.2 : Système autonome avec stockage. [72]

### III.2.1.3. Systèmes autonomes hybrides :

Les systèmes hybrides sont habituellement élaborés pour répondre aux besoins énergétiques de l'électrification des maisons autonomes ou l'électrification complète de villages isolés ou de petites îles. Le rôle d'un système hybride est d'assurer la demande de charge et d'optimiser sa

## Chapitre III : Dimensionnement et modélisation du système photovoltaïque autonome

production afin de combler l'énergie demandée par la charge durant la période d'intermittence et tout en maintenant la qualité d'énergie fournie. [73]

Les systèmes d'énergies hybrides associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergies classiques. [74]

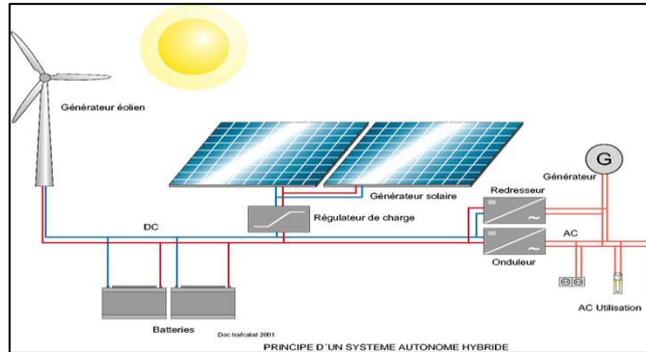


Figure III.3 : Principe d'un système autonome hybride. [75]

### III.2.2. Système connectés au réseau :

Dans ce système l'ensemble de l'installation est connectée au réseau de distribution après une adaptation des paramètres. L'énergie produite est soit consommée sur place par l'utilisateur et le surplus est injecté sur le réseau, où bien injectée en totalité dans le réseau électrique sans limite. Ces dernières centrales peuvent être conçues avec ou sans stockage. [76]

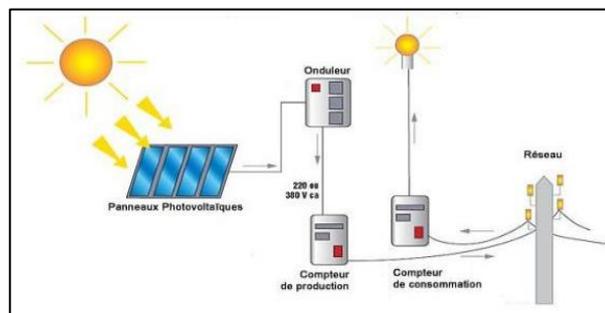


Figure III.4 : Structure d'un système PV connecté au réseau. [77]

### III.2.3. Système hybride :

Un système hybride d'énergie est un système qui combine différents systèmes de production. Par exemple, la combinaison éolien-diesel est un système hybride d'énergie, de nos jours, les systèmes hybrides d'énergie associent au moins deux technologies complémentaires : une ou plusieurs sources d'énergie classiques, généralement des générateurs au diesel, et au moins une source d'énergie renouvelable. Les systèmes hybrides d'énergie sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées. Les

## Chapitre III : Dimensionnement et modélisation du système photovoltaïque autonome

Les systèmes hybrides à énergies renouvelables sont fiables, sans pollution et permettent de répondre à la demande d'énergie sur de longues périodes. [78]

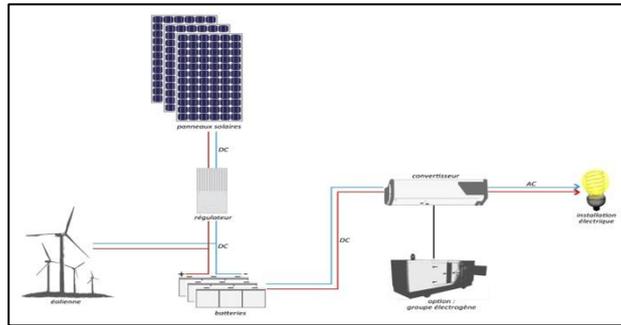


Figure III.5 : Exemple d'un système hybride. [79]

### III.3. Dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome :

#### III.3.1. Définition de dimensionnement d'un système photovoltaïque :

Le dimensionnement d'une installation photovoltaïque revient à déterminer le nombre nécessaire des panneaux solaires constituant le champ photovoltaïque pour adopter un système PV suffisant pour couvrir les besoins de la charge à tout instant ainsi que la capacité de charge de la batterie. [39]

#### III.3.2. Types de dimensionnement :

##### III.3.2.1. Dimensionnement de régulateur :

Le régulateur sera dimensionné d'après les paramètres suivants : tension, courant d'entrée et courant de sortie. [80]

- **Tension nominale** : Elle doit être celle du champ photovoltaïque.
- **Courant d'entrée ( $I_e$ )** : C'est le courant de charge maximal que les modules sont susceptibles de débiter. Il doit être supporté sans problème par le régulateur. Pour estimer ce courant, le plus sûr est de prendre 1,5 fois le courant maximal
- **Courant de sortie ( $I_s$ )** : L'intensité du courant de sortie du régulateur doit être Supérieure à la valeur maximale que peuvent tirer les récepteurs simultanément. Elle peut être déterminée par la formule :

$$I_s = 1.5 * \frac{P}{V_{ch}} \quad (III.1)$$

Avec :

## Chapitre III : Dimensionnement et modélisation du système photovoltaïque autonome

---

**P** : Puissance totale des récepteurs lorsqu'ils fonctionnent tous au maximum de leur puissance de fonctionnement (W), donc la puissance d'un appareil fois le nombre d'appareils.

### III.3.2.2. Dimensionnement d'onduleur :

Pour fixer la puissance nominale de l'onduleur, il faut estimer :

- La charge maximale probable pendant une durée supérieure à 10 – 20 minutes : les charges de courtes durées ne sont pas prises en compte.
- La charge maximale instantanée : elle est généralement égale à 04 fois la puissance du moteur le plus puissant que l'onduleur devra démarrer.

L'onduleur devra pouvoir fournir la charge maximale probable pendant une durée supérieure à 10-20 minutes en permanence et la charge maximale instantanée pendant quelque secondes. Ces deux valeurs sont bien connues des constructeurs. [81]

La puissance maximale doit être la plus faible possible afin de limiter au maximum les pertes à charges faibles ou nulle, tous spécialement si l'onduleur est amenée à fonctionner d'une façon continue. Si la puissance nominale est calculée au plus juste, le disjoncteur de l'onduleur déclenchera de temps en temps. Pour une habitation moyenne, l'onduleur a une puissance nominale comprise entre 0.5 et 2.5 KVA, selon le système retenu (valeur moyenne 1.8 KVA)

### III.3.2.3. Dimensionnement des batteries :

Le dimensionnement de la batterie consiste à calculer le nombre de batteries nécessaires pour un système d'énergie hybride permettant de s'affranchir des variations climatiques temporaires. Cela dépend principalement des jours d'autonomie souhaitée, la profondeur maximale de décharge de la batterie et la température atmosphérique. L'équation présente le calcul du nombre de batteries qui doit connecter en parallèle pour atteindre les ampères heures requis par le système. [82]

$$N_{bp} = \frac{C_T}{C_n} \quad \text{(III.2)}$$

Où :

$C_T$  : la capacité totale de banc de batteries nécessaires (Ah).

$C_n$  : la capacité nominale d'une unité de batterie (Ah).

$N_{bp}$  : le nombre de batteries parallèle.

Équation (III-3) présente le nombre de batteries qui doit être connecté en série pour atteindre la tension requise par le système.

## Chapitre III : Dimensionnement et modélisation du système photovoltaïque autonome

$$N_{bs} = \frac{V_n}{V_{batt}} \quad (III.3)$$

Où :

$V_n$  : la tension du système DC (Volt) ;

$V_{bat}$  : la tension de la batterie (Volt) ;

$N_{bs}$  : le nombre de batteries qui doit être connecté en série.

Le nombre total des batteries est obtenu en multipliant le nombre total de batteries en série ( $N_{bs}$ ) et le nombre total des batteries en parallèle ( $N_{bp}$ ), comme indiqué par l'équation :

$$N_b = N_{bp} * N_{bs} \quad (III.4)$$

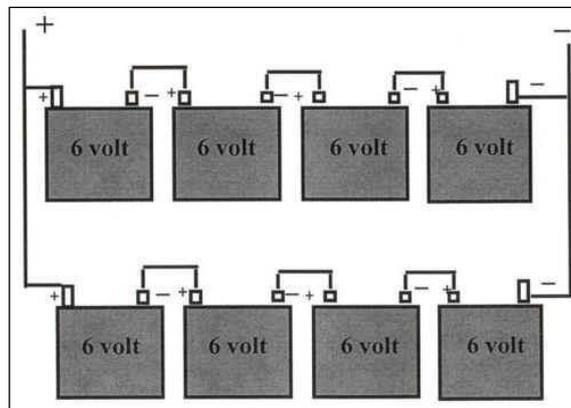


Figure III.6 : Exemple de connexion des batteries (série parallèle)

### III.4. Modélisation du système autonome :

#### III.4.1. Composants du système photovoltaïque autonome :

##### III.4.1.1. Modules solaires :

Dans un système photovoltaïque autonome, les modules PV sont généralement utilisés pour charger des batteries d'accumulateurs. La majorité des modules commercialisés comportent 36 cellules en silicium cristallin. Le courant de sortie, et la puissance de ces modules sont proportionnels à la surface du module. Ces panneaux ont une efficacité de conversion (énergie électrique produite/énergie solaire incidente) de l'ordre de 10 à 20%. [83]

##### III.4.1.2. Régulateur :

Dans tout système photovoltaïque autonome, on intercale un système dit de régulation, qui sert à contrôler l'intensité de courant qui passe par les accumulateurs, les protégeant ainsi contre les surcharges et les décharges profondes.

## Chapitre III : Dimensionnement et modélisation du système photovoltaïque autonome

---

Le régulateur permet aussi d'effectuer un transfert optimal d'énergie du champ photovoltaïque à l'utilisation. [84]



Figure III.7 : Régulateur de charge

### III.4.1.3. Batterie de stockage :

Le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques autonomes est assuré par des batteries.

Les batteries les plus utilisées pour des générateurs autonomes sont en générale de type au plomb- acide (Pb). Celles de type au nickel-cadmium (Ni-Cd) sont parfois préférées pour les petites applications. [85]



Figure III.8 : Batterie de 150 Ah/12V. [84]

### III.4.1.4. Onduleur :

Les onduleurs sont des appareils servant à convertir la tension continue fournie par les panneaux ou batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant avec une tension alternative. [85]

### III.4.1.5. Charges (utilisateurs) :

Il existe deux types d'appareils alimentés par le système, celles qui fonctionnent en courant continu comme des équipements de télécommunications, le pompage d'eau, et celles en courant alternatif dans les cas d'usage domestique, ce cas nécessite un onduleur. L'utilisation de l'énergie photovoltaïque doit être pensée en termes d'économie de l'énergie. Il est donc plus avantageux de

## **Chapitre III : Dimensionnement et modélisation du système photovoltaïque autonome**

---

chercher des consommateurs fonctionnant en courant continu plutôt que d'ajouter un onduleur et un consommateur. [84]

### **III.4.2. Méthode de dimensionnement d'un système autonome :**

#### **III.4.2.1. Méthode de la probabilité d'erreur dans la consommation :**

Cette méthode permet d'optimiser le dimensionnement d'un système dans des conditions complexes (fluctuation saisonnières de l'irradiation, ciel couvert (nuageux),...etc.) grâce à un logiciel adapté. L'inconvénient de cette méthode est qu'il faut connaître les radiations pour un nombre d'années très grand (10 ans minimum). [86]

#### **III.4.2.2. Méthode du mois le plus défavorable :**

Dans cette méthode, on estime l'énergie récupérable pour une période critique d'un mois, appelé le mois le plus défavorable. Ce mois correspond au mois pendant lequel la valeur de l'irradiation moyenne mensuelle est la plus faible de l'année ou dans certains pays la période d'hivers est rude. [87]

#### **III.4.2.3. Méthode de la moyenne annuelle :**

Cette méthode est très proche de celle du mois le plus défavorable. Elle utilise aussi, l'irradiation journalière en (KWh/m<sup>2</sup>/jr), pour une durée d'une année. [86]

#### **III.4.2.4. Méthode LPSP :**

Probabilité de Perte d'énergie (Loss of Power Supply Probability), est une technique probabiliste introduite par Abou Zahr et Ramakumar dans le domaine des systèmes de génération photovoltaïques et largement utilisée dans la conception et l'optimisation des systèmes autonome (stand alone), jusqu'à présent. Elle est basée sur le concept de LPSP qui est la probabilité que le système rencontre une pénurie à un moment donné pendant une période d'analyse, c'est-à-dire un état dans lequel le système ne serait pas en mesure de fournir l'énergie nécessaire à la charge. [88]

#### **III.4.2.5. Méthode des heures équivalentes :**

Elle considère que l'intensité fournie par un module photovoltaïque est proportionnelle à l'ensoleillement, le calcul est effectué pour le mois le plus défavorable de l'année, on détermine alors le courant fourni par le champ photovoltaïque dans les conditions où la température est donnée par la relation. [89]

## Chapitre III : Dimensionnement et modélisation du système photovoltaïque autonome

---

### III.4.2.6. Méthode itérative :

Connue aussi sous le nom de méthode « Ampère-heure » cette méthode consiste à déterminer le nombre de panneaux photovoltaïques nécessaire pour satisfaire la demande, puis peu à peu à réduire ce nombre, tout en calculant le pourcentage des besoins énergétiques annuels fournis par le générateur PV et ainsi à compléter le reste par l'énergie fournie par un générateur complémentaire. [90]

### III.4.2.7. Méthode utilisabilité solaire :

La méthode utilisabilité solaire est un outil très puissant pour le dimensionnement des systèmes photovoltaïques. L'utilisabilité de la radiation solaire est définie comme étant la fraction de la radiation totale incidente sur la surface des panneaux PV, et qui excéderait un niveau spécifique appelé niveau critique. [91]

### III.4.2.8. Méthode simplifiée :

#### ❖ Etape1 : 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. L'énergie totale moyenne nécessaire chaque jour  $E_{cj}$  (Wh/j) est la somme des consommations énergétiques des divers équipements constituant le système à étudier, à savoir les télévisions, les lampes d'éclairage, les appareils électroniques, etc... ; Elle est donnée par la loi suivante :

$$E_{cj} = \sum E_j \quad (\text{III.5})$$

Pour les équipements qui ne sont pas utilisés quotidiennement et pour tous les équipements à forte consommation, partez de la durée du cycle de fonctionnement de la tâche. Ainsi, la consommation de chaque équipement peut être calculée comme suit : [92]

$$E_j = P_j * t_j * N_j \quad (\text{III.6})$$

$P_j$  : Puissance journalière d'un équipement.

$t_j$  : Temps de fonctionnement.

$N_j$  : Nombre des équipements.

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

Les données de l'ensoleillement 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. [93]

## Chapitre III : Dimensionnement et modélisation du système photovoltaïque autonome

---

- ❖ **Etape 3 : calcul du nombre de panneaux solaire :** [88]

$$\text{Nombre des modules PV} = \frac{\text{Consommation journalière}}{\text{Production journalière}}$$

$$N_{ppv} = \frac{E_{cj}}{P_{ppv}} \quad (\text{III.7})$$

- ❖ **Etape 4 : calcul de nombre de batteries :** [88]

$$N_{batt} = \frac{P_g}{P_{batt}} \quad (\text{III.8})$$

$$P_g = E_{cj} * \text{Nombre d'autonomie}$$

- ❖ **Etape 5 : Choix de régulateur :**

Parmi les différents types de régulateurs, on doit choisir, celui qui est le mieux adapté à notre installation. Afin de déterminer ses caractéristiques on sépare souvent les deux fonctions de régulateur: (charge et décharge). [88]

- ✓ La régulation de charge (à l'entrée) est fonction de la puissance du générateur, donc du courant produit par les modules.
- ✓ La régulation de décharge (à la sortie) est fonction de la puissance totale des récepteurs donc du courant consommé par ces derniers.

- ❖ **Etape 6 : Choix de l'onduleur :**

Le dimensionnement sera basé sur : [87]

- ✓ **Le rendement :** c'est la conversion (DC/AC) qui atteint des valeurs assez élevées en fonctionnement nominal (égale à 0,8).
- ✓ **La consommation à vide :** c'est l'ensemble des pertes induites par l'onduleur en absence de charge, la diminution de ces pertes assure un bon stockage dans l'accumulateur.
- ✓ La fréquence sera 50Hz.
- ✓ **La tension d'entrée :** elle est égale à celle de la batterie.

### III.5. Avantages et inconvénients d'un système photovoltaïque autonome :

#### III.5.1. Avantages :

- Avoir accès à l'électricité dans des endroits isolés non raccordés au réseau.
- Produire et consommer sa propre énergie propre.
- Ne pas dépendre du réseau électrique pour le rachat de l'électricité produite.

## Chapitre III : Dimensionnement et modélisation du système photovoltaïque autonome

---

- Avoir la possibilité de tester une petite installation à faible coût. [94]

### III.5.2. Inconvénients :

- La nécessité d'un dimensionnement approprié de son système afin de ne jamais manquer d'électricité.
- La dépendance au soleil.
- La nécessité de maîtriser sa consommation électrique.
- Le coût des batteries. [94]

### III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté le système photovoltaïque, l'énergie solaire photovoltaïque et les différents systèmes photovoltaïques (systèmes autonomes, systèmes hybrides, système PV connecté au réseau électrique).

Nous avons aussi présenté la méthode pour le dimensionnement optimal et la modélisation des composants de système photovoltaïques autonome en respectant les avantages et inconvénients du système.

# Chapitre IV

**IV.I. Introduction :**

PVSYST est un logiciel de dimensionnement de panneaux solaires permettant d'obtenir diverses informations telles que la production d'énergie, l'irradiation et le coût de l'installation, la surface nécessaire, ou la production annuelle d'énergie. Un mode avancé permet d'obtenir beaucoup plus d'informations pour une étude très complète. Le dimensionnement du système est basé sur une procédure simple et rapide :

- ✓ Indiquer la puissance souhaitée ou la surface disponible.
- ✓ Choisir un module PV dans la base de données interne (liste déroulante).
- ✓ Choisir un onduleur dans la base de données (liste déroulante).

PVSYST proposera une configuration de modules / système permettant de réaliser une première simulation préliminaire. Le logiciel inclut un système de code d'erreurs ou d'avertissement coloré. [95]

Dans ce chapitre on expliquera comment utiliser le logiciel PVSYST pour un système photovoltaïque autonome (site isolé), l'étude de évaluation économique du système.

**IV.2. Etude sur le site isolé choisit :****IV.2.1. Localisation du site :**

L'école «Belghazali Mohamed» est située dans la willaya de Naama à côté de l'agence de voyage.



**Figure IV.1 :** Site de primaire Belghazali Mohamed.

**❖ Description de l'école :**

Nombre de pièce : cette école est constituée à 6 classes et 2 bureaux et un restaurant et 4 W.C.

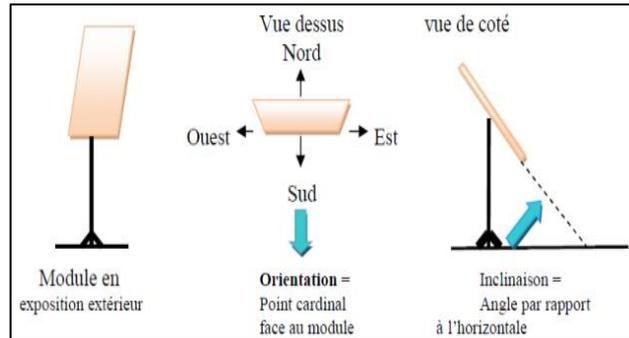
Tableau IV.1 : Caractéristique des équipements de cette école.

	Nombre (N)	Puissance unitaire Pu (W)	Puissance P(W)	Fréquence (temps) f(heure)	Energie (Wh/j)
Classe (lamp LED)	6*8=48	45	48*45=2160	6	12960
Classe (lamp néon)	6	18	108	6	648
Couloir (lamp LED)	11	45	495	1	495
Cubl (ordinateur)	10	350	3500	1	3500
Cubl (lamp néon)	17	18	306	1	306
Télévision	1	1000	1000	1	1000
Bureau directeur (lamp néon)	2	18	36	6	216
Bureau directeur (ordinateur)	1	350	350	6	2100
Bureau directeur (lamp néon)	2	18	36	6	216
Bureau secrétaire (ordinateur)	1	350	350	6	2100
Bureau secrétaire (lamp LED)	1	45	45	6	270
Cantine scolaire (réfrigérateur)	1	500	500	12	6000
Cantine scolaire (lamp néon)	25	18	450	4	1800
Post police (réfrigérateur)	1	250	250	12	3000
Post police (lamp néon)	1	36	36	1	36
Cour (lamp)	5	75	375	1	375
Cour (Projecteur)	6	1000	6000	1	6000
W.C (lamp néon)	4	18	72	1	72
W.C (lamp)	6	75	450	1	450
W.C (lamp néon)	8	18	144	1	144
				<b>Energie journalière :</b>	<b>41472 Wh/j</b>

**IV.2.2. L'orientation des modules photovoltaïques :**

La position des modules photovoltaïques par rapport au soleil influe directement sur leur production énergétique. Il est très important de bien les placer pour les utiliser au maximum de leur possibilité. On appelle orientation, le point cardinal vers lequel est tournée la face active du panneau (Sud, Nord, Sud-ouest...). L'inclinaison indique l'angle que fait le panneau avec le plan horizontal, elle se compte donc en degrés. [96]

La figure suivante présente l'orientation (IV.2).



**Figure IV.2 :** Définition de l'orientation et de l'inclinaison d'un panneau.

L'orientation idéale d'un module photovoltaïque obéit à une règle vers l'équateur :

- ❖ Orientation vers le sud dans l'hémisphère Nord ;
- ❖ Orientation vers le nord dans l'hémisphère Sud.

Partie I : Présentation de logiciel PVSYS :

IV.I.1. Organigramme de logiciel PVSYS :

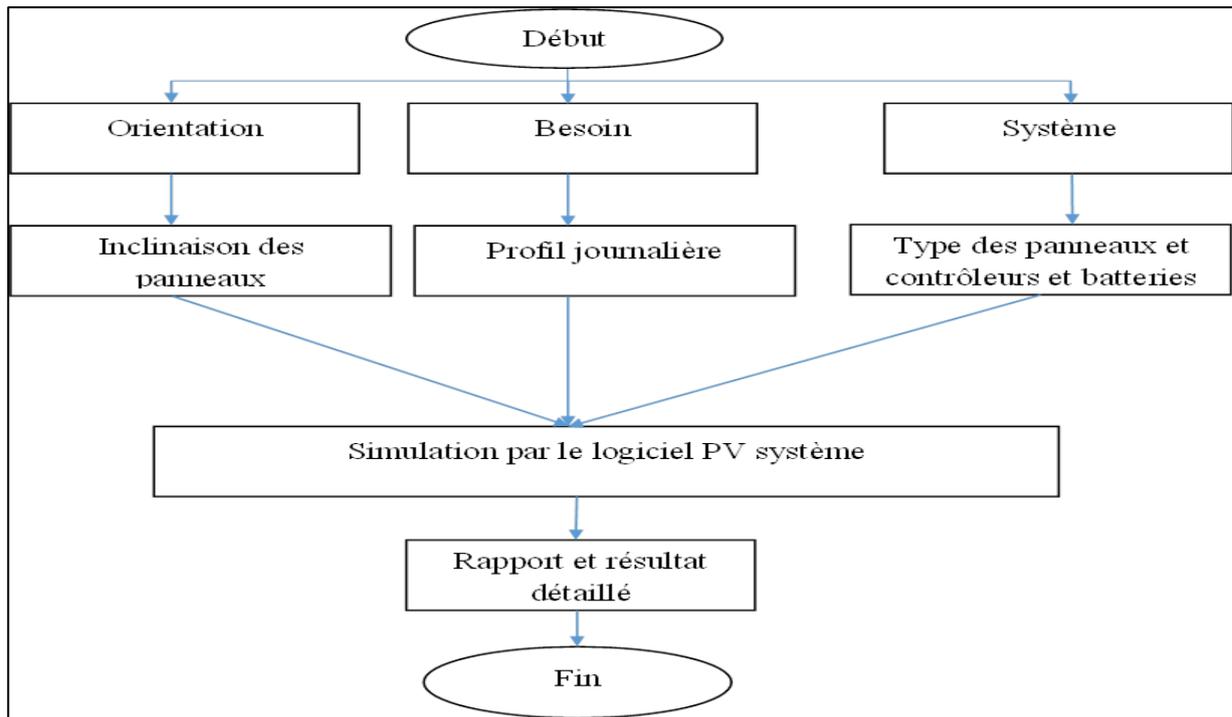


Figure IV.3 : Présentation de logiciel PVSYS.

IV.I.2. Présentation de projet :

Dans ce projet, nous avons présenté une installation PV autonome pour alimenter une école primaire « Belghazali Mohammed ». Le site étudié est situé au niveau de la cité de Naama, wilaya de Naama.

IV.I.2.1. Données géographique :

Tableau IV.2 : Tableau des données géographique du site d'école primaire (Belghazali Mohammed-Naama-)

Caractéristiques	Latitude en degré °	Longitude en degré °	Altitude en m
L'école primaire Belghazali Mohammed –Naama- (gmt+1)	33.27 N	-0.31 O	1166

IV.I.2.2. Coordonnée géographique :

Un site géographique est défini par:

- ✓ Son nom, pays et région du monde;
- ✓ Coordonnées géographiques : latitude, longitude, altitude et fuseau horaire;

✓ Données météorologiques mensuelles.

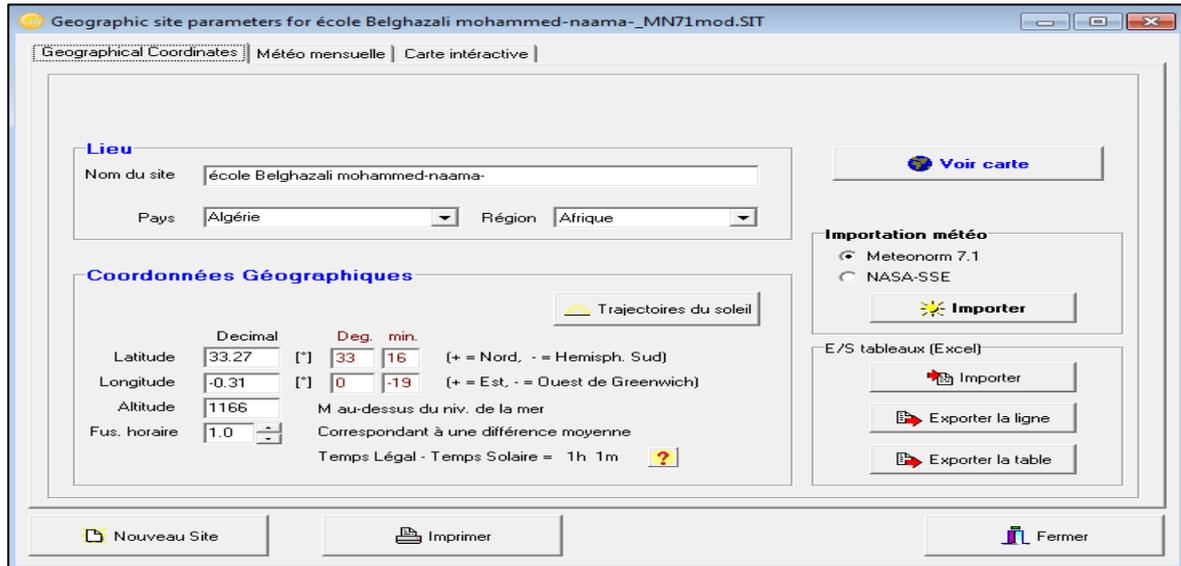


Figure IV.4 : Coordonnée géographique d'école primaire Belghazali Mohammed-Naama.

❖ **La latitude :  $\varphi$**

La latitude permet de repérer la distance angulaire d'un point quelque par rapport à l'équateur.

❖ **La longitude :  $\lambda$**

La longitude d'un lieu (ou méridien) est valeur angulaire, expriment le positionnement Est-Ouest d'un lieu par rapport au méridien d'origine (méridien de Greenwich).

Alors si :

- $\lambda > 0$ , vert l'Est.
- $\lambda < 0$ , vert l'Ouest.

D'une façon plus complète, on dit aussi que c'est la mesure de l'arc compris entre le méridien du lieu et le méridien de Greenwich.

❖ **L'altitude :**

L'altitude exprime un écart entre un point donné et le niveau de la mer (ou niveau0).

❖ **Le Fuseau horaire :**

C'est une bonde de  $15^\circ$  de large s'étendant du pôle nord au pôle sud permettant de décomposé le globe terrestre en 24 tranches horaire.

IV.I.2.3. Données météorologiques :

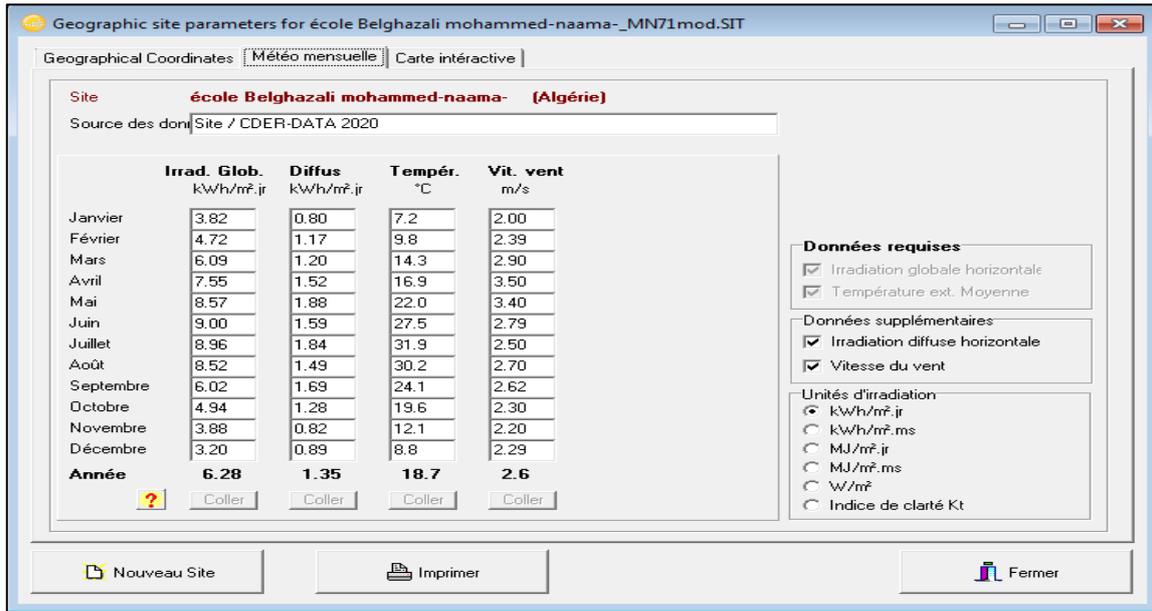


Figure IV.5 : Paramètre climatique d'école primaire Belghazali Mohammed-Naama-(CDER-DATA2020).

Ces données sont caractéristiques climatiques (l'irradiation et la température) du site d'école primaire Belghazali Mohammed, Il est conseillé de définir soigneusement la source des données Site/CDER-DATA2020.

IV.I.3. Conception du projet :

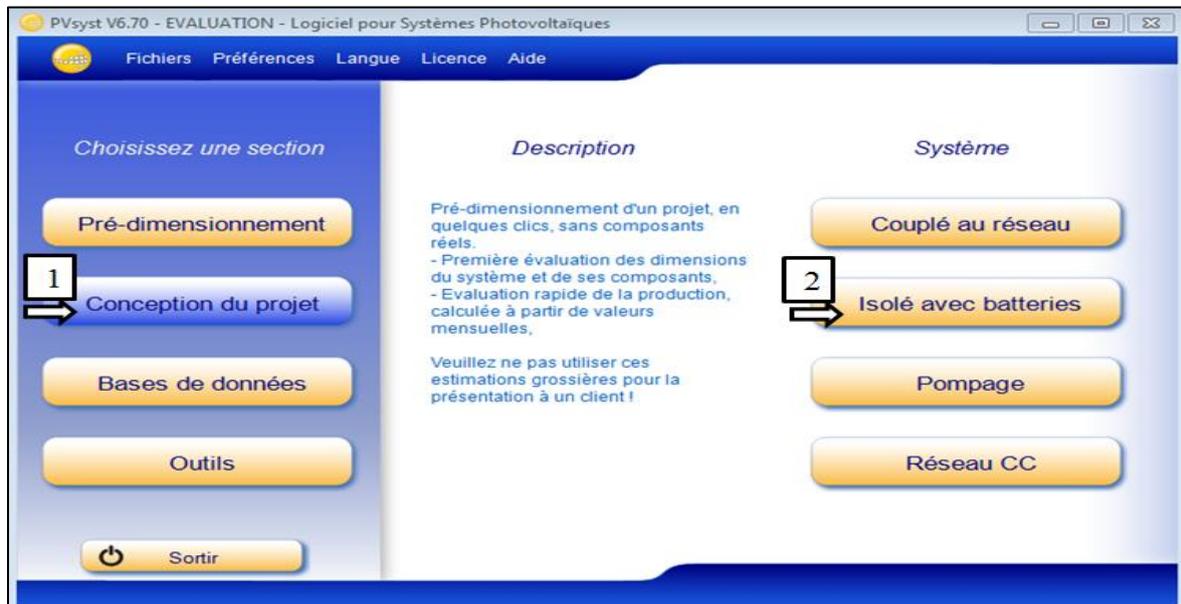


Figure IV.6: Conception du projet.

## IV.I.3.1. Etapes pour une conception du projet (isole avec batteries) :

Cela donne une procédure étape par étape lors de la définition d'un système autonome en PVSYST.

**1. Première étape :****❖ Orientation des modules PV:**

Pour choisir les modules PV il est nécessaire de choisir des orientations et inclinaisons favorables à la production d'énergie, nous avons choisi un plan incliné fixe d'une inclinaison  $33.3^\circ$  (par rapport à l'horizontale) comme l'illustre la figure (IV.7) c'est l'inclinaison optimale donnée par le logiciel PVSYST, en dehors de cette dernière le rendement diminue.

- ✓ **Plan incliné fixe** : définir l'inclinaison de l'avion et de l'azimut
- ✓ **Le facteur Transposition** : est le rapport de l'irradiation incidente sur le plan, à l'irradiation horizontale.

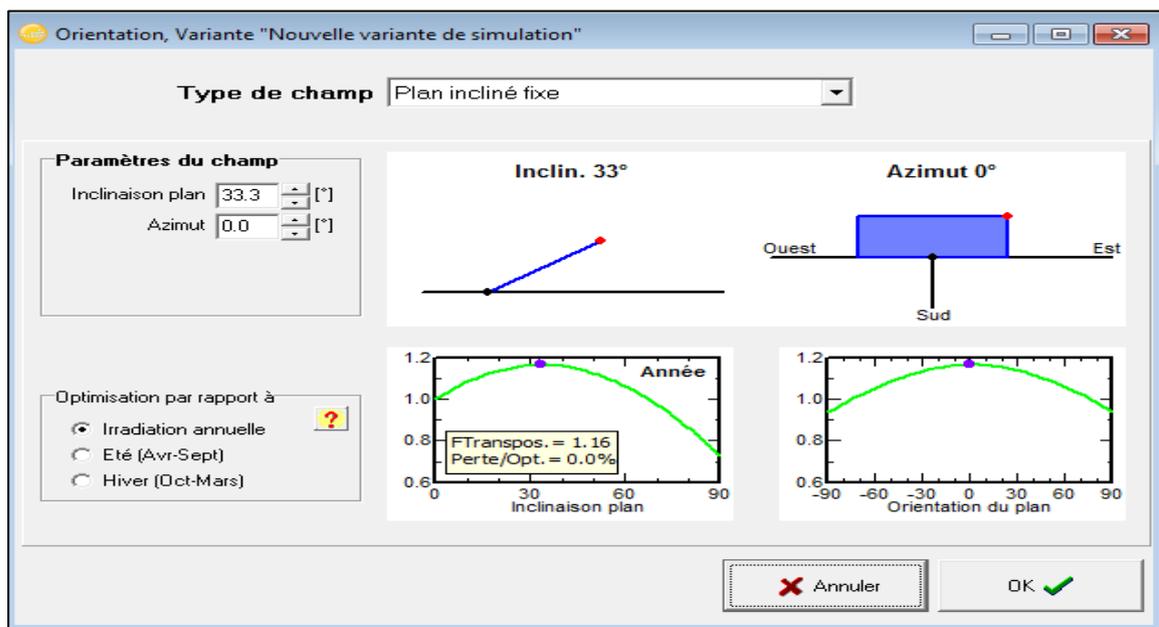


Figure IV.7 : Angle d'orientation.

- ❖ **Définition d'un profil de l'horizon** : est une opération très simple avec l'outil graphique PVSYST. L'horizon est une ligne brisée superposée sur le diagramme de trajectoire du soleil, qui peut contenir un nombre quelconque de hauteur / points d'azimut.

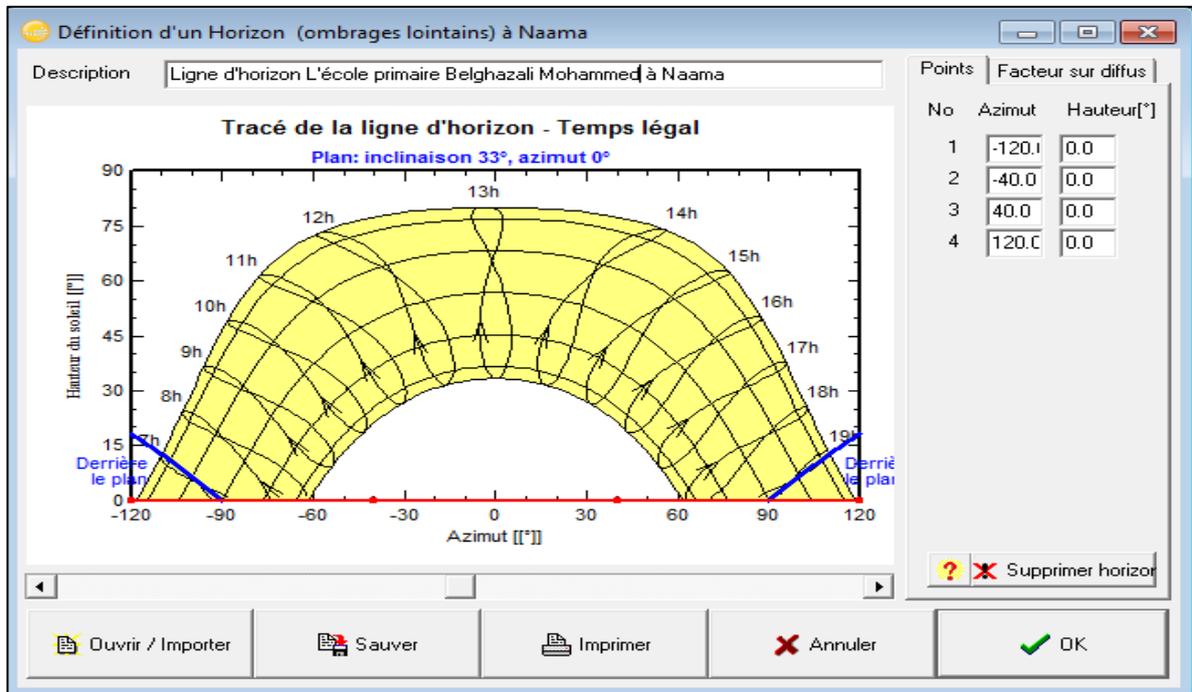


Figure IV.8 : Horizon d'école primaire Belghazali Mohammed-Naama.

**2. Deuxième étape :**

- ❖ **La définition des besoins de l'utilisateur** :

Par défaut pour les petits systèmes, cela est proposé comme une liste des appareils ménagers et les détails de leur utilisation (peut être saisonnière ou mensuelle). Pour les systèmes industriels ou plus grands, vous avez de nombreuses possibilités de définir un profil de charge (compris par une liste de valeurs horaires).

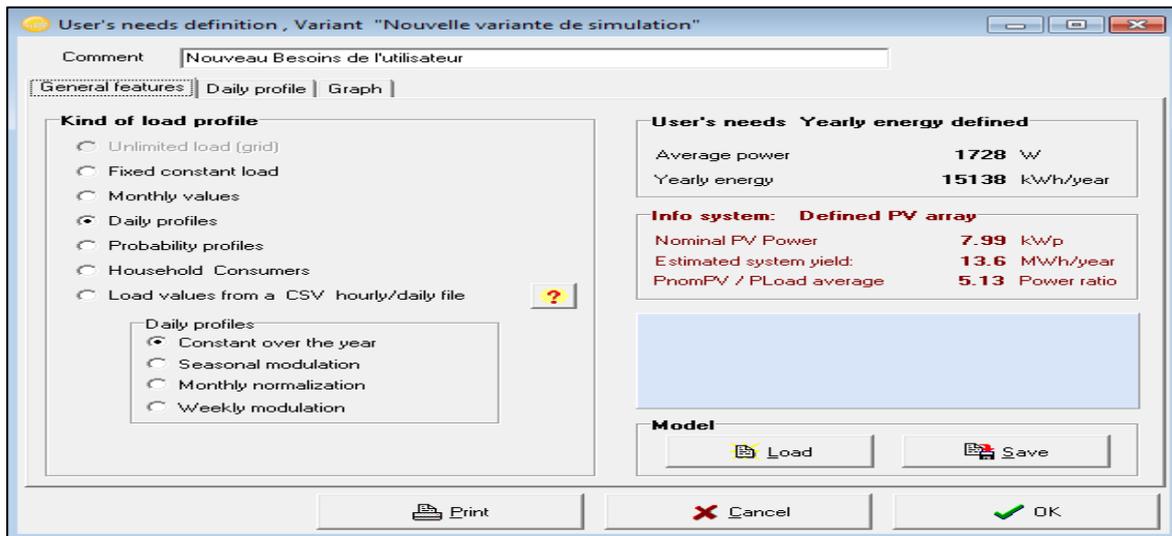


Figure IV.9 : La consommation.

❖ Profil horaire :

Un profil horaire au cours de la journée, afin de mieux correspondre le comportement de la batterie. Donc l'énergie moyenne journalière consommée par cette école est de 41.472 kWh/jr.

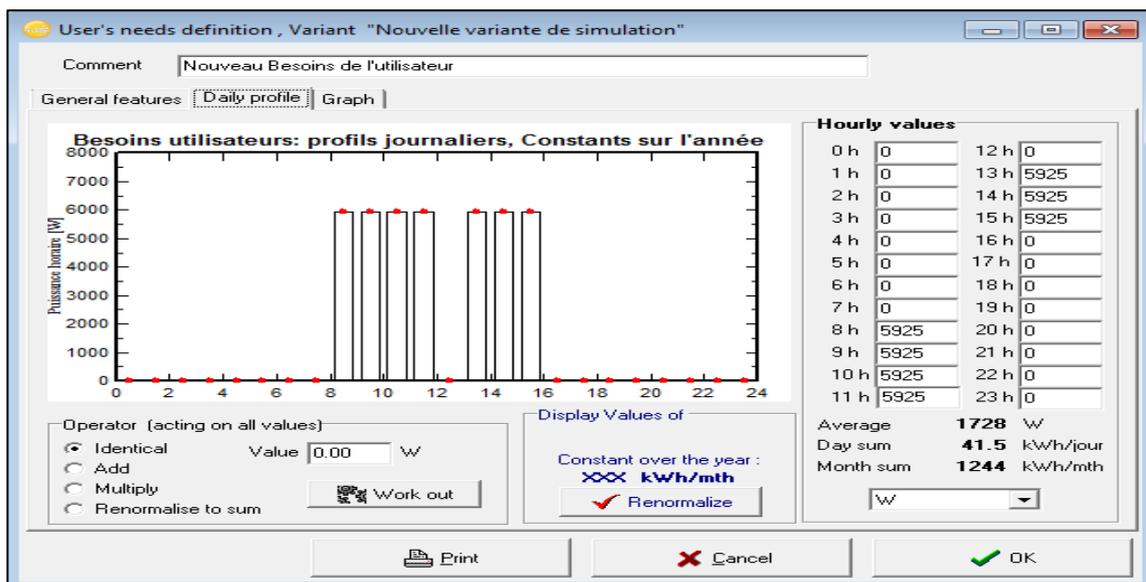


Figure IV.10 : Le profile de charge et le temps d'utilisation.

3. Troisième étape :

❖ Définition du champ photovoltaïque :

Le type de module PV choisi selon la base des données, Le programme détermine le nombre de modules en série ou en parallèle, selon les conditions MPPT de batterie et voltage. Ou puissance PV nécessaire.

On a choisi le type de panneau qui convient à une puissance de 470Wc/182V uCSi-aSi:H puis un convertisseur MPPT de 360W et 95V ; on obtenu comme résultat 17 panneaux pour une surface de 97 m<sup>2</sup> (1 panneaux en série et 17 panneaux en parallèle).

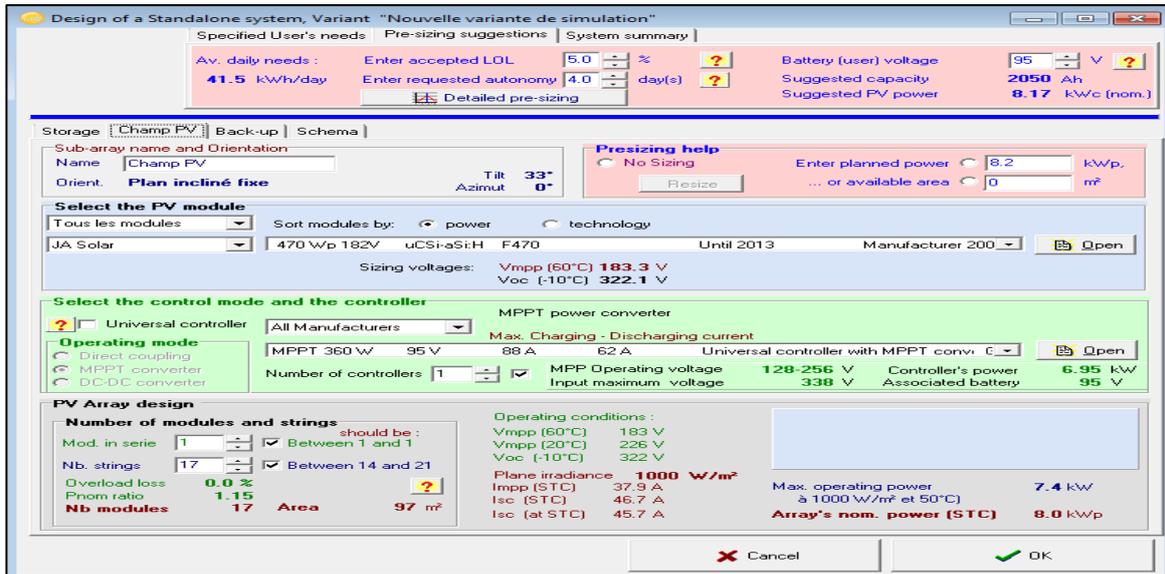


Figure IV.11 : Dimensionnement du champ PV.

❖ Définition de stockage d'énergie :

Le stockage d'énergie est une étape très intéressante pour un système autonome, on a choisi un des batteries Kokam de type Lithium-ion de 51.8V et 120Ah à une température de 20°C ; les nombres des batteries est 34 branchement comme suite : 2 batterie en chaine série et 17 batterie en chaine parallèle pour obtenir à la sortie d'une tension de 95V dont la capacité totale est de 2040 Ah.

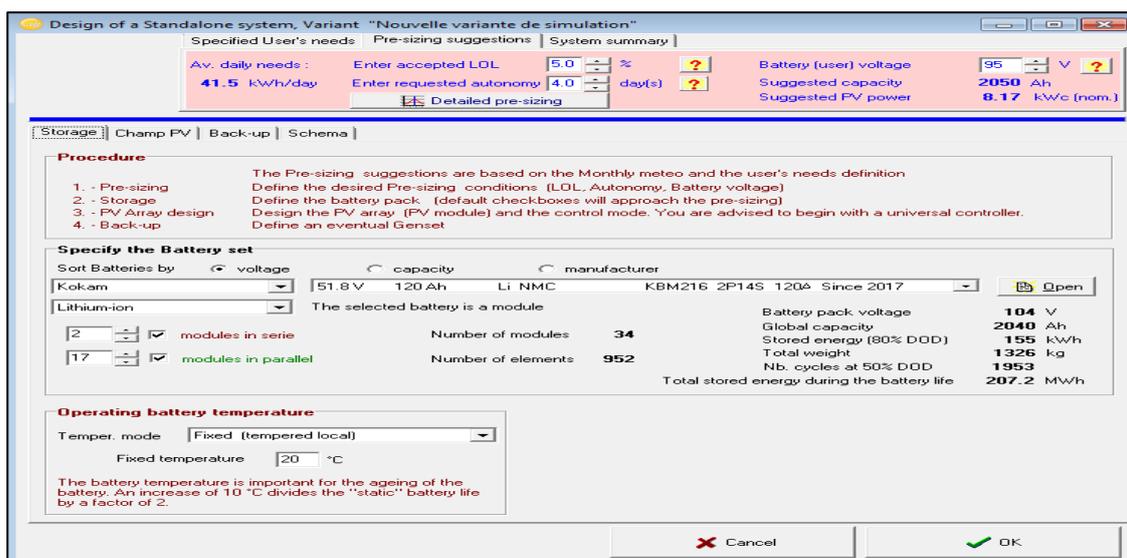


Figure IV.12 : Dimensionnement des batteries.

4. Quatrième étape :

La figure (IV.13) ci-dessus nous montre les branchements complets d'un système photovoltaïque avec un onduleur, un régulateur et des batteries avec les appareils de protection comme le fusible Diode by passe qui est tous reliée à des différents récepteurs.

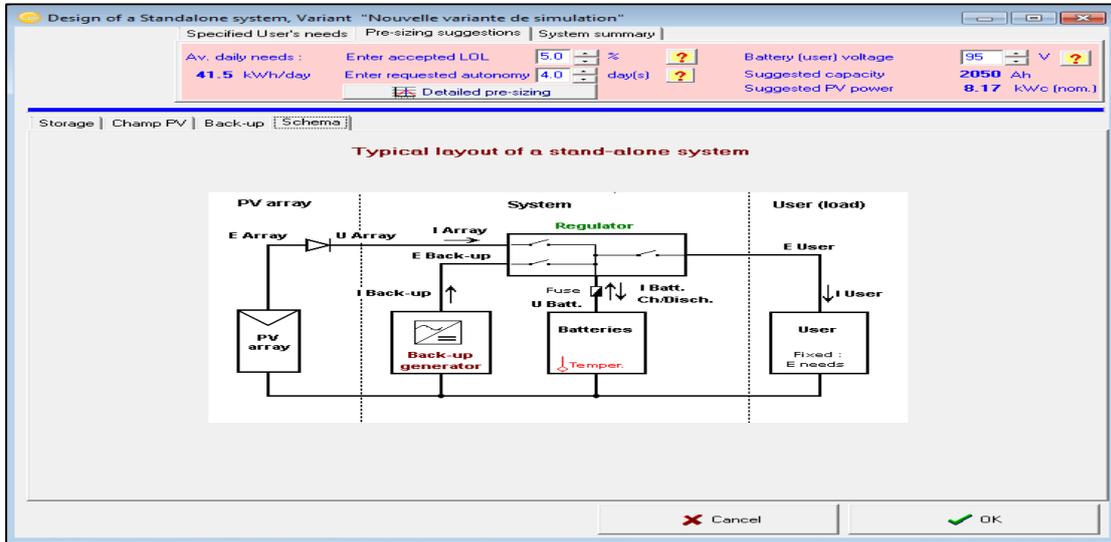


Figure IV.13 : Schéma simplifié d'une centrale PV raccordé à la batterie(PVSYST).

Partie II : Résultats et discussions de la simulation :

IV.II.1. Paramètres du système (Isolé avec batteries) :

Orientation plan capteurs

Inclinaison 33.3°

Azimut 0°

IV.II.1.1. Caractéristiques du champ de capteurs :

Tableau IV.3 : Caractéristiques du champ de capteur :

Module PV	uCSI-aSi:H	
Nombre de modules PV	En série 1 module	En parallèle 17 chaînes
Nombre total de modules PV	Nbre modules 17	Puissance unitaire 470 Wc
Puissance globale du champ	Nominal(STC) 7.99 kWc	Fonct à 50°C 7.36 kWc
Caractéristiques de fonct. à 50°C	U mpp 194 V	I mpp 38 A
Surface totale	Surface modules 97.2 m <sup>2</sup>	

**IV.II.1.2. Caractéristiques du Batterie :**

**Caractéristiques du banc de batteries :** Tension 95 V Capacité nominale 2040 Ah

**Nombre d'unités :** 2 en série x 17 en parallèle

**IV.II.2. Profil de charge :**

**Besoins de l'utilisateur :** profil journalier : Constants sur l'année moyenne 41kWh/Jour.

L'énergie moyenne journalière consommée par l'école est de 41 kWh/jr et On remarque que le max consommation d'électricité enter 08h-15h avec 5925 Wc.

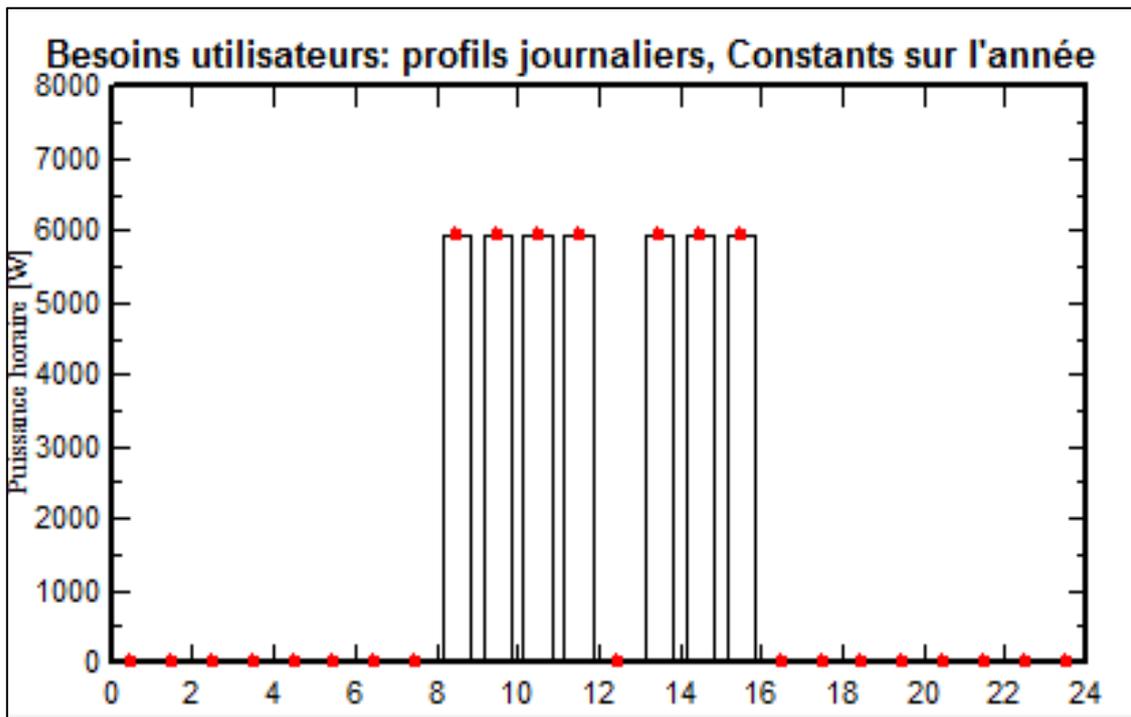


Figure IV.14 : Profil de charge.

**IV.II.3. Performance ratio :**

La figure (IV.15) représente l'indice de performance (Performance Ratio) est le rendement de globale du système défini par le rapport de rendement réel du système par le rendement nominal du système.

- ✓ Dans ce cas l'indice de performance et : 73.5 %
- ✓ Dans ce cas fraction solaire et : 95.7%

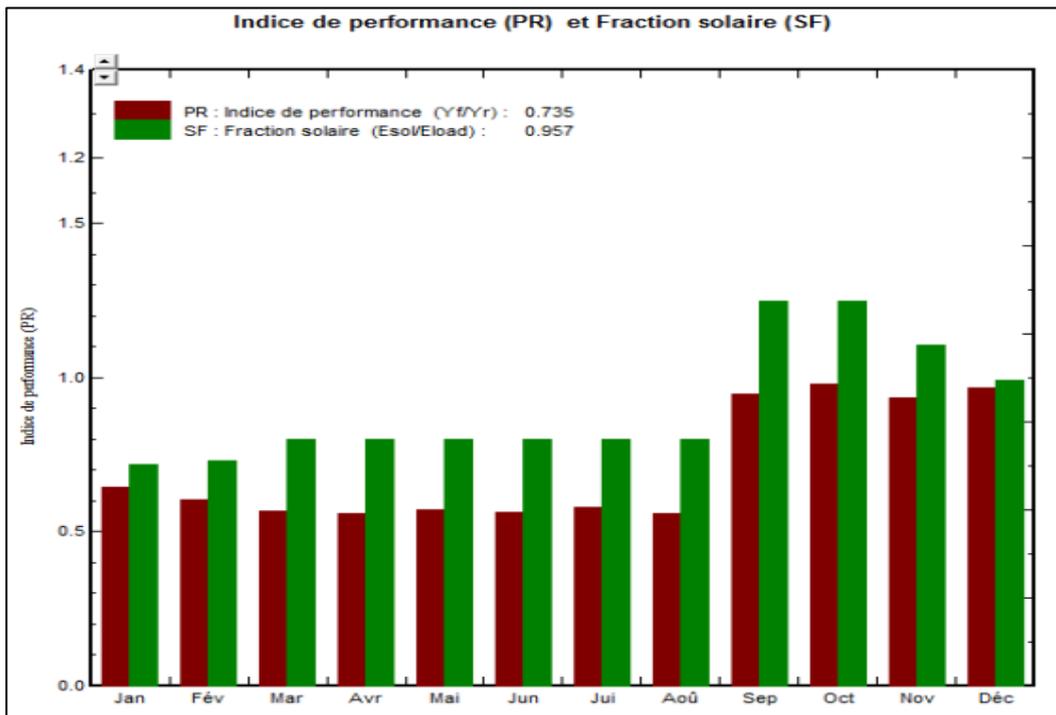


Figure IV.15 : Indice de performance.

**IV.II.4. Les productions normalisées :**

La figure IV.16 est représentée sur la prédiction du système (à la sortie du stockage : Yf).

- ✓ Les pertes **Lc**, **Ls** et **Lu** sont les pertes correspondantes au champ PV.
- ✓ les pertes de système de stockage et l'énergie non utilisée.

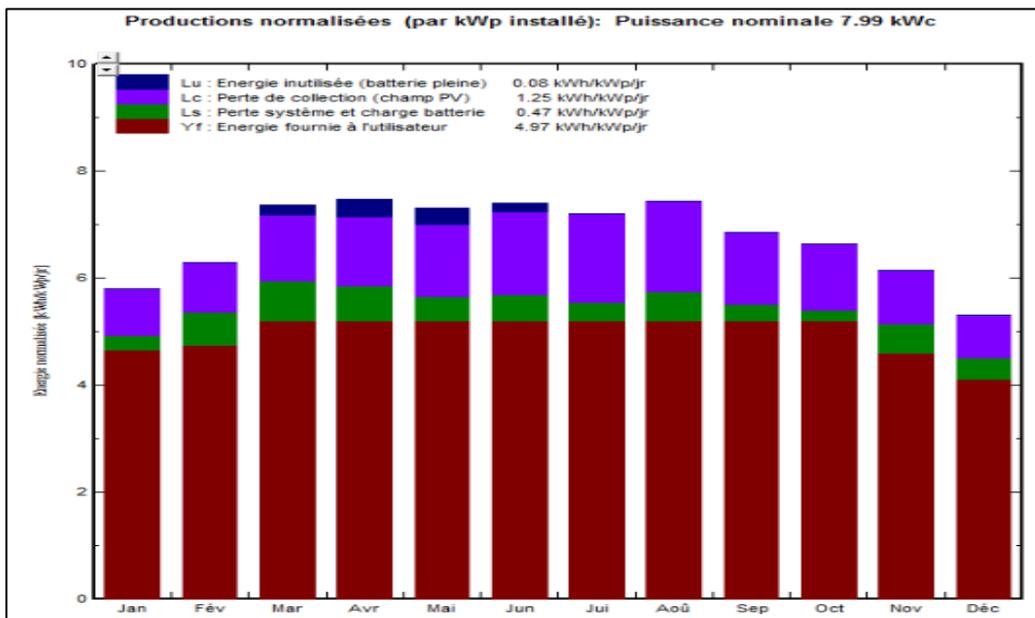


Figure IV.16 : Les productions normalisées.

IV.II.5. Bilan énergétique :

Tableau IV.4 : Bilan énergétique :

Nouvelle variante de simulation Bilans et résultats principaux								
	GlobHor	GlobEff	E Avail	EUnused	E Miss	E User	E Load	SolFrac
	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	
Janvier	110.8	176.1	1136	0.00	133.6	1152	1286	0.896
Février	123.6	172.1	1114	0.05	101.0	1060	1161	0.913
Mars	186.0	223.0	1414	44.10	0.0	1286	1286	1.000
Avril	212.5	217.8	1385	78.49	0.0	1244	1244	1.000
Mai	241.8	219.5	1377	74.87	0.0	1286	1286	1.000
Juin	253.6	214.7	1305	37.66	0.0	1244	1244	1.000
Juillet	247.0	216.0	1279	0.15	0.0	1286	1286	1.000
Août	230.6	223.8	1325	0.10	0.0	1286	1286	1.000
Septembre	180.7	200.2	1227	0.05	0.0	1244	1244	1.000
Octobre	153.2	201.2	1242	0.05	0.0	1286	1286	1.000
Novembre	116.3	180.4	1145	0.00	144.5	1100	1244	0.884
Décembre	99.3	161.3	1039	0.00	267.1	1019	1286	0.792
Année	2155.4	2406.1	14989	235.51	646.3	14492	15138	0.957

IV.II.6. Diagramme des pertes sur l'année entière :

Tableau IV.5 suivant présente les pertes de la production de système PV à savoir : les pertes ohmiques du câblage, effet d'incidence, pertes dues à la température du champ, pertes dues à la qualité des modules. En effet, l'énergie produit par le champ PV (énergie sortie du champ) estimée à 19.31 MWh et réduire à 15.14 MWh à la sortie pour utilisateur.

	Irradiation et énergie	Pertes
<b>Global incident modèle de transposition</b>	2155 KWh/m <sup>2</sup>	12.1 %
<b>Modèle panneaux PV</b>	19.31 MWh	-18.1 %
<b>Pertes de champ PV</b>	15.85 MWh	-6.9 %
<b>Pertes de convertisseur MPPT</b>	14.75 MWh	-3.3 %
<b>Pertes du stockage</b>	14.49 MWh	30.1 %
<b>Besoin d'énergie de l'utilisateur</b>	15.14 MWh	
<b>Energie manquante</b>	0.6 MWh	4.3%

### IV.II.7. Evaluation technico-économique :

**Tableau IV.6 :** Etude technico-économique du système PV autonome.

Les prix de l'équipement utilisé pour l'étude économique sont obtenus auprès des entreprises fabricantes en source : **Amazon, Alibaba** et **Ebay**.

Le tableau suivant présent :

- ✓ Prix des panneaux **JA Solar** (470Wc /182V) : **200€ (20860DZD)**.
- ✓ Prix de batterie **Kokam** (51.8V/120Ah) : **667€ (69568DZD)**.
- ✓ Prix de convertisseur **MPPT** (360W/95V/88A) : **178€ (18565DZD)**.

Le cout total du système photovoltaïque est : **3.671.170 DZD**. Le coût d'investissement pour la mise en oeuvre d'un système photovoltaïque autonome est important.

Désignation	Caractéristique	Quantité	Montant €	Montant DZD
<b>Module</b>	470Wc /182V	17	200	20860
<b>Régulateur (MPPT)</b>	360W/95V/88A	1	178	18565
<b>Batterie</b>	51.8V/120Ah	34	667	69568
<b>Coût d'investissement</b>	/	/	1045	108993
<b>Coût de l'énergie utilisée</b>	/	/	0.01 € / kWh	0.69 DZD/KWh
<b>Coût annuel totale</b>	/	/	96 €/an	10058 DZD /an
<b>Cout totale</b>	/	/	35040 €	3.671.170 DZD

### IV.3. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons établi une étude sur l'installation photovoltaïque autonome cas d'un primaire «Belghazali Mohammed». Nous avons simulé les résultats par logiciel PVSYS qui permet de dimensionner facilement le nombre des panneaux et des batteries, ainsi permet de faire une meilleure estimation des pertes qui peuvent affecter le rendement global.

Les pertes dues au système du stockage et les jours d'autonomie sont très importantes pour le dimensionnement de ce système de stockage. D'où la nécessité d'opter pour une technologie de meilleur rendement possible de ce composant qui représente clé et le plus délicat d'une installation photovoltaïque autonome. Le coût d'investissement pour la mise en oeuvre d'un système photovoltaïque autonome est important.

# Conclusion générale

### Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire concerne une application des plus actuelles de l'énergie renouvelable, celle de l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque.

L'énergie solaire photovoltaïque présente donc un intérêt particulier pour les pays en voie de développement : elle est susceptible d'améliorer très rapidement et moyennant un coût optimal les conditions de vie et de productivité des habitations géographiquement dispersées.

L'objectif général de notre étude est l'approvisionnement en énergie électrique de l'école primaire « Belghazali Mohamed » située au niveau de Naama de la wilaya de Naama, à partir de l'énergie solaire.

Nous avons rappelé dans le premier chapitre le principe de la conversion photovoltaïque ; quelque généralité sur la production de l'énergie photovoltaïque.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement de régulateur de charge, et les différents systèmes de stockage d'énergie électrique, et en particulier les batteries et leur principe de fonctionnement.

Dans le troisième chapitre, nous avons consacré le dimensionnement et la modélisation d'un système photovoltaïque autonome ; nous avons cité les différents types de systèmes PV ; nous avons bien défini le principe de fonctionnement de cette installation.

Afin d'améliorer le dimensionnement et d'optimiser le système en question, on a fait dans le dernier chapitre une application sur le logiciel PVSYST en commençant par le présenter, ensuite d'expliquer précisément les étapes suivies jusqu'à l'obtention des résultats qui nous a permis de connaître la production annuelle de l'énergie, et toute sorte de détail sur les composantes du système et ces résultats sont obtenus avec meilleures perspectives.

Comme perspectives, il serait intéressant de compléter notre travail de simulation et de dimensionnement pour connaître les performances réelles du système photovoltaïque autonome étudié.

D'une manière générale, cette étude a apporté les éléments nécessaires pour la mise en place du dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome.

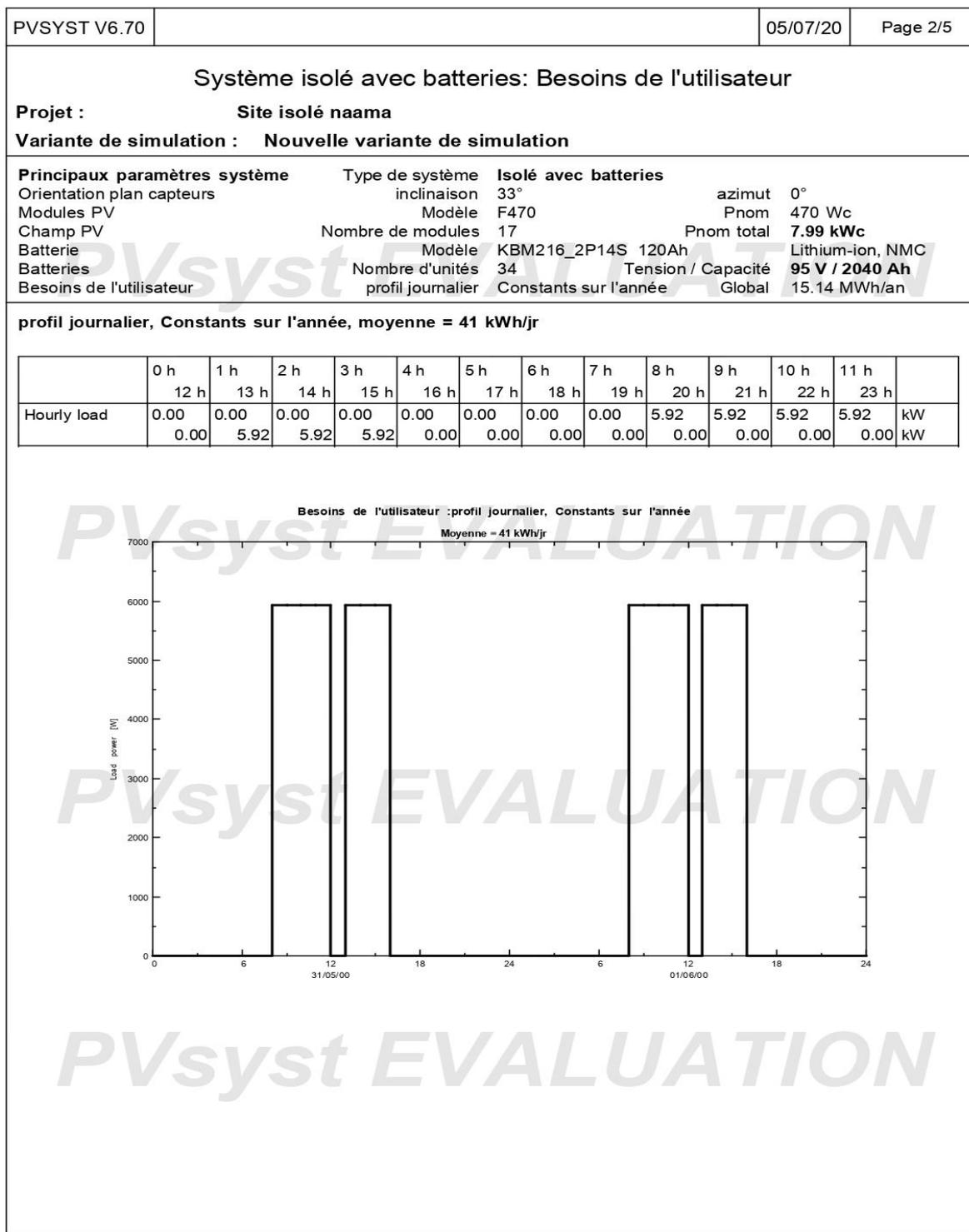
Enfin on étudie l'évaluation économique qui fera l'objet de la rentabilité économique et de l'investissement par rapport au prix de la consommation électrique du réseau électrique.

**Annexe**

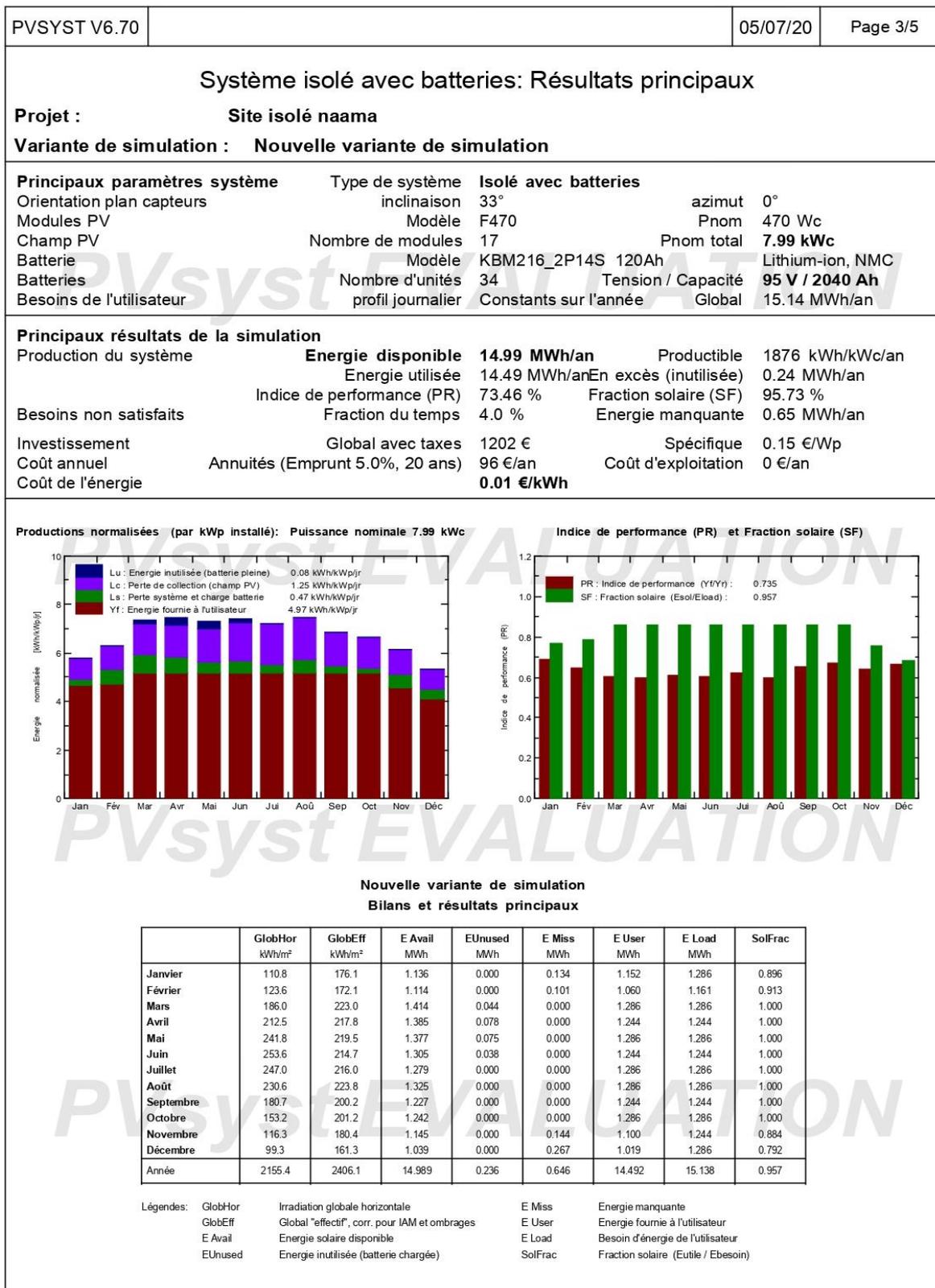
## Annexes 1 : Paramètres de simulation.

PVSYST V6.70		05/07/20	Page 1/5										
<b>Système isolé avec batteries: Paramètres de simulation</b>													
<b>Projet :</b>		<b>Site isolé naama</b>											
<b>Site géographique</b>	<b>Naama</b>	<b>Pays</b>	<b>Algeria</b>										
<b>Situation</b>	Latitude 33.27° N	Longitude	-0.31° W										
Temps défini comme	Temps légal Fus. horaire TU+1	Altitude	27 m										
	Albédo 0.20												
<b>Données météo:</b>	école Belghazali mohammed-naama- Site / CDER-DATA2020 - Synthétique												
<b>Variante de simulation :</b> Nouvelle variante de simulation													
	Date de la simulation	05/07/20 à 13h11											
<b>Paramètres de simulation</b>	Type de système	<b>Stand-alone system</b>											
<b>Orientation plan capteurs</b>	Inclinaison	33°	Azimut 0°										
<b>Modèles utilisés</b>	Transposition	Perez	Diffus Perez, Meteonorm										
<b>Caractéristiques du champ de capteurs</b>													
<b>Module PV</b>	uCSi-aSi:H	Modèle	<b>F470</b>										
Original PVsyst database		Fabricant	Sunfilm										
Nombre de modules PV		En série	1 modules										
Nombre total de modules PV		Nbre modules	17										
Puissance globale du champ		Nominale (STC)	<b>7.99 kWc</b>										
Caractéristiques de fonct. du champ (50°C)		U mpp	194 V										
Surface totale		Surface modules	<b>97.2 m<sup>2</sup></b>										
		En parallèle	17 chaînes										
		Puissance unitaire	470 Wc										
		Aux cond. de fonct.	7.36 kWc (50°C)										
		I mpp	38 A										
<b>Facteurs de perte du champ PV</b>													
Fact. de pertes thermiques	Uc (const)	20.0 W/m <sup>2</sup> K	Uv (vent) 0.0 W/m <sup>2</sup> K / m/s										
Perte ohmique de câblage	Rés. globale champ	91 mOhm	Frac. pertes 1.5 % aux STC										
Perte diode série	Chute de tension	0.7 V	Frac. pertes 0.3 % aux STC										
Perte de qualité module			Frac. pertes 2.5 %										
Perte de "mismatch" modules			Frac. pertes 0.8 % 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>KBM216_2P14S 120Ah</b>											
	Fabricant	Kokam											
Caractéristiques du banc de batteries	Tension	95 V	Capacité nominale 2040 Ah										
	Nombre d'unités	2 en série x 17 en parallèle											
	Température	Fixée (20°C)											
<b>Régulateur</b>	Modèle	Universal controller with MPPT converter											
	Technologie	MPPT converter	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											
	Décharge	SOC = 0.20 / 0.45											
<b>Besoins de l'utilisateur :</b>	profil journalier	Constants sur l'année											
	moyenne	41 kWh/Jour											
	0 h	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	7 h	8 h	9 h	10 h	11 h	
	12 h	13 h	14 h	15 h	16 h	17 h	18 h	19 h	20 h	21 h	22 h	23 h	
Hourly load	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.92	5.92	5.92	5.92	kW
	0.00	5.92	5.92	5.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	kW

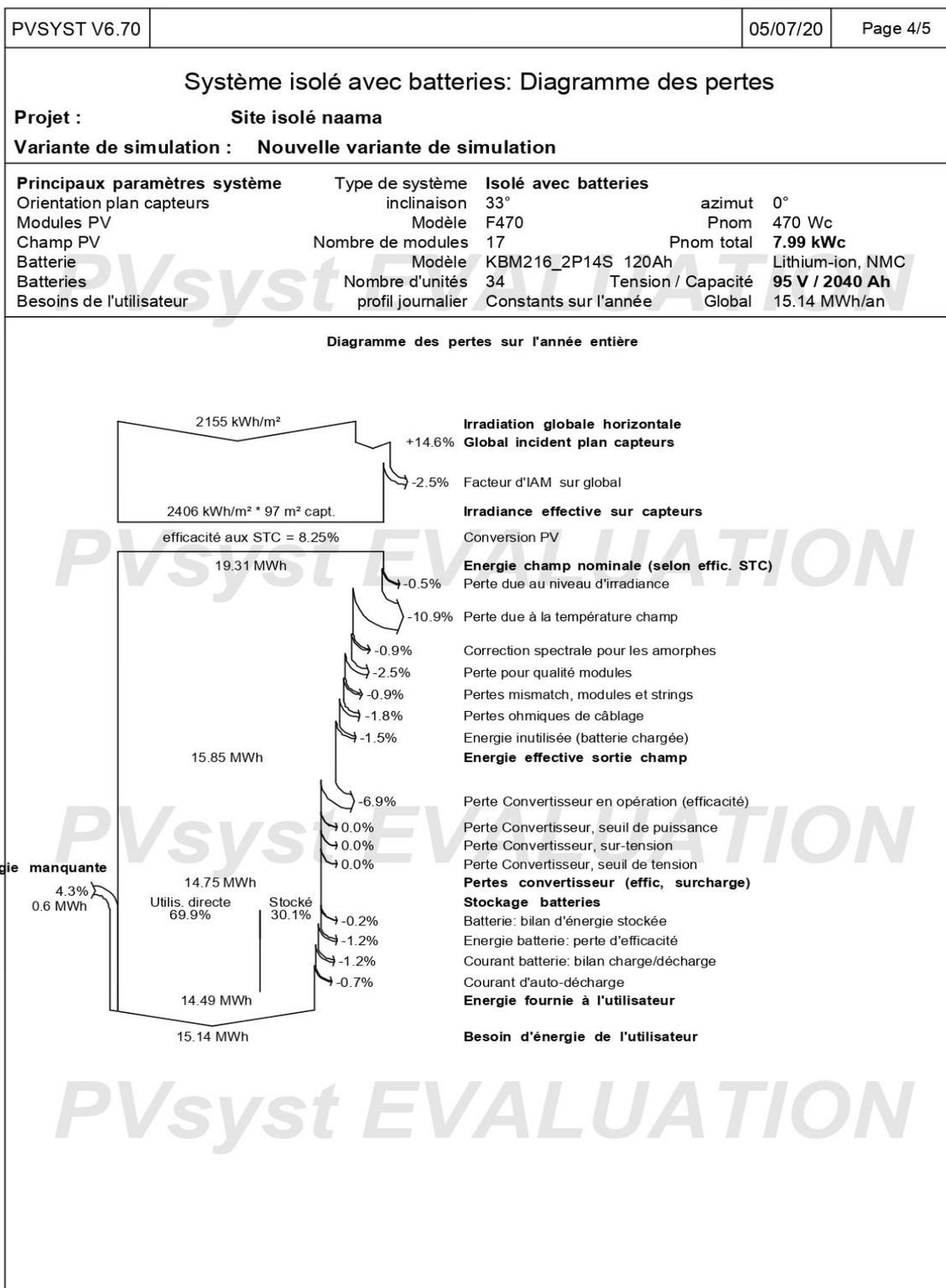
## Annexes 2 : Besoins de l'utilisateur.



## Annexes 3 : Résultats principaux.



## Annexes 4 : Diagramme des pertes.



## Annexes 5 : Evaluation économique.

PVSYST V6.70		05/07/20	Page 5/5
<b>Système isolé avec batteries: Evaluation économique</b>			
<b>Projet : Site isolé naama</b>			
<b>Variante de simulation : Nouvelle variante de simulation</b>			
<b>Principaux paramètres système</b>	<b>Type de système</b>	<b>Isolé avec batteries</b>	
Orientation plan capteurs	inclinaison	33°	azimut 0°
Modules PV	Modèle	F470	Pnom 470 Wc
Champ PV	Nombre de modules	17	Pnom total <b>7.99 kWc</b>
Batterie	Modèle	KBM216_2P14S 120Ah	Lithium-ion, NMC
Batteries	Nombre d'unités	34	Tension / Capacité <b>95 V / 2040 Ah</b>
Besoins de l'utilisateur	profil journalier	Constants sur l'année	Global 15.14 MWh/an
<b>Investissement</b>			
Modules PV (Pnom = 470 Wc)	17 unités	12 € / unité	200 €
Supports et intégration		0 € / module	0 €
Batteries ( 52 V / 60 Ah)	34 unités	20 € / unité	667 €
régulateur			178 €
Construction, câblage, ...			0 €
Moins-value substitution			0 €
<b>Investissement brut (sans taxes)</b>			<b>1045 €</b>
<b>Financement</b>			
Investissement brut (sans taxes)			1045 €
Taxes sur l'investissement (TVA)	Taux 15.0 %		157 €
Investissement brut (TTC)			1202 €
Subventions			0 €
<b>Investissement net (TTC)</b>			<b>1202 €</b>
Annuités	( Emprunt 5.0 % sur 20 ans)		96 €/an
Entretien			0 €/an
assurance, taxes annuelles			0 €/an
Provision remplacement batteries	(durée de vie 5.0 ans)		0 €/an
<b>Coût annuel total</b>			<b>96 €/an</b>
<b>Coût de l'énergie</b>			
Energie solaire utilisée			14.5 MWh / an
Energie en excès (batterie pleine)			0.2 MWh / an
Coût de l'énergie utilisée			0.01 € / kWh
<b>PVsystem EVALUATION</b>			

Module (panneau) : 470Wc/182V



Batterie : 51.8V/120Ah



Régulateur (convertisseur MPPT) : 360W/95V.



# Bibliographie

### Bibliographie :

- [1] GASSAB Samir. (2019). Gestion d'énergie d'une centrale à énergie renouvelable hybride dédiée à l'alimentation d'un site isolé. Thèse de doctorat. Université Ferhat Abbas – Sétif1
- [2] Besson, Pierre, (2016). Compréhension des comportements électrique et optique des modules photovoltaïques à haute concentration, et développement d'outils de caractérisations adaptés. Thèse de doctorat. Université de Lyon.
- [3] Bandou, Farida, (2016). Contribution à l'analyse des performances électriques et thermiques des modules photovoltaïques de différentes technologies. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.
- [4] Bouakra, Abdellah, (2016). Impact et régulation de la tension à la suite d'insertion d'énergie renouvelable dans les réseaux de distribution électrique. Thèse de doctorat. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- [5] Brahami Imen, (2018). Optimisation du fonctionnement d'un générateur photovoltaïque par guidage automatique des panneaux solaires. Thèse de doctorat. Université Djillali liabes de Sidi-Bel-Abbès.
- [6] Djilat Zahra et Bouras Sarra, (2019). Méthodes de dimensionnement d'un système photovoltaïque, application à la région de M'sila. Mémoire de master. Université Mohamed Boudiaf - M'SILA.
- [7] Bouima Haithem, (2019). Elaboration et Caractérisation de Couches Minces de Cu (In,Ga)(Se,S)<sub>2</sub> destinées au Photovoltaïque. Thèse de doctorat. Université Ferhat Abbas – Setif 1.
- [8] Bouchakour Abdelhak, (2018). Modélisation et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque. Thèse doctorat. Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès.
- [9] Benmoussa Fouad, (2015). Optimisation des paramètres d'un modèle électrique d'une cellule photovoltaïque. Thèse de doctorat. Université Amira-Bejaia.
- [10] Khenfer Riad, (2015). Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques. Thèse de doctorat. Université Ferhat Abbas - Sétif 1
- [11] Naim Hocine, (2016). Etude de gestion d'une mini-centrale solaire et mise au point d'un dispositif automatique de mesures, contrôles et régulation de l'énergie électrique. Thèse de doctorat. Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.
- [12] Farid BENHADDOU, (2017). Etats et transitions excitoniques dans les points quantiques inhomogènes à base de InSb, HgS et GaSb. Thèse de doctorat. Université Sidi Mohammed Ben Abdillah, Fès(Maroc).

- [13] SADOK Mohammed, (2011). Détermination des Paramètres, Performances et Etude de la Dégradation des Modules Photovoltaïques en milieu saharien. Thèse de doctorat. Université Aboubakr BELKAÏD – TLEMEN.
- [14] Mohand CHERIFI, Houa OUNOUH, (2018). Étude du refroidissement par eau d'un panneau solaire photovoltaïque. Mémoire master. Université mouloud mammeri de Tizi-Ouzou
- [15] Benbouza Chaouki, (2014). Production et performance des capteurs hybrides (PV/T) à eau intégrés dans le bâtiment-cas de l'Algérie. Mémoire de magister, Université Constantine I.
- [16] Slama Fateh, (2011). Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique. Magister En Electrotechnique. Université Ferhat Abbas - Setif-
- [17] Debili Narimene, (2015). Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage photovoltaïque. Mémoire de magister. Université Constantine I.
- [18] Amara Karima, (2015). Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension. Mémoire de magister. Université mouloud mammeri de Tizi-Ouzou.
- [19] Saad Saoud Merwan, (2017). Optimisation de la gestion de l'énergie photovoltaïque utilisée dans une zone agricole. Thèse doctorat. Université Badji Mokhtar – Annaba.
- [20] LE BORGNE Damien, (2016). Photovoltaïque Organique : étude des interactions électroniques aux interfaces des hétérojonctions organiques. Thèse de doctorat. Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier).
- [21] <http://www.photovoltaïque-organique.com/cellule-photovoltaïque-organique/>
- [22] Meziani Zahra, (2012). Modélisation de modules photovoltaïques. Memoire de magister. Université de Batna.
- [23] Tamer, Khatib. Wilfried, Elmenre. Modeling of photovoltaic systems using matlab. Canada : Wiley, 2016. 226.
- [24] Abbassen Lyes, (2011). Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque. Mémoire de magister. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.
- [25] Tchouar Ilhem. Etude, Modélisation, Simulation de cellule solaire Organique. Thèse de doctorat. Université Abou-Bekr Belkaïd – Tlemcen.
- [26] Makhloufi Salim, (2013). Contribution à l'optimisation des installations photovoltaïques par des commandes intelligentes. Thèse de doctorat. Université hadj Lakhdar Batna.
- [27] Thomas, Mambrini. Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies. Thèse de doctorat. Université de Paris-sud, France, 2014.
- [28] Amer Hamzaoui,(2012). Effet de l'illumination sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires au silicium polycristallin. Mémoire de magister. Université Ferhat Abbas – Setif.

- [29] Miloudi Lalia, (2012). Etude et simulation de la poursuite de la trajectoire du soleil par un panneau solaire photovoltaïque. Mémoire de magister. Université M'hamed Bougara – Boumerdes.
- [30] Helali Kamelia, (2012). Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative. Mémoire de magister. Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [31] FEDDAOUI Omar, (2014). Contribution à l'étude des systèmes hybrides de génération : application aux énergies renouvelables. Mémoire de magister. Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras.
- [32] Maifi Lyes, (2018). Etude et modélisation d'un panneau solaire thermique photovoltaïque. Thèse de doctorat. Université Frères Mentouri Constantine 1
- [33] Doumane Radhia, (2018). Modélisation du vieillissement d'une cellule photovoltaïque au silicium et de ses matériaux d'encapsulation. Thèse de doctorat. Université M'hamed Bougara-Boumerdes
- [34] Belkaid Abdelhakim, (2015). Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique. Magister En Electrotechnique. Université Ferhat Abbas - Sétif.
- [35] Nathalie Devellers, (2012). Caractéristique et modélisation de composant de stockage électrochimique et électrostatique. Thèse de doctorat. Université de Franche-Comté.
- [36] Mohamed Ansoumane Camara, (2011). Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs. Thèse de doctorat. Université Paris-Est.
- [37] Yacine Fouad, (2011). (Etude des nouvelles générations de cellules photovoltaïques). Mémoire de magister. Université Des Sciences et de le Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf (USTO.MB).
- [38] Dib Wassila, (2010). Modélisation des structures photovoltaïque : aspects et fondamentaux et applique ». Thèse de Doctorat. Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen.
- [39] Belhadj Mohammed, (2008). (Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome). Mémoire de Magister. Centre Universitaire de Bechar Institut des Sciences Exactes.
- [40] Sylvain Brigand, (2011). « Installations Solaires Photovoltaïque (dimensionnement de l'installation et mise en oeuvre maintenance », Edition le moniteur (paris).
- [41] Valerie Léger, (2009). « Conversion d'énergie électrotechnique électronique de puissance» 3eme édition.
- [42] Bendjamâa Ibrahim, (2012). Modélisation et commande d'un système De stockage photovoltaïque. Mémoire de magister. Université Abou-Bakr Belkaid –Tlemcen.
- [43] Brihmat Fouzia, (2012). (L'étude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV/Eolien). Mémoire magister. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [44] [www.photovoltaique.guidenr.fr](http://www.photovoltaique.guidenr.fr), « Les régulateurs de charge », « Dimensionnement des onduleurs » et « câblage des modules photovoltaïque ».

- [45] A. Kouam, et G. Tchuen. (2015.) Optimisation d'un système hybride de production d'énergie pour site isolé : cas de la ville de Ngaoundéré. *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 18 N°4, 529 – 538.
- [46] Ahmed Faheem Zobaa, (2013). *Energy storage technologies and applications*. Edited by Ahmed Faheem Zobaa, Croatia
- [47] Toufik Azib, (2010). « Contribution à l'Etude d'Electro-générateurs à Pile à Combustible » Ecole Doctorale « Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes ». Thèse doctorat.
- [48] Joris jaguemont, (2015). *Gestion thermique d'un pack de batteries lithium - ion en conditions hivernales incluant le vieillissement*. Thèse de doctorat. Université du Québec à Trois-Rivières.
- [49] BOUTTE Aïssa, (2015). *Identification des paramètres internes d'une batterie pour des applications photovoltaïques*. Thèse de doctorat. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf « USTO-MB ».
- [50] FREDERIC COUPAN, (2017). *Stockage pour les énergies renouvelables : évaluation et modélisation de la batterie plomb-acide*. Thèse de doctorat. Université de Guyane.
- [51] Akassewa Tchapo SINGO, (2010). *Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome*. Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré - Nancy 1, Français.
- [52] DERAFA Imad, (2018). *Comportement électrochimique de PbO<sub>2</sub> en milieu sulfurique : Etude comparative entre les deux variétés chimique et électrochimique*. Thèse de doctorat. Université Ferhat Abbas Setif-1.
- [53] BOUDIEB Naima, (2018). *Influence de la composition des plaquettes en plomb (Pb) et du milieu sur le processus de charge et de décharge des batteries plomb-acide*. Thèse de doctorat. Université M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES.
- [54] <https://rema.energy/>
- [55] Thomas B reddy, (2011). *Linden's Handbook of Batteries*, 4ème Ed, mcgraw Hill, David Linden. New York.
- [56] Moulay Fatima, (2011). *Structure électronique des sels de lithium : impacts sur le fonctionnement des batteries Li/Li+ à basse température*. Mémoire de magister. Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.
- [57] Sara abada, (2016). *Compréhension et modélisation de l'emballage thermique de batteries Li-ion neuves et vieilles*. Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie.
- [58] Akram Eddahech, (2013). *Modélisation du vieillissement et détermination de l'état de santé de batteries lithium-ion pour application véhicule électrique et hybride*. Thèse de doctorat. Université Bordeaux 1.

- [59] MADACI BOUTHAINA. (2018). Architectures intégrées de gestion de l'énergie pour les multi systèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs. Thèse de doctorat. Université des Frères Mentouri Constantine.
- [60] AZZI Halim, (2016). Etude et modélisation d'une pile à combustible. Mémoire de magister. Université A. MIRA-BEJAIA.
- [61] Ammar DJERIOUI. (2018). Etudes des stratégies et des structures de commande pour les systèmes d'électro-générateurs. Thèse de doctorat. Université Mohamed Boudiaf m'Sila.
- [62] Haroun Aouzellag, (2017). Optimisation de la gestion énergétique des véhicules hybrides. Thèse doctorat .Université A.MIRA BEJAIA.
- [63] SAIB Samia. (2018). Contribution à l'optimisation d'un système hybride (PV/éolien) avec stockage d'énergie connecté au réseau électrique. Thèse de doctorat. Université Ferhat Abbas Sétif 1.
- [64] Eric Korsaga, Zacharie Koalaga, Dominique Bonkoukou, François Zougmor .Comparaison et détermination des dispositifs de stockage appropriés pour un système photovoltaïque autonome en zone sahélienne. Vol. 4, n°1, 3, 2018. Journal international de technologie, de l'innovation, de la physique, de l'énergie et de l'environnement.
- [65] Cinda Luz SANDOVAL TORRES, (2016). Contrôle d'une source d'énergie hybride : Pile à combustible, Super-condensateur. Thèse de doctorat. Paris.
- [66] S. Pelissier, (2012). « Introduction au vieillissement des batteries Lithium-ion et aux protocoles expérimentaux de test de durée de vie », hal-01228457, IFSTTAR.
- [67] Bouchakour Salim, (2015). Contribution à l'étude et commande d'un couplage des systèmes hybrides (réseau et photovoltaïque) pour la production d'énergie électrique. Thèse de doctorat. Université DJILLALI LIABS de SIDI-BEL-ABBES.
- [68] Cédric Abbezzot, (2014). Système inertiel de stockage d'énergie couplé au générateur photovoltaïque et piloté par un simulateur temps réel. Mécanique [physics]. Université Pascal Paoli, Français.
- [69] Charan, C. R., Laxmi, A. J., & Sangeetha, P. (2017). Optimized Energy Efficient Solution with Stand Alone PV System. MATTER: International Journal of Science and Technology, 3(1), 16-27.
- [70] Boualem BENDIB, (2017). Une nouvelle approche de modélisation et de commande des systèmes photovoltaïques autonomes. Thèse de doctorat. Université ferhat abbas — Setif 1.
- [71]KADRI Ahmed, (2011). Simulation des performances d'une mini centrale électrique multi-sources alimentant une ferme agricole saharienne. Thèse de magister. Ecole Nationale Supérieure Agronomique – El-Harrach – Alger
- [72] [https://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Installation\\_photovolt%C3%AFque\\_autonome](https://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Installation_photovolt%C3%AFque_autonome)

- [73] S.A. Derai et A. Kaabeche, (2016). Modélisation et dimensionnement d'un système hybride Eolien/ Photovoltaïque autonome. Revue des Energies Renouvelables Vol. 19 N°2 page 265 - 276
- [74] KEBAILI Salima, (2017). Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque autonome : Optimisation et application aux sites algériens. Thèse de doctorat. Université DES FRERES MENTOURI DE CONSTANTINE 1
- [75] <https://www.transtech-africa.de/fr/photovoltaique/systemes.htm>
- [76] Boutlilis Fatima, (2018). Modélisation et simulation des sources de production décentralisée Application à l'intégration d'un générateur PV à stockage dans un réseau électrique, thèse de doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem
- [77] <https://www.emeraude-solaire.com/nos-partenaires-techniques.php>
- [78] AbdouL Karim Traoré, (2016). Gestion d'un système autonome hybride photovoltaïque éolien pour applications agricoles. Mémoire. Université du Québec à Trois-Rivières
- [79] <https://www.systemespv.com/Systemes+hybrides>
- [80] Fatiha, T. R. A. H. I, (2011). Prédiction de l'irradiation solaire globale pour la région de Tizi-Ouzou par les réseaux de neurones artificiels. Application pour le dimensionnement d'une installation photovoltaïque pour l'alimentation du labo de recherche LAMPA (Doctoral dissertation, Université Mouloud Maameri de Tizi Ouzou.
- [81] Rick DEGUNTHER, (2008). "Solar Power Your Home for DUMMIES" livre édité par: Wiley Publishing.
- [82] FERRAH BILLEL, (2015). Etude d'un système Hybride (photovoltaïque –éolien). Mémoire master. Université Badji Mokhtar Annaba.
- [83] Salaheddine MANSOURE, (2014). Etude de Dimensionnement optimal d'une station solaire autonome en site isolé. Mémoire master. Université Abou-Bakr Belkaïd Tlemcen.
- [84] MATALLAH Sorya, (2015). «Dimensionnement et simulation d'un système photovoltaïque pour alimenter un habitat dans la wilaya d'Ouargla». Mémoire de master. Université Kasdi Merbah d'Ouargla.
- [85] Christian Matulu, (2010). Etude et dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome pour une alimentation permanente. Mémoire online. Université de Lubumbashi - Graduat en sciences appliquées.
- [86] ZIDANE Ammar, (2012). «Etude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque au niveau d'un puits de gaz». Mémoire de master. Université Abderrahmane Mira de Bejaïa.

- [87] IAMARENE Samir, (2012). «Dimensionnement d'une installation photovoltaïque pour un site (BTS, BSC) du réseau télécom watania». Mémoire de master. Université Abderrahmane Mira de Bejaia.
- [88] DJILAT Zahra et BOURAS Sarra, (2019). Méthodes de dimensionnement d'un système photovoltaïque, application à la région de M'sila. Mémoire master. Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA.
- [89] B.ChIKH-BLED, I.SARI-ALI Et B. BENYOUCEF, (2010). « Méthode de dimensionnement optimal d'une installation photovoltaïque »Revue Internationale technique, N° 41 page 25-30, Université Abou-Bakr Belkaïd, Faculté des Sciences.
- [90] DHAKER Abbes, (2012). « Contribution au dimensionnement et à l'optimisation des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques avec batteries pour l'habitat résidentiel autonome ». Thèse de doctorat. Université de Poitiers, Disponible sur Internet <<http://theses.univ-poitiers.fr>>.
- [91] [http://bibfac.univ-tlemcen.dz/bibfs/opac\\_css/doc\\_num.php?explnum\\_id=277](http://bibfac.univ-tlemcen.dz/bibfs/opac_css/doc_num.php?explnum_id=277)
- [92] MERAD Souheyla née MAMOUN, (2010). « Dimensionnement d'une installation photovoltaïque d'un lieu peu fréquenté: Cas d'un Cabanon Situé à Marsat Ben M'Hidi (TLEMEN) ». Mémoire de master. Université Abou-Bakr Belkaidde Tlemcen.
- [93] BOUKHLIF Hamza, (2017). « Dimensionnement technique d'une installation photovoltaïque de 300kw ». Mémoire de master. Université M'hamed Bougara de Boumerdes.
- [94] KHECHAFI Sofiane, BENLAACHI Salah, (2019). Calcul et dimensionnement électrique d'une minicentrale photovoltaïque autonome. Mémoire de master. Ecole supérieure en sciences appliquées.
- [95] Fellah Nadia, Sidibe Oumar, (2019). Etude et dimensionnement de l'installation photovoltaïque du DECANAT de la faculté ST. Mémoire master. Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem.
- [96] BENKHERIF Abdelbacet SEDDIKI Benyoucef, (2018).Etude technico économique d'un système photovoltaïque en site isole par PVSYST. Mémoire de master. Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA