



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

D'ANTANANARIVO

Département Mines

PARCOURS : GEO-ENERGIE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER d'Ingénierie

Intitulé

**Conception, dimensionnement et réalisation partielle
d'un système solaire photovoltaïque pouvant satisfaire
aux besoins en électricité d'une maison rurale**



Présenté par :

NGOUMDOUM FOUMOUO Dominique

Date de soutenance : 05 Septembre 2015

Promotion: 2014-2015



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
D'ANTANANARIVO
Département Mines
PARCOUS : GEO-ENERGIE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master d'Ingénierie

Intitulé

**Conception, dimensionnement et réalisation partielle d'un
système solaire photovoltaïque pouvant satisfaire
aux besoins en électricité d'une maison rurale**

Présenté par :

Monsieur NGOUMDOUM FOUMOUO Dominique



Devant le Jury composé de :

Président: Mr. RANDRIANJA Roger

Professeur Titulaire

Rapporteur : Mr. RAKOTONINDRAINY

Professeur Titulaire

Examineurs: Mr. ANDRIANAIVO Lala

Professeur

Mr. RANAIVOSON Léon Felix

Maître de Conférences

Mr. RANOARIVONY Andrianjoelimahefa

Maître de Conférences

Honoré

Promotion : 2014-2015

DEDICACE

A

ma mère DEMANO Rebecca ;

et à la mémoire de

mon père FOUMOOUO Lucas ;

maman YEMFACK Lydie ;

mon grand frère DJ

REMERCIEMENTS

Ce travail a été mené jusqu'à son terme par la grâce de Dieu tout-puissant à qui je rends toute la gloire.

Je tiens à adresser du profond de mon cœur des remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce mémoire. J'exprime ainsi toute ma reconnaissance :

- ✧ au projet PAFROID, qui m'a permis d'accéder à la formation en Géo-énergie ;
- ✧ au Pr. RAKOTONINDRAINNY, responsable du parcours Géo-énergie qui a gracieusement accepté d'encadrer ce travail malgré ses multiples sollicitations, pour sa rigueur dans le travail bien fait et tous les conseils qu'il a apportés pour mon amélioration dans la recherche ; qu'il trouve en ces mots mes sincères remerciements ;
- ✧ au Pr RANDRIANJA Roger, Vice-Président de l'Université d'Antananarivo d'avoir accepté de présider ce jury;
- ✧ aux Pr ANDRIANAIVO Lala, RANAIVOSON Léon Felix et RANOARIVONY Honored d'avoir accepté d'évaluer et de corriger ce travail ;
- ✧ à tous les enseignants du Département des MINES (Parcours Géo-énergie) pour l'intérêt qu'ils accordent en permanence à la formation des jeunes et pour les enseignements dispensés ;
- ✧ à tous mes camarades de promotion, que DIEU nous réserve toujours de très belles surprises ;
- ✧ une mention particulière va à l'endroit de mes grands frères et mes grandes sœurs pour tous les efforts et sacrifices consentis pour ma prospérité. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance entière ;
- ✧ à mes petits frères et mes petites sœurs pour leur soutien moral et surtout pour tous les espoirs placés en moi, trouvez en ce travail l'exemple à suivre et à dépasser ;
- ✧ que tous ceux dont les noms n'apparaissent pas ici, mais qui ont contribué de près ou de loin à mon édification et à la réalisation de ce mémoire trouvent en lui le témoignage de ma profonde gratitude et un mobile pour leur satisfaction.

TABLE DES MATIERES

DEDICACE	i
REMERCIEMENTS	ii
LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES ABREVIATIONS	vii
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : Généralités sur les énergies	3
Introduction	3
I.1-Energies fossiles et fissiles	3
<i>I.1.1- Charbon</i>	3
<i>I.1.2- Pétrole</i>	5
<i>I.1.3- Gaz naturel</i>	6
<i>I.1.4- Nucléaire (énergie fissile)</i>	6
I.2-Energies renouvelables	8
<i>I.2.1- Energie hydraulique</i>	8
<i>I.2.2- Marémotrice</i>	10
<i>I.2.3- Energie éolienne</i>	13
<i>I.2.4- Biomasse et les déchets</i>	15
<i>I.2.5- Géothermie</i>	17
<i>I.2.6- Solaire</i>	19
<i>I.2.6.1- Soleil</i>	19
<i>I.2.6.2- Historique</i>	21
Conclusion	23
CHAPITRE II : Méthodologie de conception et dimensionnement	24
Introduction	24
II.1- Généralités sur les étapes de fabrication de la cellule	24
<i>II.1.1- Raffinage du silicium</i>	25
<i>II.1.2- Cristallisation du silicium et la mise en forme des plaques</i>	26
<i>II.1.3- Fabrication des cellules</i>	27
II.2- Méthodologie de conception, principes et dimensionnement	30
II.2.1- Conception	30
II.2.2.- Principes	31
II.2.3- Dimensionnement	32
<i>II.2.3.1-Bilan des puissances ou besoins en électricité</i>	32
<i>II.2.3.2-Puissance crête adéquate du module photovoltaïque</i>	33
<i>II.2.3.3- Dimensionnement de la batterie</i>	39

II.2.3.4- Dimensionnement du régulateur	43
II.2.3.5- Dimensionnement du convertisseur de courant.....	44
II.2.3.6- Dimensionnement des câbles électriques.....	45
Conclusion.....	47
CHAPITRE III : Dimensionnement d'un prototype et impacts	48
Introduction	48
III.1- Dimensionnement d'un prototype.....	48
III.1.1- Besoins en électricité.....	48
III.1.2- Puissance crête adéquate.....	49
III.1.2.1- Ensoleillement.....	49
III.1.2.2- Puissance crête du module.....	49
III.1.3 - Capacité de la batterie.....	50
III.1.4- Régulateur adéquat.....	50
III.1.5- Justification d'utiliser un convertisseur.....	50
III.1.6- Section des câbles électriques.....	52
III.2- Validation des calculs par un logiciel.....	53
III.2.1- Interfaces.....	53
III.2.2- Entrée des données.....	53
III.2.4- Récapitulation	55
III.3- Impacts des systèmes photovoltaïques.....	56
III.3.1- Impacts négatifs	56
III.3.2- Impacts positifs	57
III.3.2.1- Social.....	57
III.3.2.2- Economique.....	57
III.3.2.3- Environnemental	58
Conclusion.....	59
Conclusion générale	60
Références bibliographiques et webographiques	61
ANNEXES	

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Diagramme d'une centrale à charbon « standard » [17], [9].....	4
Figure 2 : Répartition des centrales nucléaires dans le monde [20].....	7
Figure 3 : Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique.	9
Figure 4 : Pourcentage des différentes sources d'énergies renouvelables dans le monde [16].	9
Figure 5 : Lâcher d'eau au gigantesque barrage des Trois-Gorges en Chine [16].	10
Figure 6 : coupe schématique d'une centrale marémotrice.....	11
Figure 7 : Vue du barrage de la Rance.....	12
Figure 8 : Schéma d'une éolienne. Source : [26].	13
Figure 9 : Zones à gradient élevé à la surface de la terre [6].	18
Figure 10 : Carte de l'ensoleillement des différentes zones de la terre [16].....	20
Figure 11 :	22
Figure 12 A et B : Etapes de fabrication d'un module photovoltaïque. [10].....	25
Figure 13 : Parties d'un module photovoltaïque [26].	28
Figure 14 : les différents types de cellules photovoltaïques [12], [7].	30
Figure 15 : Schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome [22]	31
Figure 16 A et B : Cas de branchement des modules en série.....	36
Figure 17 A et B : Cas de branchement des modules en parallèle.....	37
Figure 18 : Gestion des masques [3].	38
Figure 19 : Quelques régulateurs de charge disponibles sur le marché.	43
Figure 20 : interface RETScreen.....	54



LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Electricité produite à partir des énergies renouvelables et projection (TWh) [13].	8
Tableau II : caractéristiques du soleil.....	19
Tableau III : propriétés des différents types de cellules [7], [11].	29
Tableau IV : Valeur du Ratio de Performance PR en fonction de la ventilation des module	35
Tableau V : tension du générateur photovoltaïque en fonction de la puissance [3].	35
Tableau VI : Inclinaison en fonction de la latitude [3].....	39
Tableau VII : Caractéristiques principales des différentes technologies [7].....	41
Tableau VIII : Bilan de consommation en électricité.	48
Tableau IX : Situation géographique du dimensionnement. Source : RETScreen.....	49
Tableau X : Données climatiques à Madagascar (Antananarivo/Ivato) : source RETScreen.	51
Tableau XI : résultats et caractéristiques	56

LISTE DES ABREVIATIONS

AC : Courant Alternatif

AGM : Absorbed Glass Mat

Ah : Ampère heure

AIE : Agence International de l'Energie

Al : Année lumière

CC : Courant Continu

°C : Degré Celsius

Fig : Figure

GES : Gaz à Effet de Serre

GDF : Gaz de France

GNV : Gaz Naturel Véhicule

Gt : Giga tonne

GWh : Giga Watt Heure

Kg : Kilo gramme

Km/h : Kilo mètre par heure ; **km/s** : Kilo mètre par seconde

KWh : Kilo Watt heure

MW : Méga Watt

MPPT : Maximum Power Point Tracker ou optimiseur de puissance

μ : Micron

OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economiques

OPEP : Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole

PV : Photovoltaïque

Tab : Tableau

TWh/ : Téra Watt heure/par

V : Volt

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie est le moteur non seulement du développement, mais aussi de la croissance de l'économie mondiale. L'augmentation de sa production pour un pays est sans doute synonyme de création de richesses, d'amélioration de la condition de vie (hygiène, santé, éducation) et l'espoir d'un développement économique propice. Dans un contexte énergétique mondial dominé par la croissante demande des pays en développement et où l'offre d'énergies demeure principalement fossile, les problèmes environnementaux et sociétaux posés par leur exploitation ne font que croître, soulevant ainsi la question épineuse de leur pérennité. Ceci étant, on constate également que ce contexte mondial se caractérise par une perpétuelle instabilité des prix et d'approvisionnement [1].

Utilisées depuis des siècles, ces énergies dites fossiles (charbon, pétrole et gaz) ont connu un essor considérable depuis les révolutions industrielles jusqu'à nos jours. Cependant avec l'évolution industrielle planétaire, elles dévoilent au fil du temps leurs limites et effets néfastes, ceci à travers des conflits (guerre en Irak, au Soudan...), Et pire encore, on note avec amertume les pressions qui pèsent sur le climat, les écosystèmes, la biodiversité et sur l'ensemble des ressources naturelles comme l'eau ou ces énergies fossiles sont susceptibles de mettre en péril l'humanité entière induisant à l'occasion au disfonctionnement des économies et les modes de vie. Au jour d'aujourd'hui, force est de constater que la réponse aux besoins énergétiques passe sans risque de faire erreur par leur gestion parcimonieuse, augmentant ainsi pour les générations futures l'opportunité d'en jouir.

Dans cette lancée, les gouvernements et les multinationales se sont orientés vers d'autres sources d'énergies : celles dites renouvelables. Ces dernières comme leurs noms l'indiquent ont non seulement la prompt faculté de se renouveler rapidement, mais bénéficient également d'un atout majeur car elles répondent aux exigences socio-économiques et environnementales actuelles. Ainsi, parmi elles, le soleil apparait incontestablement comme le moteur, sinon il est à l'origine des autres différentes sources d'énergie rencontrées sur la terre. Son rayonnement est estimé à $1,6 \cdot 10^{18}$ KWh ce qui correspond à 15000 fois la consommation mondiale d'énergie [15]. Or l'accès à l'électricité reste un défi planétaire immense surtout en Afrique subsaharienne. À titre d'exemple, seulement 2% de la population libérienne dispose d'un accès régulier à l'électricité [1]. Pourtant malgré cet énorme potentiel que nous procure le soleil, on recense de nos jours près d'un habitant de la planète sur sept, soit 1,1 milliard de personnes qui n'ont pas

accès à l'électricité, et en plus, 3 milliards continuent d'utiliser des combustibles polluants pour cuisiner [15], une pratique grandement répandue dans les pays du Sud, notamment en Afrique.

Ce triste constat a certainement un impact sur le développement socio-économique des dits pays (Afrique subsaharienne), dans la mesure où l'on y observe une demande énergétique croissante (électrique) et de plus en plus difficile à satisfaire, en raison de l'accroissement fulgurant de la population, des infrastructures lourdes, coûteuses et des zones difficilement accessibles. Or d'après l'AIE, l'efficacité énergétique constitue désormais dans les pays à revenu élevé la « principale source d'énergie », car l'énergie ainsi économisée peut être utilisée ailleurs.

Dans l'optique de pallier à ces différents maux qui sont à l'origine de multiples problèmes socio-économiques et environnementaux tant en milieu urbain que rurale, plusieurs études ont été menées et réalisées dans la plupart des domaines touchant l'énergie. Il s'agit entre autre des travaux effectués par OUSSENI Ahmed (2009) pour lutter contre le changement climatique, ANDRIAMIARIMANANA Henintsoa (2014) pour soutenir l'économie, FAISSOIL Ali (2014) pour la transformation de l'énergie géothermique en énergie électrique, RAKOTOMANANA Dina Arisoa (2007) pour optimiser les capteurs solaires, RANDRENJARIVELOSON SedraManarintsoa (2013) pour soutenir le développement durable par les énergies renouvelables, toutes ces investigations contribuent à une bonne connaissance des propriétés que nous pouvons tirer des énergies renouvelables.

Ainsi, pour des zones fortement ensoleillées, l'exploitation de l'énergie du soleil s'avère être une solution bien adaptée. D'où l'intérêt de cette étude intitulée **«*Conception et dimensionnement d'un système solaire photovoltaïque pouvant satisfaire aux besoins en électricité d'une maison rurale*»**.

Spécifiquement, il est question de :

- Présenter les étapes de fabrication d'une cellule photovoltaïque ;
- Présenter et dimensionner les éléments et/ou paramètres qui permettent le bon fonctionnement d'un système photovoltaïque autonome;
- Réaliser partiellement le dimensionnement d'un prototype;
- Faire ressortir les avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques.

Cette étude se structure autour de trois chapitres :

- ❖ Le premier porte sur les généralités en énergie ;
- ❖ Le second décrit la méthode de conception et de dimensionnement ;
- ❖ Le troisième présente la réalisation d'un prototype suivis des impacts.

CHAPITRE I : Généralités sur les énergies

Introduction

Dans ce chapitre, il sera question de faire une brève revue générale tant sur les énergies fossiles et fissiles que sur les énergies renouvelables.

I.1-Energies fossiles et fissiles

Certaines sources d'énergies sont appelées énergies fossiles ou fissiles parce qu'elles sont produites à partir de roches issues de la fossilisation des êtres (organismes) vivants il y a bien longtemps. Ces énergies sont constituées principalement du charbon, du pétrole et du gaz naturel dont leurs combustions entraînent des GES (dégradation de l'environnement). Ces ressources sont dites conventionnelles par opposition aux combustibles fossiles dits non conventionnelles (gaz de schiste, sable et schistes bitumineux) qui sont présents dans les gisements difficilement accessibles et dont l'exploitation nécessite de lourds investissements.

I.1.1- Charbon

C'est un combustible fossile d'origine organique. La genèse de sa formation a débuté il y a plus de 350 millions d'années par la transformation en profondeur de matière organique végétale. Très utilisé pour la production électrique (centrale thermique), il occupe la première place mondiale dans ce domaine, mais est placé au deuxième rang des énergies fossiles les plus consommées dans le monde après le pétrole [16].

Une centrale thermique à charbon (CTh) est composée principalement d'une chaudière et ses auxiliaires (broyeurs, dépoussiéreur électrostatique, évacuateur des cendres), d'un groupe turbo-alternateur, d'un condenseur, d'un poste d'eau (réchauffage de l'eau alimentaire) et d'un poste électrique (transformateur). Son principe de fonctionnement simplifié pour la production d'électricité est le suivant :

- L'eau déminéralisée contenue dans la bache alimentaire y est dégazée, avant d'être envoyée par les pompes alimentaires vers la chaudière ;
- La chaudière transfère la chaleur dégagée par la combustion, à l'eau qui se transforme en vapeur surchauffée sous pression ;

- La vapeur ainsi produite est admise dans la turbine où elle est détendue avant de rejoindre le condenseur. La détente de la vapeur provoque la rotation des roues de la turbine, qui entraîne l'alternateur ;
- Le refroidissement dans le condenseur par une circulation d'eau d'un circuit secondaire (eau de mer, eau de rivière...) la vapeur retourne à l'état liquide et est renvoyée à la bache d'où elle repart pour un nouveau cycle (Fig.1).

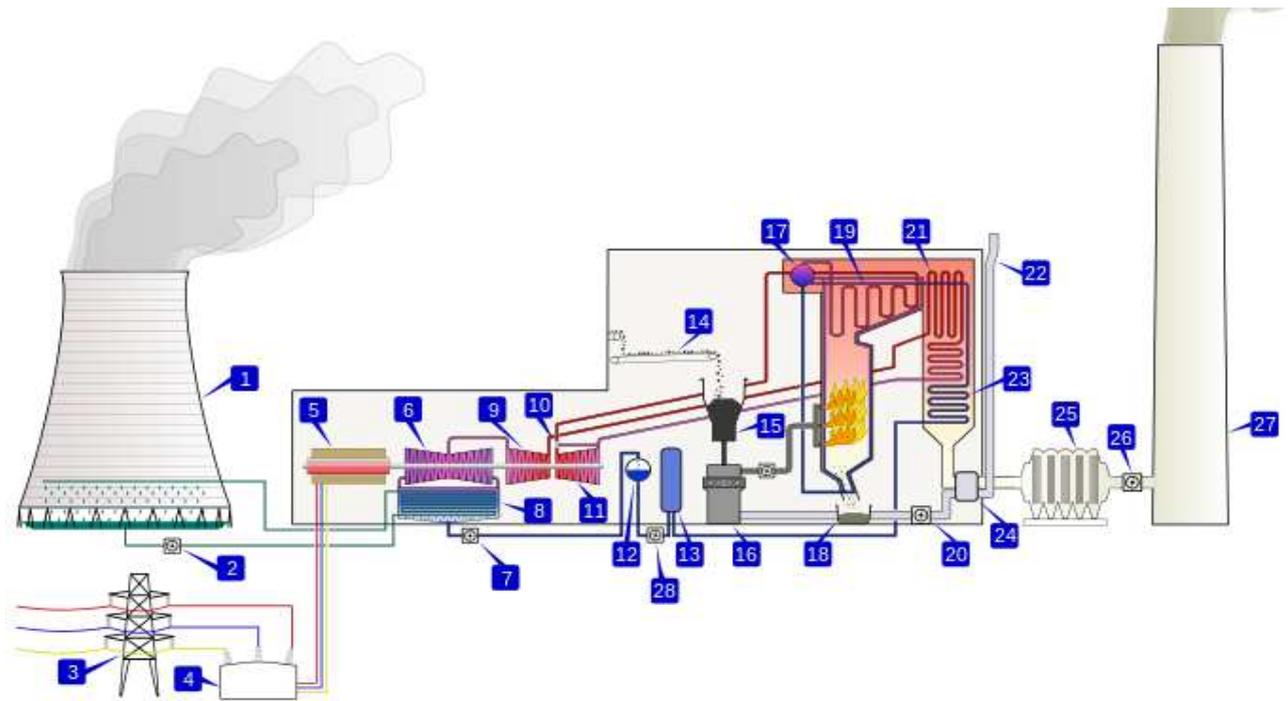


Figure 1: Diagramme d'une centrale à charbon « standard » [17], [9].

1. Tour de refroidissement	10. Vanne de contrôle de vapeur	19. Surchauffeur
2. Pompe de la tour de refroidissement	11. Turbine à vapeur (corps haute pression)	20. Ventilateur d'air primaire
3. Ligne de transmission triphasée	12. Bâche alimentaire avec dégazeur	21. Resurchauffeur
4. Transformateur élévateur de tension	13. Préchauffeur d'eau de chaudière	22. Prise d'air de combustion
5. Alternateur	14. Convoyeur à charbon	23. Économiseur
6. Turbine à vapeur (corps basse pression)	15. Trémie à charbon	24. Réchauffeur d'air
7. Pompe d'extraction des condensats	16. Broyeur à charbon	25. Electro-filtre
8. Condenseur	17. Ballon de la chaudière	26. Ventilateur de tirage
9. Turbine à vapeur (corps moyenne pression)	18. Trémie à mâchefers	

De nos jours, les centrales thermiques au charbon sont les plus répandues. Notamment dans les pays ayant d'importantes réserves de charbon (Inde, Chine, États-Unis, Allemagne, etc.). De quelques dizaines de MW au milieu du XX^e siècle, leur puissance unitaire a rapidement augmentée pour dépasser actuellement 1000 MW [1]. Parallèlement à la croissance de leur puissance unitaire, leur rendement a été amélioré grâce à l'augmentation de la pression et de la température de la vapeur utilisée. Des valeurs usuelles de 180 Bars et 540°C que l'on rencontrait dans les années 1970, on atteint désormais d'autres valeurs supercritiques de plus de 250 Bars et 600°C [16], [17]. Elles ont ainsi pu conserver une certaine compétitivité par rapport aux autres types de centrales. A cet effet, ce principe de fonctionnement décrit pour les centrales à charbon (cas le plus fréquent) est le même pour toutes les centrales thermiques avec turbine à vapeur qui utilisent d'autres combustibles (fioul, gaz, incinération, etc.).

Le principal inconvénient est que les centrales thermiques au charbon restent les premières sources d'émission de gaz à effet de serre et de production de suies (poussières)[17], notamment en Chine et aux États-Unis.

Même si le charbon est considéré comme une énergie très polluante, l'abondance de ses réserves en fait une énergie encore très utilisée. Car les réserves prouvées disponibles, jugées exploitables et rentables selon le rythme de consommation et les techniques actuellement utilisées montrent qu'il peut subvenir à nos besoins pendant approximativement 200 ans [5]. Elles sont plutôt bien réparties géographiquement, mais les trois plus grandes réserves prouvées en 2011 se situent aux États-Unis (237 Gt) en Russie (157 Gt) et en Chine (115 Gt). Le charbon satisfait encore près de 30% de l'énergie primaire et 40% de la génération d'électricité mondiale. Souvent décrié et considéré comme une énergie du passé, le charbon joue et jouera un rôle majeur dans le bouquet énergétique mondial. A moyen terme, son utilisation pourrait néanmoins être limitée par le renforcement d'objectifs de réduction des émissions de CO₂ et ses impacts en termes de pollution locale [16].

1.1.2- Pétrole

Découvert au milieu du XIX^e siècle en Pennsylvanie (USA), il se présente sous la forme d'une huile minérale issue de la décomposition sédimentaire des composés organiques contenant du carbone. C'est la source d'énergie la plus consommée dans le monde (35%), avec un record de production mondiale de 84 millions de barils par jour atteint en 2005[16]. Sa consommation est tirée par les besoins des pays émergents, particulièrement dans le secteur des transports et de la pétrochimie. Ses réserves sont principalement détenues par les pays membres de l'OPEP(71,9%)qui en sont d'ailleurs les premiers producteurs mondiaux. En effet l'Arabie

Saoudite qui fait partie de ces pays, produit à elle seule près de 42,1% de la production mondiale [16]. Cependant, la Russie qui n'en fait pas partie de ces pays à titre individuel est le deuxième producteur de pétrole au monde. Les Etats-Unis, enfin, où la production a augmenté significativement en 2013 (+12,5 %) sont en la troisième place. Cette croissance de la production des Etats Unis est portée par le développement des huiles de schiste [16].

L'estimation des réserves mondiales du pétrole montre qu'au rythme de production actuel et sans découverte d'autres gisements, elles sont évaluées pour une durée de 50 ans[5].

1.1.3- Gaz naturel

Formé par la transformation d'organismes morts il y a des millions d'années, le gaz naturel se retrouve dans divers réservoirs souterrains, parfois associé à du pétrole. C'est aujourd'hui la troisième source d'énergie la plus utilisée dans le monde, après le pétrole et le charbon : elle représente près d'un quart (24%) de l'énergie primaire employée. Ses réserves sont moins concentrées géographiquement que celle du pétrole. Même si près de la moitié des réserves conventionnelles sont situées en Russie, en Iran et au Qatar. Les Etats-Unis qui sont le premier producteur mondial, fournissent près de 20,6% de la production mondiale. Ils produisent également un gaz naturel dit « non conventionnel »: Le gaz de schiste, dont les estimations de ses réserves sont progressivement révisées à la hausse dans d'autres pays comme le Mexique, la Chine, ou encore l'Australie. [16].

La consommation de gaz naturel ne cesse de progresser, car il est adapté à la production de chaleur (cuisson, eau chaude, chauffage), en outre selon le rythme de sa consommation actuelle, ses réserves pourraient s'épuiser d'ici 110 ans [5]. Mais de nos jours, son emploi pourrait s'intensifier dans la production d'électricité en substitut du charbon ou en accompagnement des énergies renouvelables intermittentes.

1.1.4-Nucléaire (énergie fissile)

L'énergie nucléaire provient de la fission de noyaux d'atomes lourds. Les produits de cette fission génèrent alors de la chaleur qui, comme pour toute centrale thermique conventionnelle vaporise de l'eau. Cette vapeur d'eau met en rotation une turbine accouplée à un alternateur qui produit à son tour de l'électricité. L'énergie nucléaire ou fissile (qui peut se casser opposé à fusion) met en œuvre des technologies de pointe et nécessite du temps et de lourds investissements. L'ajout de neutrons à l'uranium 235 le rend tellement instable qu'il se casse en deux, libérant de ce fait des rayonnements radioactifs, de la chaleur et deux neutrons.

Une centrale nucléaire est donc un site industriel destiné à la production d'électricité, elle utilise comme chaudière un réacteur nucléaire alimenté en combustible nucléaire pour fonctionner comme une centrale thermique.

Les pays producteurs y voient une façon de faire face à des besoins croissants en énergie et de réduire leurs émissions de CO₂. Sa prolifération est limitée à ce jour à des pays fortement industrialisés : Europe de l'Ouest, Russie, Ukraine, Amérique du Nord, Japon et Chine (Fig. 2).



Figure 2 : Répartition des centrales nucléaires dans le monde [20].

En 2012, 80% de l'électricité d'origine nucléaire était produite par les pays de l'OCDE. A la suite de la catastrophe de Tchernobyl (Ukraine) en avril 1986 suivie de l'accident de Fukushima (Japon) en mars 2011, la production mondiale d'électricité d'origine nucléaire a enregistré une baisse sans précédent de près de 7%. C'est ainsi qu'en 2012, alors que le Japon était le 3^{ème} producteur mondial d'électricité d'origine nucléaire, il a vu sa production s'effondrer de 89% cette année pour atteindre 17 TWh, puis 13,9 TWh en 2013 [20].

Au sein de l'Europe certains pays ont décidé de suivre la voie de la sortie du nucléaire, à l'instar de l'Allemagne qui a fermé 8 centrales au cours de l'année 2011. Cependant, d'autres maintiennent des programmes nucléaires engagés (Royaume Uni, Chine, Inde et Russie), car ils éprouvent des besoins énergétiques grandissants. Aujourd'hui, le développement du nucléaire reste très incertain car les réserves d'uranium nécessaires à la production d'énergie nucléaire sont géographiquement très dispersées. Cependant, elles peuvent encore être disponibles pendant 100 à 200 ans [5].

I.2-Energies renouvelables

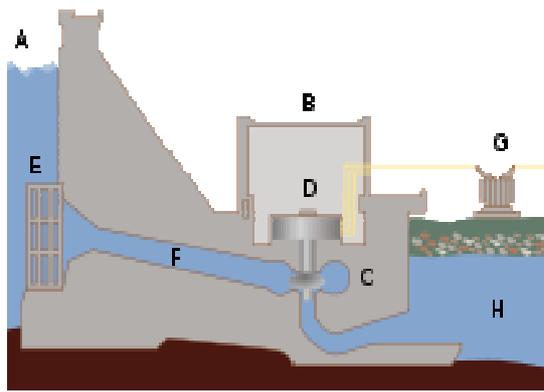
L'expression énergies renouvelables est aujourd'hui au centre de tous les débats, en ce sens où ces énergies sont une solution palpable pour la lutte contre les variabilités climatiques, qu'elles dérivent des processus naturels en perpétuel renouvellement, de telle façon qu'on peut les considérer comme inépuisables à une échelle de temps humaine. Il est convenable de présenter ici les différentes énergies renouvelables. Avant d'y arriver, notons qu'on distingue d'une part les énergies renouvelables dites électriques qui sont en perpétuelle expansion (Tab.I). Ces énergies comprennent entre autre les énergies hydrauliques, éoliennes, marémotrices, le solaire photovoltaïque et la géothermie à haute température et d'autre part les énergies renouvelables dites thermiques, constituées du solaire thermique, des pompes à chaleur, de la géothermie rénovée sous forme de chaleur, le bois-énergie, les déchets urbains renouvelables incinérés, les résidus agricoles et agroalimentaires incinérés, le biogaz et les biocarburants [8].

Tableau I : Electricité produite à partir des énergies renouvelables et projection (TWh) [13].

		2006	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
énergie hydraulique		3122	3567	3792	3888	4010	4136	4276	4423	4570
bioénergie		209	352	373	396	428	463	498	530	560
éolienne	onshore	131	428	505	606	697	803	906	120	1144
	offshore	02	10	13	20	28	36	46	59	76
solaire	pv	06	62	100	138	178	221	267	316	388
	Thermique	01	03	06	09	14	18	22	28	34
géothermie		60	70	72	77	80	83	88	93	97
Océan (marémotrice)		01	01	01	01	01	01	02	02	02
Total		3531	4492	4862	5136	5436	572	6104	6471	6851

I.2.1- Energie hydraulique

L'énergie hydraulique ou hydroélectricité c'est l'électricité produite par l'eau à travers les barrages (Fig.3). Première source d'énergies renouvelables, c'est avant tout la plus exploitée (83%) et sa production est pour l'essentielle consommée localement (Fig.4). Cette source d'énergie a joué un rôle très déterminant lors de la révolution industrielle, en ce sens qu'elle a contribué à l'expansion des premières villes industrielles et donner une impulsion au développement industriel mondial.



A : réservoir	E : vanne
B : centrale électrique	F : conduite forcée,
C : turbine	G : lignes haute tension
D : générateur	H : rivière

Figure 3 : Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique.

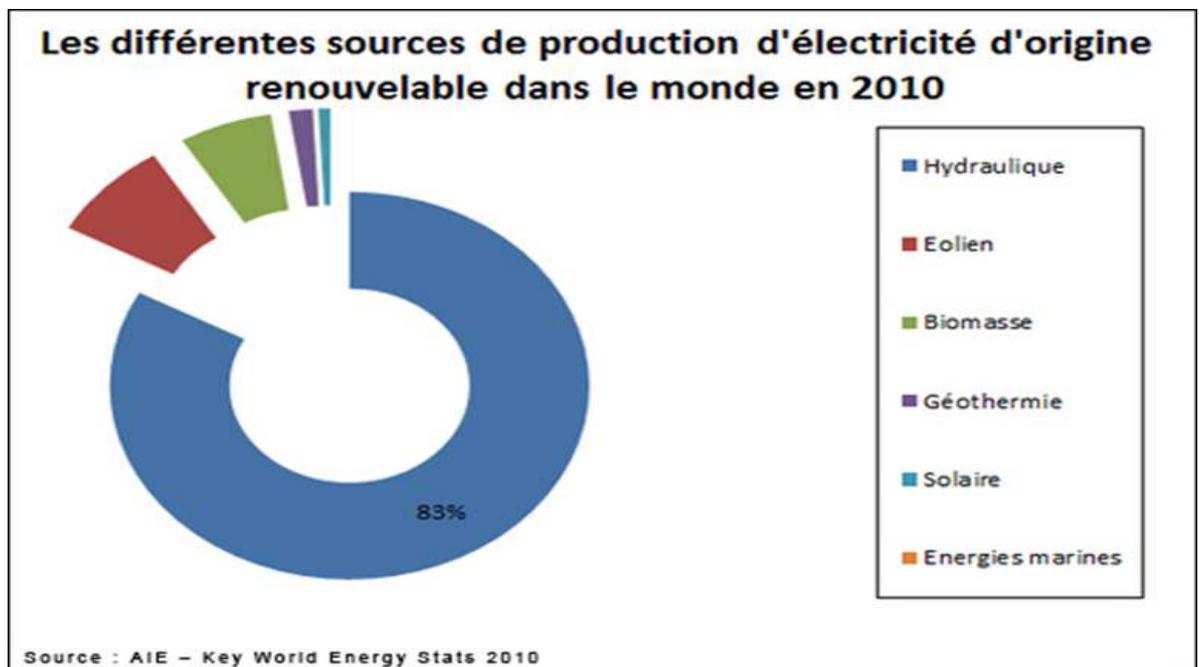


Figure 4 : Pourcentage des différentes sources d'énergies renouvelables dans le monde[16].

L'eau fut l'une des premières sources d'énergies utilisées par l'homme depuis l'antiquité, cependant il faudra attendre le XIX^{ème} siècle pour que s'opère une véritable révolution avec l'apparition de la turbine électrique. La production d'électricité hydraulique exploite donc l'énergie mécanique (cinétique et potentielle) de l'eau. Le principe utilisé pour produire de l'électricité avec la force de l'eau est le même que pour les moulins à eau de l'Antiquité, sauf qu'au lieu d'activer une roue la force de l'eau active une turbine qui déclenche un alternateur et produit de l'électricité.

L'hydroélectricité utilise des grands ouvrages, ces installations sont appelées des centrales hydrauliques ou hydroélectriques. Elles enjambent certains fleuves ou rivières ou encore des impressionnants cours d'eau. La Chine est devenue le premier pays producteur

mondial d'hydroélectricité en 2005 et a depuis conforté sa position avec la mise en service du plus grand barrage au monde (Fig. 5). Cependant, les préoccupations écologiques actuelles déploient l'intérêt pour les autres sources d'énergie renouvelables.



Figure 5 : Lâcher d'eau au gigantesque barrage des Trois-Gorges en Chine [16].

Elle est aussi l'une des mieux réparties sur la planète, en 2013 elle a fourni près de 16,3% en électricité mondiale tandis que sa production à elle seule représente près de 83% de la production d'électricité issue des énergies renouvelables. Sa production annuelle atteint les 3500 TWh (16% de la production mondiale d'électricité) et sa capacité de production technique envisagée pourrait atteindre 15000 TWh [16].

1.2.2- Marémotrice

L'énergie marémotrice est une autre forme de l'énergie hydraulique, mais elle est plutôt issue des mouvements de l'eau créés par les marées (variations du niveau de la mer dues à la gravitation de la Terre, de la Lune et du Soleil). Elle est donc récupérée grâce à un barrage sur un estuaire. Le passage de l'eau au travers de ce barrage entraîne des turbines, qui déclenchent un alternateur. Ces dernières sont réversibles pour pouvoir produire de l'énergie à marée montante ainsi qu'à marée descendante. L'amplitude des marées (le marnage) doit se situer au-delà de 5 mètres, idéalement entre 10 et 15 mètres pour obtenir une rentabilité convenable.

Après la construction du barrage ou centrale, cette énergie ne pollue pas. Mais en revanche, sa production d'électricité est alternative. Il existe des périodes (prévisibles) sans

courant ni retenue suffisante pendant lesquelles les turbines ne peuvent pas fonctionner. En outre, les investissements et les coûts de maintenance sont très élevés. Il est à noter que l'énergie des marées pourrait être exploitée ailleurs que sur le littoral. Plusieurs schémas de projets marémoteurs s'appuient sur une conception nouvelle : le lagon artificiel un modèle qui limiterait l'impact environnemental. Fonctionnant comme un lac artificiel, ces lagons se rempliraient d'eau à marée haute, puis se videraient par des parois équipés de turbines (Fig.6) [23].

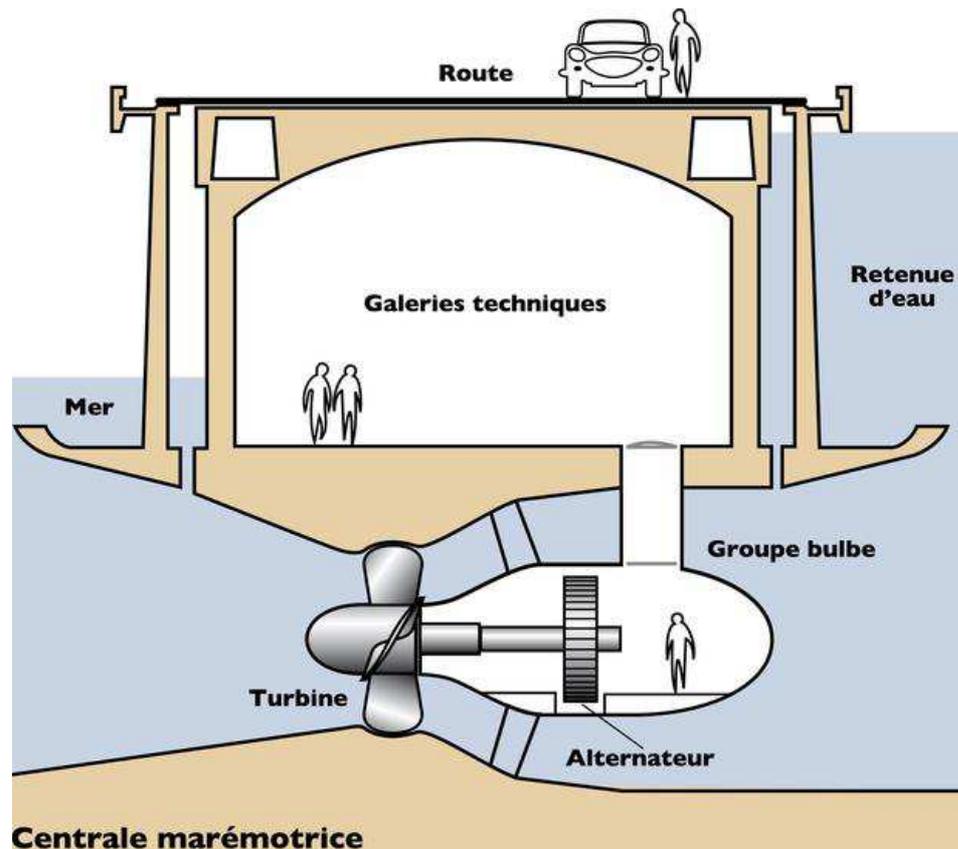


Figure 6 : coupe schématique d'une centrale marémotrice

La France a été pionnière en cette énergie avec l'inauguration en 1966 de l'usine marémotrice installée sur les 750 mètres de large de l'estuaire de la Rance (Fig.7). Ce site est connu pour avoir les plus grandes amplitudes de marées au monde, les 24 turbines de la centrale disposent d'une puissance installée de 240 MW qui fonctionnent à double sens (en marée montante et descendante). Sa production annuelle s'élève à 540 GWh. Elle a été détrônée en Août 2011 par l'usine marémotrice de Sihwa, dans la baie de Kyung Ki (Corée du Sud) qui dispose d'une puissance installée de 254 MW [24].



Figure 7 : Vue du barrage de la Rance

Son potentiel dans le monde est actuellement très peu exploité, près de 500 MW de puissance installée sur un potentiel total mondial estimé à 160 GW, soit une production de 380 TWh/an [23]. Ce qui sans doute a séduit certains pays à savoir le Royaume-Uni (site de Swansea et Severn), la Corée du sud qui a un projet ambitieux en cours, le barrage de Garolim, dont la puissance installée serait de l'ordre de 500 MW et la Russie avec la centrale marémotrice de Penjina (87 000 MW) dans le golfe éponyme, l'usine de Tougourskaya (3640 MW), toutes deux en Sibérie orientale, en mer d'Okhotsket l'usine de Mezenskaya (8 à 12 000 MW) dans la baie de Mezen en mer Blanche (nord-ouest de la Russie) [24]. Cependant, ces projets se heurtent toujours à l'opposition d'associations environnementales en Angleterre et des pêcheurs en Corée du Sud. A l'automne 2013 pour l'Angleterre et jusqu'en Janvier 2014, cas de la Corée aucune décision n'avait encore été prise [23].

Les autres formes d'énergies hydrauliques connues à nos jours sont :

- ✓ L'énergie des vagues qui utilise la puissance du mouvement des vagues ;
- ✓ L'énergie hydrolienne, elle utilise les courants sous-marins ;
- ✓ L'énergie maréthermique produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans ;

- ✓ L'énergie osmotique produite en exploitant la diffusion ionique provoquée par le mélange des eaux douces continentale avec les eaux de mers salées [9], [14].

1.2.3- Energie éolienne

L'énergie éolienne ou énergie du vent est issue indirectement de l'énergie solaire, dans la mesure où l'absorption du rayonnement solaire dans l'atmosphère engendre des différences de température et de pression qui mettent en mouvement les masses d'air et créent de ce fait le vent. Elle provient donc de l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement [9].

Aujourd'hui cette énergie permet de produire de l'électricité, avec un fonctionnement simple qui s'inspire de la technologie des moulins à vent. En utilisant un aérogénérateur (éolienne) la machine se compose généralement de 3 pales portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical. Cet ensemble est fixé par une nacelle qui abrite un générateur (Fig.8). Il est à noter que plus les pales sont grandes, moins elles tournent rapidement.

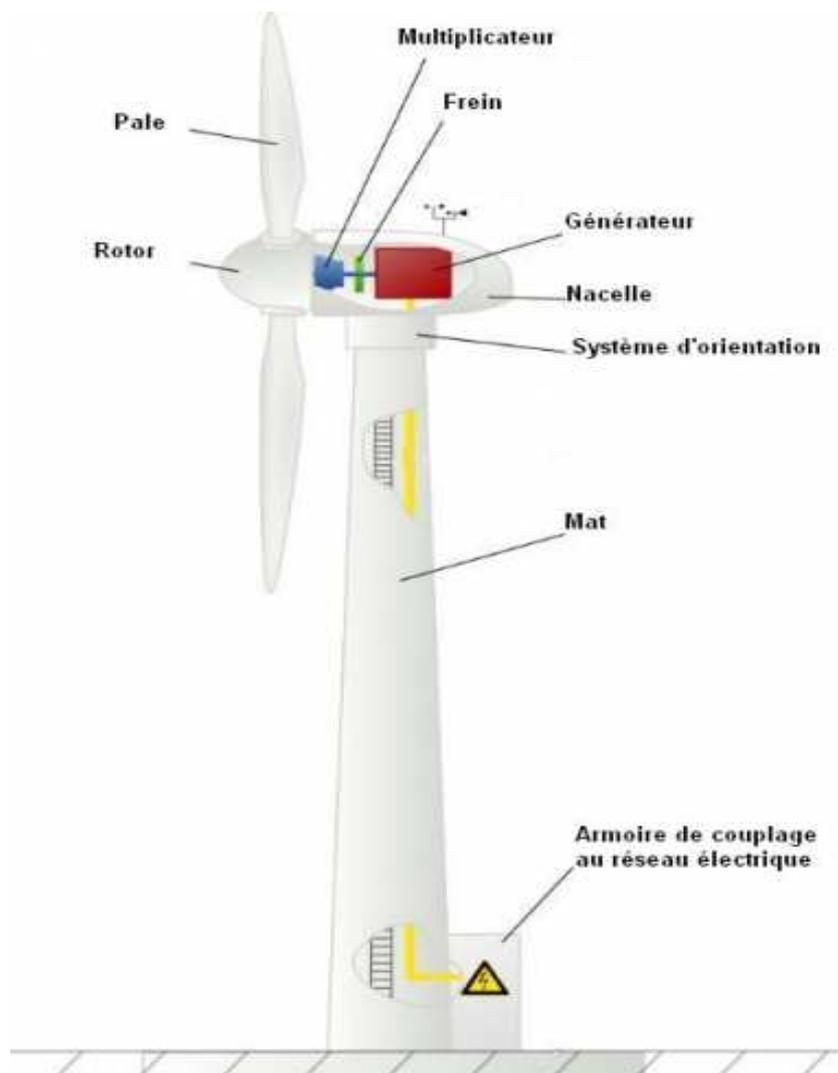


Figure 8 : Schéma d'une éolienne. Source : [26].

L'éolienne constitue un moyen propre et renouvelable pour produire de l'électricité car le générateur transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. En outre, la plupart des générateurs ont besoin de tourner à grande vitesse (de 1000 à 2000 tours par minute) pour produire de l'électricité. Ces éoliennes fonctionnent généralement pour des vitesses de vent comprises entre 14 et 90 km/h, mais au-delà elles s'arrêtent pour des raisons de sécurité. La production électrique varie selon la vitesse du vent. C'est avec des vents de 45 à 90 km/h que l'éolienne produit sa puissance maximale. L'électricité produite par le générateur a une tension d'environ 690 V. Ne pouvant pas être utilisée directement, elle est traitée grâce à un convertisseur pour être alors utilisée ou injectée dans le réseau électrique[8].

De nos jours, les avantages et les inconvénients de cette énergie font l'objet d'âpres discussions. C'est ainsi que deux critiques de fond sont souvent ouvertes :

- ✓ Pour l'instant, l'électricité éolienne est plus chère à produire que par les moyens classiques (nucléaire, thermique), elle nécessite des subventions, principalement sous forme de tarifs d'achat préférentiels ;
- ✓ Dépendant de la force du vent, l'énergie éolienne est « intermittente », de façon non prédictible ni contrôlable, ce qui entraîne de fortes variations de puissance, voire des arrêts. Toutefois, les gestionnaires de réseaux électriques ont appris depuis longtemps à gérer ces variations en ce sens qu'ils considèrent que l'éolien peut couvrir environ 20% de la demande en électricité sur un grand réseau sans poser de problèmes techniques substantiels [9].

D'autres solutions sont aussi élaborées pour pallier à ces modifications de puissance. On installe ainsi des réseaux d'éoliennes plus étendus géographiquement, qui, par leur interconnexion, peuvent assurer un niveau minimal d'énergie, en jouant sur le « foisonnement » des productions des différentes zones. On cherche également à développer le stockage à grande échelle de l'électricité produite, ceci notamment par des batteries.

Malgré ces difficultés, l'énergie éolienne se développe à un rythme soutenu dans presque tous les pays du monde, avec une croissance de 10 à 40% par an. Même si 2013 a marqué un ralentissement, la progression a été impressionnante au niveau mondial : la capacité installée a atteint 318 GW en 2013, soit une progression de 200 GW en cinq ans [16].

Différentes techniques sont étudiées pour améliorer les technologies d'installation. Actuellement, les éoliennes sont fixées sur le fond sous-marin, ce qui limite leurs zones

d'implantation à des profondeurs d'eau inférieures à 30 mètres. Des systèmes d'îles artificielles ou d'éoliennes sur fondations flottantes ancrées jusqu'à 60 mètres de profondeur d'eau sont envisagées et parfois déjà testées. On examine aussi la possibilité, pour limiter les investissements, d'utiliser des installations préexistantes dans des champs pétroliers off-shore, en fin d'exploitation, et qui présentent un fort potentiel. Des chercheurs rêvent d'éoliennes qui iraient chercher les vents encore plus haut dans le ciel, là où ils sont beaucoup plus fort et constant [19].

Son avenir devrait passer notamment par le développement de parcs offshore (éolienne maritime), si les coûts de développement sont réduits. La hausse de 12% en 2013 des capacités éoliennes mondiales prouve le dynamisme de cette filière déjà présente en Europe, en Amérique du Nord et en Asie. La Chine est devenue le pays détenant la plus grande puissance éolienne installée (2013), devant les Etats Unis, l'Allemagne l'Espagne et l'Inde. Avec 91 GW, elle détient presque le quart de la puissance mondiale [9], [19].

1.2.4-Biomasse et les déchets

La biomasse c'est ensemble de matières organiques végétales, animales ou fongique qui peuvent devenir des sources d'énergie par combustion. Grâce à la photosynthèse, elle est une véritable réserve d'énergie combinée à l'activité du soleil. Les déchets organiques industriels et ménagers constituent aujourd'hui une filière de production à part entière et augmentent de ce fait le potentiel en biomasse. Ils permettent de produire :

- L'énergie thermique par combustion dans une chaudière, (incinération des déchets);
- L'énergie électrique par cogénération;
- L'énergie chimique par méthanisation (le biogaz) ou par synthèse ;
- Des alcools ou huiles (le biocarburant).

La production d'énergie par combustion de la biomasse s'effectue autour de la filière bois-énergie. Les déchets sont brûlés dans une chaudière qui peut servir à la production de chaleur, principe utilisé dans les pays tempérés pour le chauffage des habitations, des sites industriels ou des zones urbaines.

Le bois-énergie peut prendre bien d'autres formes pour satisfaire de plus grands besoins. Il est possible également de récupérer les déchets ligneux (résidus forestiers, bois d'élagage, écorces, sciures, palettes et cagettes usagées, vieux meubles...) pour l'alimentation des chaufferies. Ils sont souvent conditionnés sous forme de plaquettes de quelques millimètres ou de granules. La production de vapeur d'eau permet une transformation en énergie mécanique.

Il existe aussi des installations de cogénération. Cette dernière consiste à produire en même temps et dans la même installation de l'énergie thermique (chaleur) et de l'énergie mécanique. L'énergie thermique est utilisée pour le chauffage et la production d'eau chaude à l'aide d'un échangeur. L'énergie mécanique est transformée en énergie électrique grâce à un alternateur.

L'énergie utilisée pour faire fonctionner des installations de cogénération peut être le gaz naturel, le fioul ou toute forme d'énergie renouvelable locale (géothermie, biomasse) ou liée à la valorisation des déchets (incinération des ordures ménagères...). Cette source d'énergie fait fonctionner une turbine ou un moteur qui transforme, l'énergie mécanique en électrique. Ces unités trouvent un immense champ d'application dans les logements qui seront alimentés à la fois en chaleur, eau chaude et électricité.

Le biogaz est un gaz issu de la fermentation anaérobie (en l'absence d'oxygène) de matières organiques. Les déchets se décomposent sous l'effet des bactéries. Le biogaz obtenu peut être employé à l'état brut dans des chaudières, ou, après épuration, comme carburant pour les véhicules. En France, il est l'équivalent du GNV distribué par GDF. Le biogaz se compose principalement du méthane (CH_4) et du dioxyde de carbone (CO_2). On trouve aussi quelques traces d'hydrogène sulfuré (H_2S), responsable de l'odeur d'œuf pourri caractéristique du biogaz.

Les biocarburants sont des liquides obtenus à partir de matières premières végétales. Il existe deux types de productions :

- Le bioéthanol et son dérivé l'ETBE (éthyl – tertio-butyl – éther), obtenus à partir de betterave, de blé, de maïs, de canne à sucre ou de pommes de terre. C'est un additif qui, ajouté à l'essence permet de réduire certaines émissions polluantes des voitures.

- Le biodiesel ou huile végétale et ses dérivés (esters), obtenus à partir du colza, du soja ou de tournesol. Ils peuvent être un additif ou un substitut du gazole.

Le bioéthanol et le biodiesel ont profité d'une volonté politique forte pour se développer. Leur place dans le paysage énergétique reste néanmoins limitée à cause de leur impact sur les terres cultivables, du bilan environnemental mitigé et de la compétition avec l'alimentaire.

Ils sont utilisés dans les transports, incorporés aux carburants conventionnels ou utilisés dans des moteurs fonctionnant exclusivement avec des biocarburants. Leurs grands consommateurs sont les Etats Unis, le Brésil et l'Europe. Ils en sont aussi les grands producteurs, dans la mesure où à eux seuls ils produisent 85% des biocarburants dans le monde.

Le bioéthanol (73% des biocarburants) est principalement utilisé pour les motorisations à essence. Le développement du bioéthanol s'est ralenti ces dernières années. Les Etats-Unis et le Brésil, pays où le parc automobile doté de moteurs à essence dépasse largement celui du gazole, sont en 2013 les deux plus grands producteurs et exportateurs d'éthanol dans le monde. Les Etats-Unis ont ainsi produit 0,9 million de barils d'éthanol par jour en 2013, ceci à partir de maïs. Tandis qu'au Brésil l'éthanol est produit à base de canne à sucre. Avec la hausse du prix du sucre sur les marchés internationaux, la production comme la consommation d'éthanol du pays a baissé en 2011, avant de remonter en 2012 [16].

1.2.5- Géothermie

Le terme de géothermie est formé à partir des mots grecs Gêo (la Terre) et thermos (chaud). Il recouvre l'ensemble des techniques qui permettent de récupérer la chaleur naturellement présente dans le sous-sol terrestre, en particulier dans les aquifères (réservoirs rocheux renfermant des eaux souterraines). Cette énergie calorifique provient d'une part de la chaleur résiduelle produite par les phénomènes de formation de la planète (il y a 4,5 milliards d'années) et d'autre part des mouvements de convection et conduction au sein de l'écorce terrestre et aussi de la radio activité naturelle. De ce fait, dans les profondeurs de la Terre principalement au niveau du manteau, règne une chaleur extrême qui réchauffe les roches de la croûte terrestre, ainsi que l'eau et la vapeur qu'elles contiennent. Cette énergie est récupérée pour chauffer les bâtiments ou pour produire de l'électricité [14].

La température des eaux géothermales augmente avec la profondeur, selon le gradient thermique (hausse moyenne de la température en fonction de la profondeur) de chaque région. Ce gradient a une valeur mondiale moyenne de 3°C pour 100 m de profondeur. Sur toute la côte Ouest de l'Amérique, la côte Est de l'Asie au Sud de l'Europe et sur une bonne partie de l'Afrique de l'Est, il est élevé. Entre temps on note dans la ville de Larderello en Italie un record exceptionnel qui est de 100°C tous les 100 mètres. Cependant il n'est pas uniforme, car anormal au niveau de certaines régions du globe surtout aux limites des plaques tectoniques et des points chaud de la planète en relation étroite avec les activités magmatiques (Fig.9).



Figure 9 : Zones à gradient élevé à la surface de la terre [6].

Les techniques géothermiques diffèrent selon la température des eaux géothermales, laquelle définit aussi l'usage que l'on fait de ces eaux :

- entre 30°C et 90°C, la chaleur et l'eau géothermales sont utilisées pour le chauffage géothermique. C'est la géothermie basse énergie ;
- entre 90°C et 150°C, l'eau est employée à la surface sous forme liquide. Elle transfère sa chaleur à un autre liquide, qui se vaporise à basse température et actionne une turbine pour la production d'électricité. C'est la géothermie de moyenne énergie ;
- au-delà de 150°C, cette eau se trouve alors sous forme de vapeur quand elle atteint la surface du sol. Elle fait tourner des turbines dont le mouvement génère également de l'électricité. C'est la géothermie de haute énergie[6].

Certains pays depuis 2002, utilisent la géothermie pour produire de l'électricité à l'instar des USA, Philippines, Mexique, Italie, Indonésie, Japon et Kenya avec respectivement 2850, 1850, 745, 740, 590, 530 et 45 MW [6].

Les réservoirs géothermiques sont disponibles dans tous les bassins sédimentaires de la planète sauf la géothermie haute énergie qui se situe surtout à proximité de volcans. En outre, la disponibilité de cette énergie est limitée géographiquement, dans la mesure où le transport de la chaleur sur de longues distances génère d'importantes pertes thermiques. Il en résulte une difficulté à faire correspondre lieux de production et lieux de consommation.

I.2.6-Solaire

L'énergie solaire est l'énergie produite par le soleil sous la forme de lumière et de chaleur.

I.2.6.1- Soleil

Le soleil fait partie d'un système stellaire d'environ 140 milliards d'étoiles (voie lactée, notre galaxie), dont la plupart sont concentrées dans une région en forme de disque délimitée par des bras qui se répartissent en spirale à partir d'un noyau central. Il est situé à 28000 Al du centre galactique, tourne autour à une vitesse de 225 km/s et effectue sa révolution en 250 millions d'années. Il est l'étoile centrale de notre système autour duquel tournent les autres planètes. Il contient plus de 99.8% de la masse totale du système, sa composition chimique est sensiblement de 75% d'hydrogène et 25% d'hélium avec quelques métaux, ses principales caractéristiques sont consignées dans le tableau II.

Tableau II : caractéristiques du soleil.

Masse	$M_s=1,9884 \cdot 10^{30}$ kg
Circonférence	$C=4372544$ km
Rayon équatorial	$R=696265$ km
Densité du soleil	$d=1,41$
Distance moyenne à la terre	$D=149\,598\,000$ km
Age du soleil	4,6 milliards d'années

Cet astre est très important pour l'homme grâce à la quantité énorme d'énergie et à l'émission d'un flux de particules accélérées (protons, électrons et ions) et aurayonnement électromagnétique (transformation des noyaux d'hydrogènes en hélium à une température très élevée) qu'il émet vers la terre (vie et photosynthèse) et les autres planètes du système[19].En direction de la terre, ce rayonnement est constitué de 46% d'infrarouge, de 48% de la lumière visible et 6% des ultraviolets. La terre n'est pas ensoleillée de la même façon partout (Fig.10), son ensoleillement qui est mesuré en kWh est de $1,6 \cdot 10^{18}$ correspondant à 15000 fois la consommation mondiale d'énergie.

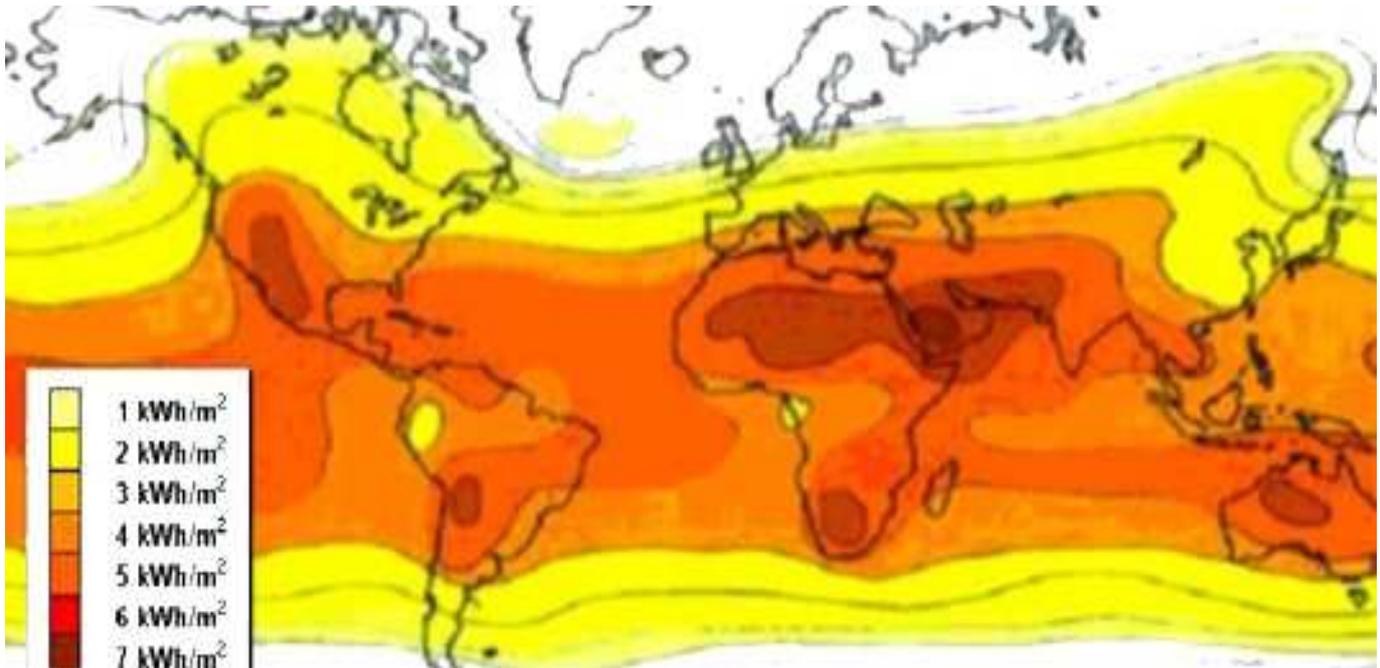


Figure 10 : Carte de l'ensoleillement des différentes zones de la terre [16].

L'énergie du soleil dont la durée de vie estimée à $5 \cdot 10^9$ ans est gratuite et accessible à tous. Cette énergie est issue de la transformation d'une partie du rayonnement solaire qui peut être convertit en énergie électrique sous deux formes :

- ❖ une conversion indirecte de la dite énergie en énergie électrique par voie thermique ou thermodynamique ; cette voie permet ainsi de produire de la chaleur (thermique) ou de l'énergie électrique (thermodynamique). Dans ce dernier cas, la conversion de l'énergie solaire en électricité n'est pas directe, mais passe par l'intermédiaire des centrales thermiques solaires. Le principe de base utilisé, est l'obtention de la température élevée par la concentration du rayonnement solaire en un seul foyer. Cela rend possible le réchauffement de fluides caloporteurs à des températures allant de 250 à 1000°C. Ces fluides transportent la chaleur vers un réservoir d'eau ; il y a alors production de vapeur d'eau qui entraine un alternateur pour produire de l'électricité comme dans les centrales thermiques conventionnelles.
- ❖ une conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique appelée «Effet photovoltaïque»;

Le mot photovoltaïque vient du grec « photos » qui veut dire lumière et de volta nom du physicien qui découvrit la pile électrique en 1800. L'énergie solaire photovoltaïque est donc la conversion directe par le biais des cellules ou photopiles de la lumière du rayonnement en électricité.

1.2.6.2- Historique

Le principe photovoltaïque fut Découvert en 1839 par le physicien Français Edmond BECQUEREL. C'est plus tard en 1887 que le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz découvre l'effet photovoltaïque et c'est en 1923 que Albert Einstein explique ce principe avec à la clé le prix Nobel. Ce principe est un phénomène physique qui permet la transformation de l'énergie lumineuse du soleil en électricité, ceci lorsque la cellule est exposée à la lumière du soleil. Il fut approfondi plus tard par la communauté scientifique d'où la sauvegarde de quelques dates :

- 1955: au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites, trois chercheurs Américains (Chapin, Pearson, Prince) mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement (6%);
- 1959: une pile avec un rendement de 9% est mise au point par les Américains et le premier satellite (Vanguard) alimenté par des cellules solaires est envoyé dans l'espace;
- De 1970 à 1980, des efforts ont été faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres ;
- 1973: la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware ;
- 1983: la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 Km en Australie;
- 1995 : des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001 [18].

Cette énergie qu'on reçoit à la surface de la planète de façon intermittente et a des intensités variables, offre de nombreuses fonctions pour son utilisation de nos jours. Ainsi, elle peut être utilisée pour produire de l'électricité (éclairage) grâce à des modules photovoltaïques (ou panneaux solaires) mais aussi, plus simplement comme source de chaleur pour la cuisson ou la production d'eau chaude (solaire thermique) (Fig.11) et même pour le pompage et les télécommunications. Un certain nombre de pays comme les Etats Unies, l'Allemagne, la Suisse ou le Japon favorisent l'émergence d'un nouveau marché prometteur de couplage des générateurs solaires au réseau d'électricité. En dehors de ces pays avant-gardistes ou s'exerce une réelle volonté politique et économique de développement de l'énergie solaire, les principales zones propices à l'implantation des équipements photovoltaïques se situent dans les pays en voie de développement situés sur la zone intertropicale.

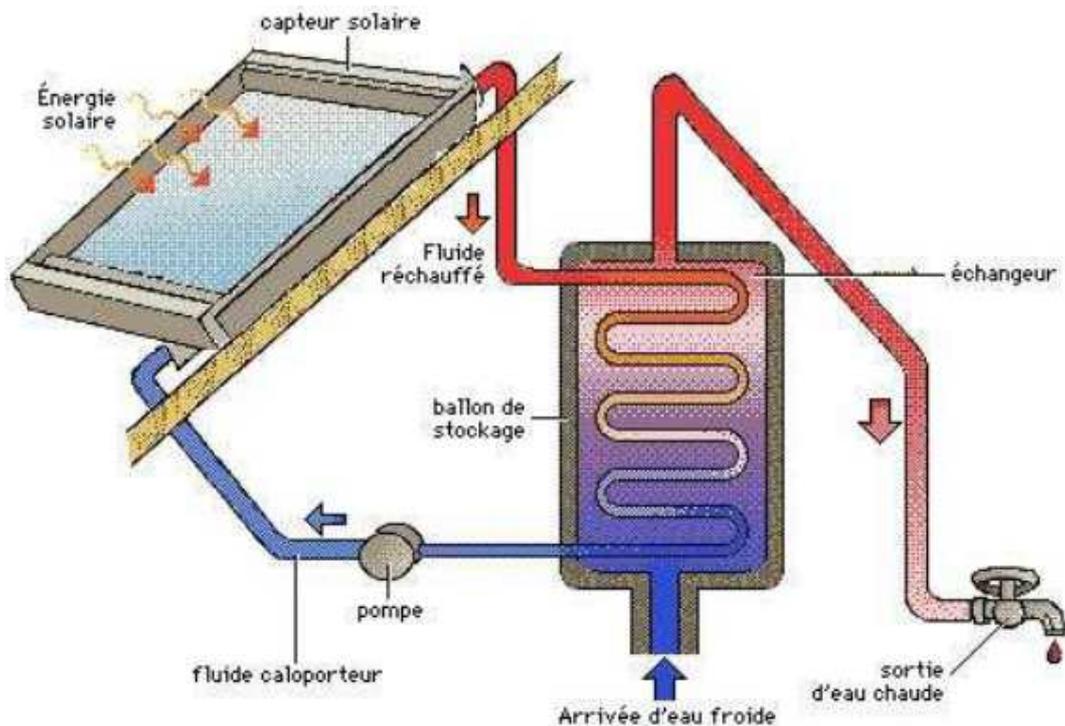


Figure 11 : Coupe schématique du chauffe eau solaire [9].

Aujourd'hui, c'est le solaire thermique à basse température, c'est-à-dire celui qui utilise directement la chaleur dans des petites installations diffuses, qui représente la plus grande part de l'énergie solaire (près de 70%). La puissance installée de 233 GWh, a doublé en cinq ans (de 2007 à 2012). La Chine est le plus grand utilisateur de cette chaleur (près des 2/3 de la puissance mondiale), car elle a beaucoup investi dans les capteurs solaires. Suivent ensuite les États-Unis et l'Allemagne dans l'utilisation de cette chaleur.

Quant au photovoltaïque, il représente aujourd'hui plus de 30% du solaire total, sa puissance installée s'est vue être multipliée par 10 au cours des cinq années 2007 à 2012. La puissance installée fin 2013 était de 134 GWh[16]. La Chine progresse plus rapidement, mais l'Allemagne domine encore le secteur.

Le solaire thermique à concentration, c'est-à-dire les grandes centrales thermodynamiques qui produisent de l'électricité à partir de la chaleur, ne représente aujourd'hui que 0,7% du solaire total. Mais là aussi la progression est forte et la puissance installée a été multipliée par 6 entre 2007 et 2012 pour atteindre 3,1 GWh fin 2013. On dénombre dans le monde 70 centrales dans 9 pays, avec deux pays pilotes : l'Espagne (48 centrales) et les États-Unis (13 centrales). D'autres sont en construction ou en projet, notamment en Inde, en Chine et au Qatar[16].

Conclusion

Au terme de cette partie, nous pouvons dire que les énergies qu'elles soient fossiles (charbon, pétrole et gaz) ou fissiles (nucléaire) ont et continues de contribuer énormément à l'édification ou la destruction (source de conflit) de la planète. Cependant au vue de leurs réserves très diminuées et de leur impact sur l'environnement, l'humanité dans le souci de ne pas en priver les générations futures, s'est lancé dans la quête et a donc découvert d'autres sources d'énergies. Celles dites renouvelables constituées entre autre de l'hydroélectricité, du solaire, de l'éolienne, de la géothermie et de la marémotrice. Ainsi, ces énergies dont le renouvellement est naturel, très rapide à l'échelle de temps humain, inépuisable permettent donc de répondre à une partie des besoins énergétique actuels (chaleur, électricité et carburant) malgré que leurs couts d'acquisition restent encore élevés.

CHAPITRE II : Méthodologie de conception et dimensionnement

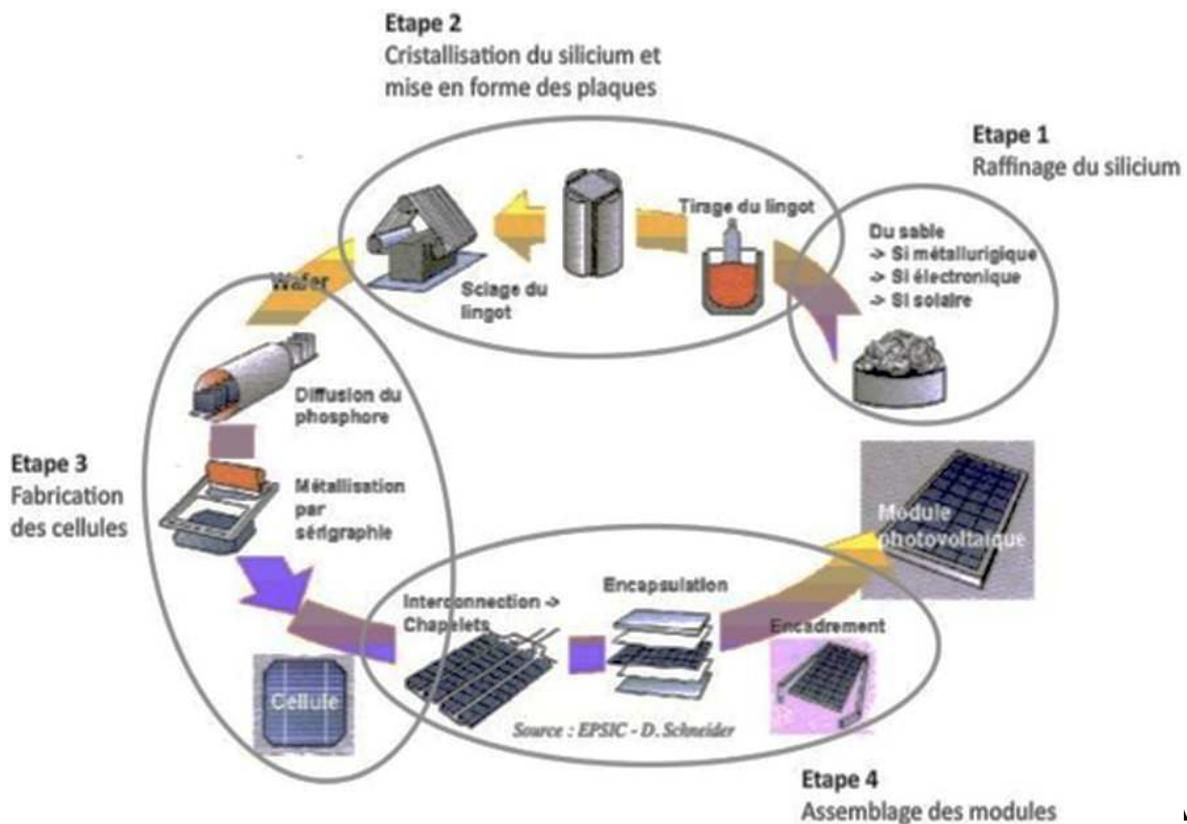
Introduction

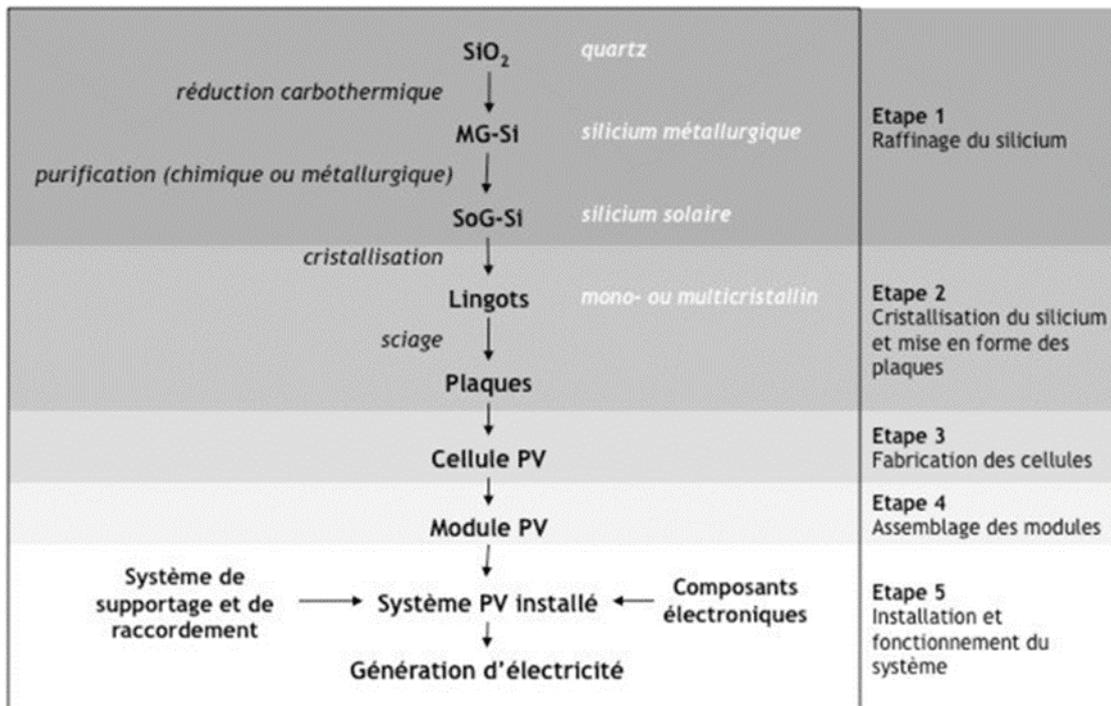
Dans un système photovoltaïque l'élément fondamental c'est la cellule. Donc pour en arriver à la méthodologie de conception et du dimensionnement, il serait judicieux de présenter brièvement les étapes de la transformation de la silice jusqu'à l'obtention de la cellule (module).

II.1- Généralités sur les étapes de fabrication de la cellule

Le principe des cellules photovoltaïques ou photopiles repose sur la technologie des semi-conducteurs dont le plus utilisé est le silicium (90%). Il constitue l'élément de base d'un générateur photovoltaïque. Mais il existe d'autres éléments de fabrication à l'instar du sélénium, du tellure de cadmium et du sulfure de cadmium [12].

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière génère de l'électricité. Elle peut être utilisée seule (calculatrice, montre...) mais, la plupart du temps, les cellules sont regroupées en des modules ou panneaux photovoltaïques [4]. Pour y parvenir, l'obtention d'un module photovoltaïque passe par plusieurs étapes (Fig. 12 A et B).



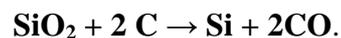


B

Figure 12 A et B: Etapes de fabrication d'un module photovoltaïque. [10].

II.1.1- Raffinage du silicium

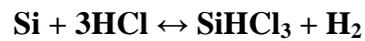
De nos jours, la plupart des panneaux solaires commercialisés sont constitués de silicium (deuxième élément le plus abondant sur terre). Ce silicium (Si) est donc extrait de la silice (SiO_2) à 1700°C grâce à la réaction chimique simplifiée suivante [10]:



Pour avoir des lingots de silicium pur, on met en contact des centaines de kilogrammes de fragments de silicium (des roches) avec une petite quantité de bore afin de donner une polarité positive au silicium. Ce bore est un additif qui porte le nom de «dopant». Après cela, le tout est cuit à plus de 3000°C . L'obtention du silicium cristallin arrive en fin de raffinage en passant par deux grands processus :

- ✓ La transformation du quartz en silicium de grade métallurgique ou MG-Si, réalisée dans un four à arc électrique par du carbone (outil typique de l'industrie métallurgique) car il faut faire fondre la silice. On obtient donc une pureté de l'ordre de 98 à 99%.
- ✓ La purification du silicium métal en silicium de grade solaire ou SoG-Si à hauteur de 99,9999%.

Donc cette étape est réalisée par le procédé Siemens, hérité de l'électronique et qui utilise des réacteurs chimiques à l'instar de l'acide chlorhydrique pour transformer le silicium en trichlorosilane d'après la formule chimique suivante :



C'est d'ailleurs l'étape la plus consommatrice en énergie de toute la chaîne de production des modules photovoltaïques. Ainsi en raison du coût de cette étape et du fait qu'une pureté moindre peut être tolérée, d'autres techniques pour produire du silicium solaire à partir de nouveaux procédés chimiques et métallurgiques, sont explorées[12], [13].

II.1.2- Cristallisation du silicium et la mise en forme des plaques

C'est à ce stade que chaque industrie innove de son savoir-faire, car le silicium est purifié une fois de plus pour être ensuite dopé uniformément et découpé à l'aide de scies à fil sous forme de plaquettes ("**wafers ou galette**") rondes, carrées ou pseudo carrées une fois refroidi. Chaque wafer fraîchement coupé à une épaisseur de 200 μ . L'opération est réalisée en présence de **slurry** (solution organique contenant des abrasifs en suspension). Il en résulte une perte importante de matériau lors de ce sciage (30 à 40% non recyclé).

La technique de cristallisation consiste à solidifier progressivement le silicium polycristallin fondu de manière contrôlée. C'est dans la charge de silicium en fusion que sera ajouté l'élément dopant, généralement du bore cité plus haut qui donne un dopage de type P. Le matériau présente au final un réseau cristallin, qui est un arrangement ordonné des atomes de silicium. L'élimination des impuretés se fait par ségrégation. Plus solubles en phase liquide que solide, les impuretés vont migrer vers les zones se solidifiant en dernier.

Selon le choix technologique fait par le fabricant pour la cristallisation, trois grandes voies sont possibles :

- le tirage Czochralski, pour des lingots cylindriques de **silicium monocristallin (sc-Si)**, il est obtenu par croissance ou étirage d'un lingot cylindrique à partir d'un monocristal «souche» selon le procédé Czochralski ou CZ. Le silicium est placé dans un creuset de quartz et maintenu liquide à l'aide d'éléments chauffants. Lorsque la surface est à la température limite de solidification, on y plonge un germe monocristallin. Le silicium se solidifie sur ce germe selon la même orientation cristallographique. On tire lentement le germe vers le haut, avec un mouvement de rotation, tout en contrôlant minutieusement la température et la vitesse. Les cellules finales du silicium

- monocristallin ont un des meilleurs rendements (17%) par rapport à ceux dits polycristallin (15%), mais pour une plus grande dépense énergétique à cette étape ;
- la solidification directionnelle donne des briques de **silicium polycristallin (mc-Si)**. Le silicium polycristallin est obtenu par coulage en lingotière dans laquelle s'opère un refroidissement lent (quelques dizaines d'heures). Sa mise au point prend moins d'énergie, et son rendement final est d'environ 9%[12].

Si la cellule est constituée d'un seul cristal, on parle de silicium monocristallin et elle présente un aspect uniforme, gris bleuté et parfois noir. Si par contre elle est composée de plusieurs cristaux assemblés, on dit qu'elle est faite de silicium multi cristallin (polycristallin). Elle présente l'aspect d'une mosaïque compacte de fragments cristallins bleutés de quelques millimètres à quelques centimètres.

II.1.3- Fabrication des cellules

Une fois les plaques découpées, débute la phase de fabrication des cellules, elle va permettre d'exploiter les propriétés de semi-conducteur du silicium et transformer l'énergie lumineuse captée en énergie électrique.

Pour ce qui est du cas de la cellule au silicium monocristallin, les étapes suivantes sont scrupuleusement suivies :

- ✓ La surface est décapée pour éliminer les défauts de sciage ;
- ✓ Ensuite une gravure sélective est réalisée pour obtenir une surface texturée en petites pyramides. Ce qui améliore la collecte de la lumière dans toutes les directions ;
- ✓ Une diffusion de phosphore est faite pour réaliser la jonction, le dopage de l'arrière avec de l'aluminium pour bonne collecte de charge ;
- ✓ Le dépôt d'une couche antireflet et d'une grille de métallisation sur l'avant ;
- ✓ Le dépôt d'un métal soudable sur l'arrière;
- ✓ Le test et le tri de toutes les cellules fabriquées.

Quant à la cellule polycristallin, on refond tous les déchets provenant du tirage des monocristaux dans une cuve carrée à température et atmosphère contrôlées. Divers procédés thermiques et chimiques sont employés à ce stade pour repousser les principales impuretés à la périphérie du creuset formant une croûte que l'on élimine après durcissement. Le bloc ainsi

obtenu sera ensuite taillé en barreaux de section carrée (10 x 10 ou 15 x 15) qui seront sciés en wafers. C'est dans le souci d'améliorer le rendement des cellules solaires et d'avoir le moyen de fabriquer un cristal de silicium bon marché de qualité solaire qu'est né le silicium polycristallin. Ce semi-conducteur apparaît comme la juxtaposition des petits cristaux monocristaux d'orientations différentes et de dimensions du millièbre au centième [13].

Pour la cellule en couche mince, le silicium utilisé dans ce cas est dit «amorphe» car l'organisation des atomes n'est plus régulière comme dans un cristal. Le silicium amorphe pur est donc un mauvais conducteur car contenant plein de défauts et difficile à doper. Cependant, lorsqu'il est fabriqué à partir du gaz silane (SiH_4), il contient une proportion importante d'hydrogène qui va se lier à ses liaisons pendantes puisque le matériau comporte des déformations et les atomes ne sont liés qu'à trois autres atomes au lieu de quatre, ceci permet donc la collecte des charges et le dopage du matériau[13].

La cellule finie est mesurée à l'aide d'un appareil simulant la distribution des photons en fonction de leur énergie (spectre solaire). Les cellules testées sont classées suivant leur courant de court-circuit I_{cc} et leur rendement. Celles de même classe seront assemblées en série ou en parallèle, entre elles pour former le module photovoltaïque. Ainsi elles sont tout d'abord raccordées en plusieurs chaînes pour former une matrice finale, ensuite l'encapsulation de la matrice est réalisée par laminage à chaud: les feuillets sont montés en température et pressés sous vide. Le film d'EVA placé entre le verre (face avant) ou le tedlar (face arrière) et les cellules assurent la cohésion de l'ensemble (Fig. 13)[26].

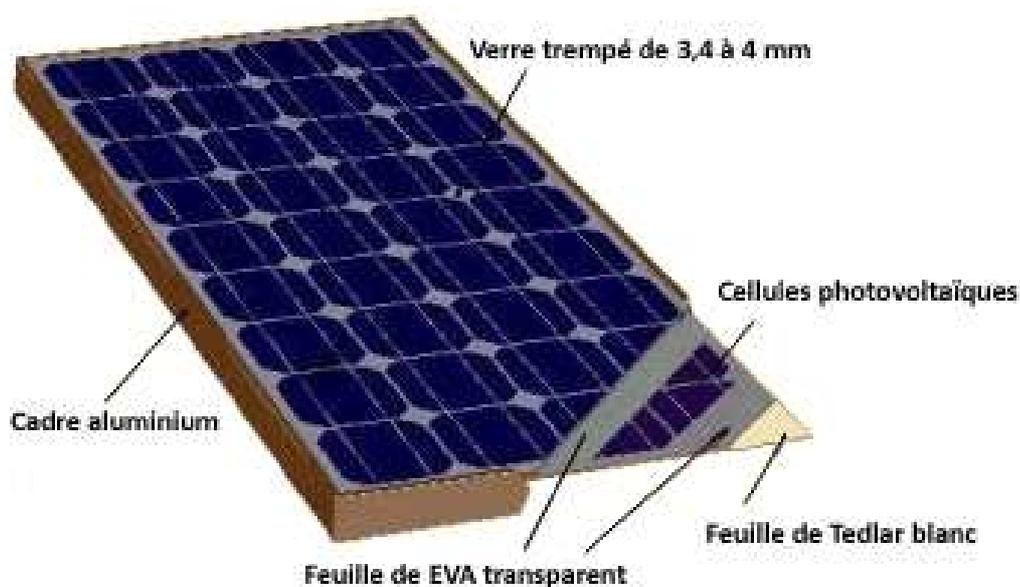


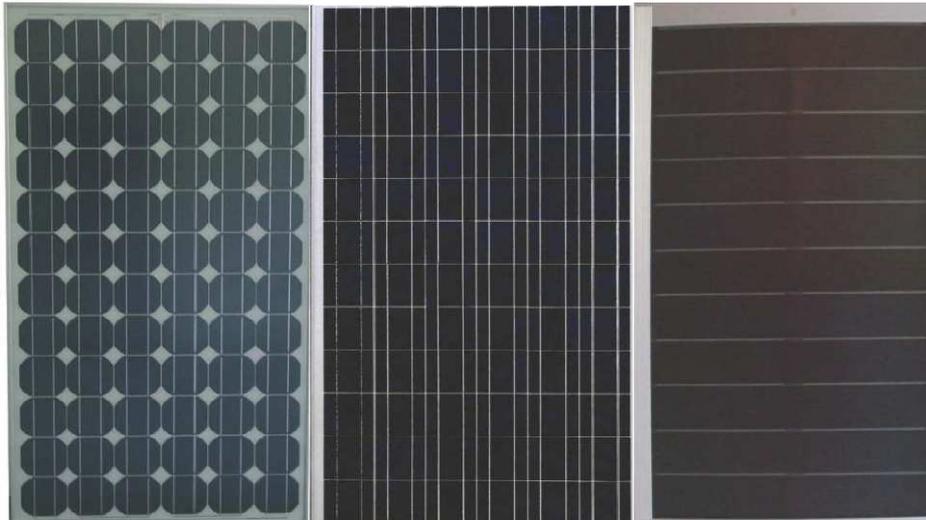
Figure 13 : Parties d'un module photovoltaïque [26].

Le module reçoit un cadre en aluminium sur le pourtour puis est équipé d'une boîte de jonction permettant son raccordement électrique. Enfin il est soumis à un test sous lumière artificielle calibrée afin de mesurer ses caractéristiques électriques réelles et propriétés (Tab.III) pour les classer selon leur nature (Fig. 14).

Les paramètres caractérisant le module sont pareils à ceux de la cellule, seulement que le simulateur utilisé diffère par le fait que son rayonnement est uniforme sur une large surface.

Tableau III : propriétés des différents types de cellules [7], [11].

Type de cellule	Cellule à base de silicium monocristallin	Cellule à base de silicium polycristallin	Cellule à base de silicium amorphe (couche mince)
Rendement module (%)	15 – 18 (24.7 en laboratoire)	13 – 15 (19.8 en laboratoire)	5 – 8 (13 en laboratoire)
Surface moyenne pour obtenir 1kWh crête (m ²)	7 - 9	9 - 11	16 - 20
Rendement annuel (kWh/kWp)	> 800	> 800	> 900
Durée de vie (ans)	20 - 30	20 - 30	5 - 20
aspect	Bleu foncé à noir homogène	Bleu luisant	Brun à noir homogène
Fabrication	Synthèse cristalline par tirage	Coulée en lingotière	Métallisation sous vide
Durée d'amortissement énergétique (ans)	4 - 5	3 - 4	2 - 3



Monocrystallin

Polycristallin

Couches minces

Figure 14: les différents types de cellules photovoltaïques [12], [7].

II.2- Méthodologie de conception, principes et dimensionnement

II.2.1- Conception

La conception d'un système photovoltaïque exige une analyse précise et rigoureuse de la situation et des données. Néanmoins la démarche proposée ici permet de concevoir un système photovoltaïque autonome. Ainsi il est judicieux de suivre scrupuleusement les points suivants :

- ✓ Evaluer le facteur régional d'ensoleillement à l'emplacement de la future installation photovoltaïque, peut se faire manuellement ou à l'aide d'un logiciel ;
- ✓ Faire un inventaire des besoins quotidiens en énergie électrique (consommation) ;
- ✓ Faire des calculs pour savoir avec précision la quantité d'énergie que peut produire le module solaire ;
- ✓ Déterminer la taille (capacité) de la batterie à installer, dans la mesure où cette dernière doit stocker de l'énergie et la restitue en l'absence du soleil ;
- ✓ Déterminer la taille du régulateur adéquat car il doit protéger l'installation contre les surtensions, la batterie contre la surcharge de courant provenant du module PV et même la décharge profonde que peut engendrer la consommation ;
- ✓ Déterminer la puissance de l'onduleur s'il le faut, car lorsque l'installation se compose d'appareils fonctionnant en électricité alternative (AC), il faut

impérativement convertir l'électricité continue (CC) que produit le module PV, en électricité alternative compatible et utilisable par ces appareils ;

- ✓ Déterminer le câblage et les protections. Dans cette étape, le choix des types de câbles électriques nécessaires à l'interconnexion des composants doit être entrepris de façon efficace pour maintenir la fiabilité et le bon rendement du système.
- ✓ Estimer les pertes réelles de l'ensemble du système et en fonction de ces pertes, il serra peut être nécessaire de réajuster la puissance totale du système[20].

II.2.2.- Principes

Dimensionner un système photovoltaïque autonome est un processus relativement complexe du fait que cette installation peut se composer d'un ou plusieurs modules photovoltaïques(1), d'un régulateur de charge (2), d'une ou plusieurs batteries (3), d'un onduleur (4) et éventuellement des récepteurs (5 et 6) (Fig.15). Ainsi, on doit prendre en considération des nombreux paramètres. Ainsi, la consommation du régulateur de charge et les pertes doivent être ajoutées à celle des récepteurs pour définir la consommation totale du système.

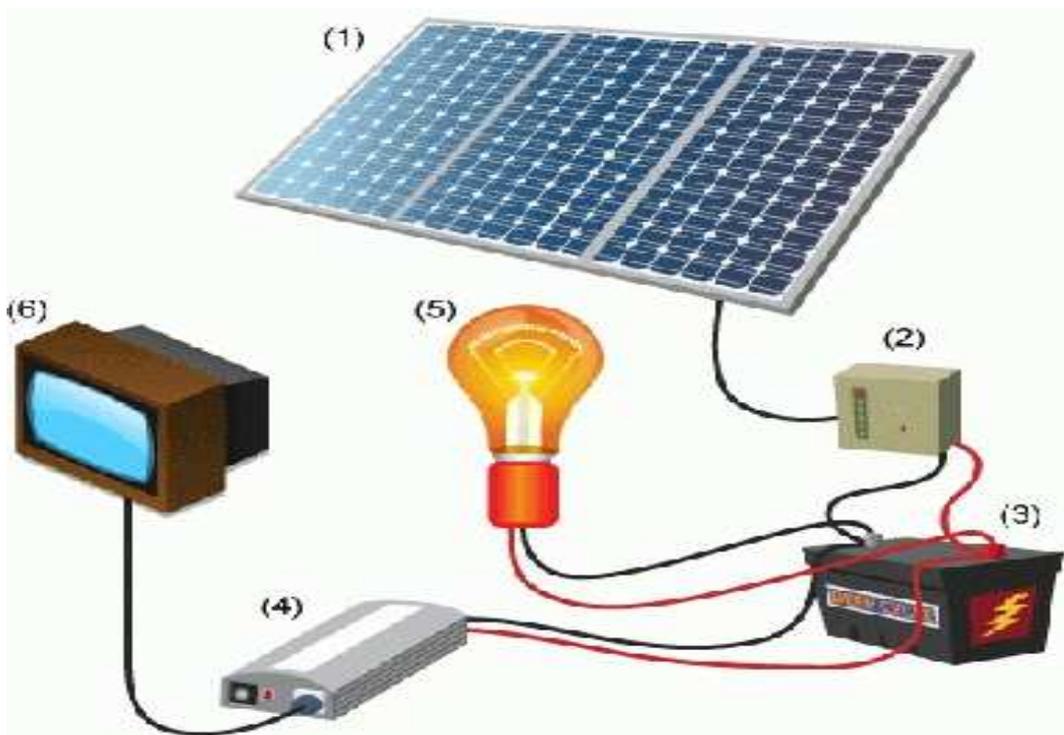


Figure 15 : Schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome [22]

Ainsi lors du dimensionnement il faut faire très attention aux différentes composantes du système photovoltaïque afin de bien comprendre la logique production-consommation.

Logique très importante dans l'utilisation du photovoltaïque, car en dehors d'autres contraintes, elle exige le respect de l'équilibre entre l'énergie produite par le générateur et l'énergie consommée par l'utilisateur. Or du fait d'une production d'énergie exclusivement diurne et parfois aléatoire (nuages), il n'est pas possible de dimensionner les systèmes photovoltaïques en équilibrant les puissances (générateur et récepteur). L'équilibre qui conditionne le bon fonctionnement d'un système photovoltaïque doit être réalisé entre l'énergie produite et l'énergie consommée sur une période donnée, par jour en général.

Il faudra donc respecter scrupuleusement ces deux principes :

- L'énergie produite doit toujours être supérieure à l'énergie consommée ;
- Définir avec assez de précisions les besoins en énergie de l'utilisateur.

Ce deuxième point est certainement le plus important car une fois les besoins définis, le bon dimensionnement d'un projet photovoltaïque n'est généralement qu'un problème technique, de calcul de puissance, tension, capacité des batteries, que nous aborderons par la suite. Cependant, la véritable clé de réussite d'un tel projet réside plutôt dans une bonne information des futurs utilisateurs aux caractéristiques du photovoltaïque[3].

II.2.3- Dimensionnement.

Pour faire les bons choix quand on s'équipe d'une source d'énergie autonome, il est important de faire un certain nombre de calculs et de suivre des étapes permettant de déterminer le matériel le mieux adapté. Ainsi, pour une bonne installation photovoltaïque autonome, il y a 6 étapes à respecter.

II.2.3.1-Bilan des puissances ou besoins en électricité.

Il s'agit ici de calculer la puissance totale quotidienne nécessaire à l'installation, pour ce faire il est nécessaire de définir exactement le nombre d'appareils susceptibles d'être utilisés par jour. Cette étape comporte peu de calculs, mais demande relativement beaucoup de réflexion car une erreur à ce stade faussera forcément les résultats jusqu'à la fin. A titre d'exemple, si la consommation est sur-estimée, l'installation risque d'être trop grande et coûtera plus cher. En outre, si elle est sous-estimée, le matériel ne sera pas adapté et s'usera plus vite.

On liste les caractéristiques électriques (disponibles généralement sur les plaques signalétiques) des appareils à faire fonctionner et ensuite on fixe la tension U pour le câblage des modules photovoltaïques (12, 24 ou 48 V). Sauf impératif sérieux, ces équipements destinataires de l'électricité photovoltaïque doivent être sobres énergétiquement.

II.2.3.2-Puissance crête adéquate du module photovoltaïque.

Afin de déterminer la puissance crête adéquate d'un panneau, il est judicieux de connaître la production journalière des modules et l'ensoleillement.

A. -Production journalière des modules photovoltaïques.

Avec les données de l'étape précédente, il sera facile de déterminer le nombre ou la quantité de modules photovoltaïques nécessaires pour couvrir les besoins en électricité. Il faut pour cela calculer l'énergie que les modules doivent produire chaque jour en connaissant toutefois l'ensoleillement de la région où se trouve l'installation afin d'adapter ces données à cette région.

B. -Ensoleillement.

L'ensoleillement est un paramètre qui varie selon la région et la période de l'année (0 à 7 KWh/m²) [11]. Sa durée peut se calculer en fonction de la latitude selon la relation :

$$d(h) = \frac{2}{15} \text{Arc cos} (-\tan(L) \tan(\delta))$$

δ = déclinaison.

Cependant il existe une carte d'ensoleillement mondiale ou l'on peut se référer afin de savoir quelle quantité d'électricité les modules installés dans tel région peuvent produire. Une fois localisée, il suffit de relever le coefficient d'ensoleillement correspondant. Si le système photovoltaïque doit être utilisé toute l'année, même pendant le mois le moins ensoleillé (hiver), il faudra pour cela utiliser le coefficient d'ensoleillement du dit mois, car c'est la période de l'année à laquelle il y a le moins de soleil et d'électricité.

Le calcul de l'énergie fournie par un panneau photovoltaïque est déterminé par l'irradiation (paramètre local dépendant de l'ensoleillement, et la puissance crête des modules qui le constituent). Cette irradiation est exprimée en KWh/m²/j (kilowatt heure par mètre carré et par jour) et correspond à l'énergie totale qui est revue sur un plan perpendiculaire aux rayons du soleil par jour. L'irradiation solaire maximale instantanée est de l'ordre de 1000W/m². Les valeurs moyennes d'une zone peuvent être fournies par des services météorologiques, parfois de l'aviation, ainsi que des organismes ou les industriels qui travaillent dans ce domaine concernés et même aussi à l'aide des logiciels à l'instar de RETScreen, PVsytHomer ou méteonorm.

C. -Puissance crête du module.

La puissance crête (P_c) d'un module est par définition la puissance qu'il délivre sous un rayonnement solaire de 1000 W/m^2 à 25°C , elle est exprimée en Watt crête (W_c) ou watt peak. Pour déterminer la P_c , il convient de considérer le cas le plus défavorable, c'est-à-dire :

Concernant l'énergie électrique journalière produite par le champ photovoltaïque, celle-ci correspond à l'énergie solaire journalière la plus faible de l'année diminuée du rendement de l'installation photovoltaïque. On notera $E_{i, \text{Min}}$ l'énergie solaire journalière la plus faible de l'année, exprimée en $\text{kWh/m}^2/\text{jour}$.

Concernant l'énergie journalière consommée par les équipements électriques, celle-ci correspond à l'énergie journalière électrique consommée la plus importante de l'année. On la notera $E_{\text{élec. Max}}$, exprimée en kWh/Jour .

Notre but étant d'évaluer la puissance crête de l'installation photovoltaïque, exprimons P_c en fonction des autres paramètres :

Ainsi qu'expliqué précédemment, pour évaluer la puissance crête, la formule suivante est la mieux appropriée :

$$P_c = \frac{E_{\text{élec, Max}} \times P_i}{E_{i, \text{Min}} \times PR}$$

P_c : puissance crête ;

$E_{\text{élec, Max}}$: énergie journalière consommée maximale (KWh/j);

$E_{i, \text{Min}}$: énergie solaire journalière la plus faible de l'année ($\text{KWh/m}^2/\text{j}$);

P_i : puissance d'éclairement (KW/m^2) aux conditions standard de test (STC) ;

PR : le ratio de performance de l'installation photovoltaïque.

Ce ratio de performance est fonction des valeurs ci-dessous :

- le coefficient de température de la puissance $K_T (P)$ est semblable d'un module à un autre (ordre de grandeur : $-0.4\%/^\circ\text{C}$) ;
- le rendement de charge/décharge des batteries peut être égal à 90% ;
- le rendement du régulateur est estimé à 95% ;
- le rendement du convertisseur (95%) ;
- la chute de tension dans les câbles est limitée à 3% ;
- les autres pertes diverses sont semblables d'une installation à une autre (2 %).

Le seul paramètre vraiment variable étant le mode d'intégration, le tableau suivant est un récapitulatif de la valeur du ratio de performance, en fonction du mode d'intégration[3].

Tableau IV : Valeur du Ratio de Performance PR en fonction de la ventilation des modules.

Modules	très peu ventilés	peu ventilés	ventilés	bien ventilés
PR	0.55	0.60	0.65	0.70

D. -Détermination de la tension du générateur photovoltaïque

La tension du générateur photovoltaïque est déterminée en fonction de la puissance crête effective calculée. Les tensions standards sont de 12, 24 et 48 Volts. Le tableau ci-dessous donne des plages de puissances crêtes avec les tensions recommandées :

Tableau V : tension du générateur photovoltaïque en fonction de la puissance [3].

Puissance du champ PV	0 à 500 Wc	0.5à 2 KWc	Plus de 2KWc
Tension recommandée	12 VDC	24 VDC	48 VDC

A ce niveau, pour disposer d'une tension et d'une puissance spécifiques à la sortie d'un générateur photovoltaïque il est très souvent nécessaire de monter des modules en série et/ou en parallèle.

Dans le premier cas (en série), le nombre de modules à monte dépend de la tension du générateur photovoltaïque et de la tension unitaire des modules disponibles. On modifie ainsi la tension mais l'intensité reste la même. Les appareils sont donc placés les uns derrière les autres, leurs tensions s'additionnent et ils sont traversés par le même courant (Fig. 16 A).

L'avantage de ce branchement est qu'il permet d'obtenir la tension que l'on souhaite. Pour donc limiter les pertes dans les câbles lors du transport de l'électricité, il est préférable d'avoir une tension élevée et une intensité réduite. Donc à puissance équivalente cela permet de réduire les pertes par effet joule, ou de réduire la section des câbles (plus économique). D'autre part, mêmes si les tensions des générateurs sont différentes, elles peuvent toujours s'additionner. On peut très bien mettre en série deux modules photovoltaïques de 12V avec un autre de 24V. On obtiendra alors 48V en sortie (Fig. 16 B).

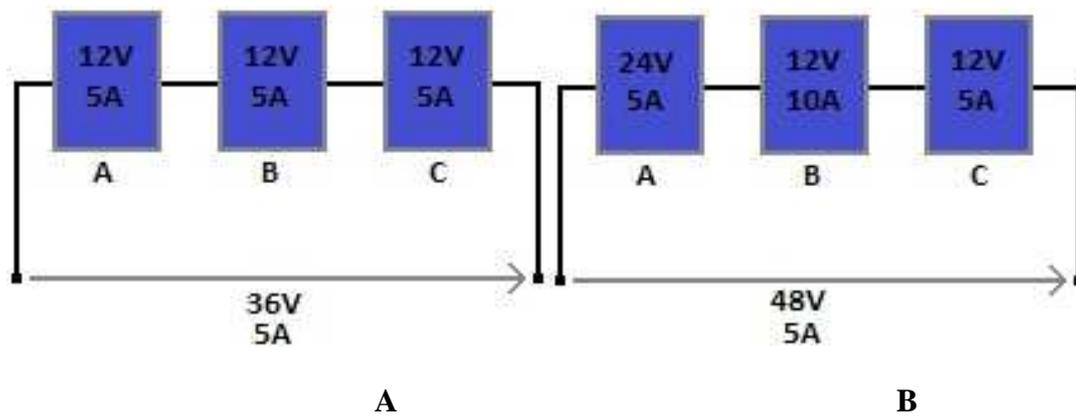


Figure 16 A et B : Cas de branchement des modules en série

Cependant il y a des inconvénients à mettre des générateurs en série, notamment en ce qui concerne l'intensité maximum que peut délivrer le système. En effet, c'est le générateur ayant l'intensité la plus faible qui l'imposera à tous les autres. Si les générateurs n'ont pas tous la même intensité, il s'agit donc d'une perte de puissance importante car certains ne seront pas utilisés au maximum de leur capacité. Un autre problème concerne la résistance interne des générateurs. Même si elles sont relativement faibles, dans une connexion en série, ces résistances s'ajoutent les unes aux autres et peuvent réduire l'intensité du courant au fur et à mesure que le nombre de générateur augmente. Au contraire, dans un branchement parallèle, les résistances se divisent. Enfin, si jamais l'un des générateurs tombe en panne, c'est tout l'ensemble qui ne fonctionnera plus étant donné que le courant est obligé de traverser chacun d'entre eux[22].

Quant au second cas (parallèle), les électrons ne traversent qu'un seul générateur. Ils ne subissent donc qu'une seule élévation de tension. Car chaque générateur crée une hausse de tension, mais jamais sur le même électron. Ainsi, pour trois modules photovoltaïques de 12V en parallèle, le courant se divise en trois groupes d'électrons qui traversent chacun un module différent. Le premier groupe d'électrons traverse le module A tandis qu'au même instant, le deuxième et le troisième groupe traversent respectivement les modules B et C. Au final, tous les électrons ont obtenu 12V (Fig. 17 A).

L'avantage de ce branchement en parallèle est qu'il permet d'augmenter l'intensité du courant. On dispose donc d'une puissance plus grande pour une tension donnée. Par exemple, la plupart des récepteurs électriques qui fonctionnent en courant continu utilisent une tension de 12V. Si plusieurs modules photovoltaïques 12V sont raccordés en série, la tension sera de 24V, 36V ou 48V et ne sera plus compatible avec des appareils qui consomment du 12V. Dans ce cas, à moins de disposer d'un convertisseur de courant, il n'y a pas d'autre choix que de

brancher les modules en parallèle au lieu de les mettre en série. De plus, on peut mettre en parallèle des générateurs ayant des intensités différentes. Les intensités de chaque générateur s'additionnent. Un autre avantage du branchement en parallèle est que lorsqu'un générateur est hors service, les autres peuvent tout de même fonctionner (contrairement au branchement en série). La perte de puissance est donc limitée à celle du générateur défectueux.

Le gros inconvénient de ce montage concerne la tension maximum qu'il peut délivrer. En effet, c'est le générateur ayant la plus faible tension qui l'imposera à tous les autres en parallèle avec lui (Fig. 17B). Dans un premier temps, il s'agit donc d'une potentielle perte de puissance. Mais, dans certains cas, cela peut même devenir dangereux. Par exemple, si on décide de brancher deux batteries ayant des tensions différentes, celle qui possède la plus forte se videra dans l'autre en créant un court-circuit, une surcharge, et une destruction prématurée. Il est donc très fortement déconseillé de brancher en parallèle des générateurs de tensions différentes[22].

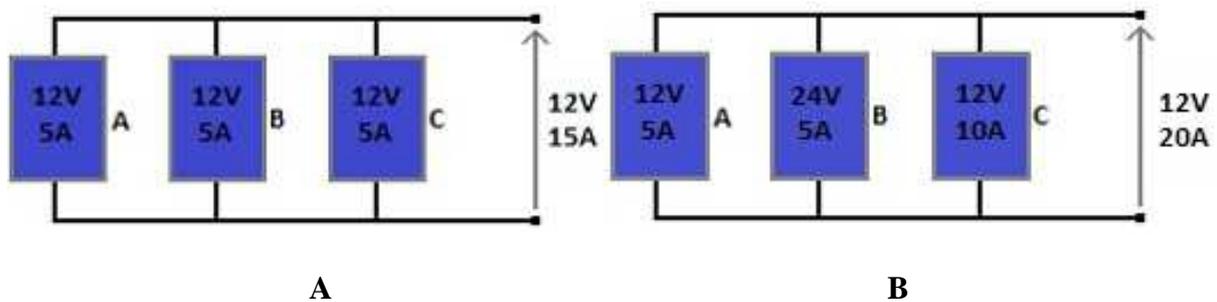


Figure 17 A et B : Cas de branchement des modules en parallèle.

Dans tous les cas, que l'on branche les générateurs en série ou en parallèle, la puissance reste toujours la même (à condition qu'ils soient identiques et qu'ils ne soient pas des dizaines).

E. -Emplacement, orientation et inclinaison des modules.

Avant toute réalisation pratique, il est nécessaire de se préoccuper du positionnement des modules car ces derniers ne délivreront leur puissance maximale que s'ils reçoivent le maximum de rayonnement, d'où le choix d'une orientation et d'une inclinaison adéquate.

Leur emplacement doit répondre aux exigences suivantes :

- ✓ Etre exposé aux rayons solaires toute la journée en toute saison ;
- ✓ Etre facile d'accès pour l'entretien ;
- ✓ Etre proche des récepteurs pour limiter les pertes dans les câbles ;
- ✓ Etre solidement fixes pour résister aux vents ;

- ✓ Etre à l'abri des jets de projectiles, des animaux etc.

Il faut également répertorier les obstacles susceptibles de porter une ombre sur les modules pendant la période d'ensoleillement de la journée. Pour cela, on identifie chaque obstacle et on vérifie si cet obstacle risque de gêner les modules à un moment de la journée, de l'année et peut être même plus tard (un arbre qui pousse). Il faut noter que lorsqu'une cellule est ombrée, c'est le courant de toute la chaîne des cellules en série qui est limité et cela peut avoir des graves conséquences si les panneaux ne sont pas équipés de diodes anti-retour.

Dans les cas les plus complexes et en l'absence d'informations fiables sur les mouvements des ombres, il sera nécessaire d'effectuer quelques calculs de géométrie, à partir :

- Des distances entre le lieu projeté pour l'installation des panneaux et les obstacles potentiels ;
- Des hauteurs des obstacles ;
- De l'inclinaison du soleil par rapport à la verticale du lieu, à midi- heure solaire ;
- Les angles entre le champ de modules, les obstacles potentiels et l'axe nord-sud.

Des abaques existent pour la vérification des ombres portées. Pour les exploiter, il est nécessaire de connaître :

- La distance D qui sépare le panneau de l'obstacle ;
- La hauteur H de l'obstacle ;
- L'angle α qui situe la position de l'obstacle par rapport à l'axe Nord-Sud (Fig.18).



Figure 18 : Gestion des masques [3].

L'orientation des modules est la direction vers laquelle ils pointent leurs cellules. Elle doit être plein Sud pour les sites de l'hémisphère Nord et plein nord pour ceux de l'hémisphère Sud. L'utilisation d'une boussole est fortement recommandée pour éviter toute approximation qui risquerait d'induire une perte de puissance consécutive à une mauvaise orientation. [3], [12]. Il est possible d'entendre parler des systèmes de poursuite du soleil. Dans ces dispositifs, les supports sont orientés différemment du matin au soir pour suivre le soleil tout au long de la journée.

Pour que les modules produisent un maximum d'énergie, il faut que leur surface soit perpendiculaire aux rayons solaires. Or le soleil d'une saison à l'autre n'a pas la même inclinaison. Selon les saisons, à midi il est plus ou moins haut dans le ciel. On doit incliner les modules pour qu'ils soient face au soleil. La valeur d'inclinaison correspond à l'angle que fait le module avec le plan horizontal. Le Tableau VI donne l'inclinaison recommandée des modules en fonction de la latitude du site. La meilleure inclinaison est la latitude du lieu +/- 5°C.

Tableau VI : Inclinaison en fonction de la latitude [3].

LATITUDE	INCLINAISON
$L < 10^\circ$	$I = 10^\circ$
$10^\circ < L < 30^\circ$	$I = L$
$30^\circ < L < 40^\circ$	$I = L + 10^\circ$
$L > 40^\circ$	$I = L + 15^\circ$

II.2.3.3- Dimensionnement de la batterie

A partir de la première étape, on peut également déterminer le nombre de batteries à utiliser. Parce que l'énergie à stocker dépend directement de la période et du rythme de consommation. Autrement dit, il faut moins de batteries si on consomme un peu d'électricité tous les jours (consommation régulière). Mais comme il s'agit de stocker le minimum nécessaire pour couvrir les besoins en électricité en l'absence du soleil, il faut donc stocker la production excédentaire antérieure des modules, puisqu'à certaines périodes de l'année, (hiver en général) ces derniers ne peuvent pas produire autant d'énergie qu'on en a consommée.

Pour donc connaître la quantité d'énergie à stocker, il existe deux méthodes en fonction de la situation:

- ✓ Une méthode simple et rapide lorsque les cycles de consommation sont parfaitement réguliers ;

- ✓ Une méthode générale, plus longue à appliquer, mais utilisable dans n'importe quelle situation.

Ainsi, lorsque les cycles sont réguliers, la quantité théorique d'énergie à stocker est égale à la production journalière des modules multipliés par le nombre de jour de charge. Dans ce cas, il faut utiliser la production journalière des modules des mois les plus faibles.

Energie stockée = production journalière des modules * nombre de jours de charges

Quant au cycle irrégulier, pour connaître la quantité théorique d'énergie à stocker, il faut soustraire à la consommation de chaque cycle la quantité d'électricité produite par les modules pendant la période de décharge. Contrairement aux cycles réguliers, il faut également intégrer les pertes du système en majorant la consommation d'environ 15%. La capacité des batteries qu'il faut choisir est alors celle du cycle où la quantité d'énergie à stocker est la plus élevée. Cela dit, l'énergie à stocker est donc égale à :

Énergie stockée = [(consommation pendant la décharge + pertes du système) - (production journalière des modules x nombre de jour de décharge)]

En ce qui concerne le nombre de jours d'autonomie de la batterie, ce chiffre doit correspondre aux périodes où il n'y a pas de production d'énergie de la part des modules (jour sans soleil, panne éventuelle...) et où la batterie seule doit prendre la relève. Ce nombre de jour permet de calculer la réserve tampon pour assurer le bon fonctionnement des récepteurs.

Pour ce qui est du taux de décharge (D) maximale acceptable, il s'agit du pourcentage de décharge exceptionnellement acceptable par la batterie sans qu'il y ait risque de détérioration. Pour déterminer la profondeur de décharge que l'on veut imposer à sa batterie, il faut arbitrer entre deux facteurs :

- ✓ Tout d'abord, plus on permet aux batteries de se décharger profondément, plus on réduit le nombre de batteries nécessaires. En effet, une batterie que l'on décharge à 100% fournit autant d'énergie que deux batteries identiques que l'on décharge à 50%. On économise donc sur le coût initial de l'installation ;
- ✓ Cependant, la durée de vie d'une batterie est directement proportionnelle à sa profondeur de décharge. Ainsi, une batterie que l'on décharge à 100% vivra deux fois moins longtemps qu'une batterie que l'on décharge à 50%.

Pour donc éviter cela tout en assurant une bonne espérance de vie aux batteries, certains constructeurs préconisent :

- 80 % pour les batteries au plomb stationnaire (spécial solaire), soit $D = 0,80$;
- 50 % pour les batteries au plomb de démarrage (de voiture), soit $D = 0,50$;
- 100 % pour les batteries cadmium/nickel soit $D = 1,00$ [3].

Afin d'assurer le bon fonctionnement en permanence des batteries et maximiser leurs durées de vie, il est conseillé de fixer D à 0,5 lors du calcul de la capacité du système de stockage.

Comme l'unité de puissance utilisée depuis le début du dimensionnement est le Wh, pour donc connaître la capacité de la batterie (Ah) à utiliser, il suffit de diviser les puissances par la tension des batteries.

$$\text{capacité (Ah)} = \frac{\text{Puissance (Wh)}}{\text{tension (V)}}$$

Au final comme il faut toujours tenir compte des précédents paramètres, l'équation permettant de définir la capacité de la batterie à choisir doit réellement être :

$$\text{capacité (Ah)} = \frac{\text{Quantité d'énergie à stocker (Wh)} \times \text{Autonomie (jours)}}{\text{profondeur de décharge (\%)} \times \text{tension batterie (V)}}$$

Ayant déterminé la capacité de la batterie à utiliser, il est judicieux de choisir parmi les technologies suivante celle qui convient le mieux à nos besoins (Tab VII). Ces batteries sont nommées : accumulateur au plomb (Pb), Nickel cadmium (Ni-Cd), Nickel Métal Hydride (Ni-MH), Lithium-ion (Li-ion) et Lithium-ion polymère (Li-Po).

Tableau VII : Caractéristiques principales des différentes technologies [7].

		Pb	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion	Li-Po
Densité énergétique Wh/kg		14-40	45-80	60-120	10-160	80-130
Nombre de cycle charge/décharge		200 à	500 à	300 à	500 à	200 à
		300	1500	500	1000	300
Profondeur de charge		80	80	80	80	80
*						
Auto décharge par mois (%)		5	20	30	10	10
Voltage nominale d'une cellule (V)		2	1.2	1.2	3.6	3.7
Plage de températures de fonctionnement (%)	charge	10 à 40	0 à 45	0 à 45	0 à 45	0 à 45
	décharge	-20 à 60	-40 à 60	-20 à 60	-20 à 60	-20 à 60

*Il s'agit ici de décharges profondes. On considère que la batterie est « morte » lorsqu'elle n'est plus capable de stocker 80% de sa capacité initiale.

Comme les batteries au plomb sont les plus communes et les plus utilisées dans les systèmes photovoltaïques, voici la description de quelques une.

- ✓ **La batterie au plomb ouverte.** Est un ensemble d'accumulateurs au plomb-acide raccordés en série et réunis dans un même boîtier pour fournir en général du 12V ou du 24V, c'est d'ailleurs le système de stockage d'électricité le plus utilisé dans l'industrie et principalement dans les véhicules automobiles car c'est la moins chère à produire. C'est pour cela qu'elle a la plus mauvaise énergie massique (35Wh/kg), qui nécessite un apport régulier d'eau et une vérification de la densité de l'électrolyte par l'intermédiaire d'un Pèse-acide, elle doit obligatoirement être disposée dans un local efficacement aéré de par des rejets d'hydrogène et d'oxygène au cours de sa recharge avec une durée de vie estimée à 4 ans maximum ;
- ✓ **La batterie AGM.** Elle comporte également un ensemble d'accumulateurs au plomb-acide raccordés en série et réunis dans un même boîtier pour fournir en général du 12V. C'est l'un des 2 modèles les plus utilisés dans le solaire en raison du fait qu'elle est étanche et qu'elle encaisse un nombre important de cycles charge-décharge. Bien que plus chère par rapport au plomb ouverte, elle est étanche et peut se passer d'une aération obligatoire. Elle possède une meilleure énergie massique, dispose d'une capacité maximale de 250 Ah avec une durée de vie estimée à 7 ans. Mais notons qu'elle ne supporte pas du tout la décharge profonde ;
- ✓ **La batterie GEL.** Disposant presque des mêmes caractéristiques que la batterie AGM, cependant avec une tension nominale et une valeur de décharge profonde similaire à la batterie plomb ouverte, elle supporte bien la décharge profonde avec une durée de vie estimée à 12 ans ;
- ✓ **La batterie GEL Long Life (Longue vie).** Elle ne comporte qu'un accumulateur au plomb-acide pour fournir en général du 2V contrairement aux autres modèles. Elle est utilisée dans des applications de type industriel en raison de son prix très onéreux et sa tension nominale qui ne permet pas de s'en servir directement sur la majorité des appareils disponibles dans le commerce. Se présentant sous forme de tubes, par rapport aux autres elle possède une énergie massique supérieure, dispose d'une capacité de plusieurs milliers d'ampères heures. En plus de se passer d'une aération obligatoire, elle supporte très bien la décharge profonde avec une durée de vie d'environ 20 ans [22].

Pour des mesures de précautions, leur mise en place doit requérir tout comme pour les modules, une attention particulière. Car leur durée de vie en dépend.

II.2.3.4- Dimensionnement du régulateur

Le dimensionnement du régulateur se fait en fonction de la tension des modules solaires et des batteries, ainsi que l'intensité maximale qu'ils peuvent générer. Cependant comme le courant délivré par le module est instable, il est préconisé d'utiliser un régulateur de charge. Ce dernier protège également la batterie contre toute surcharge. Une fois ces données recueillies, on pourra choisir sur le marché (Fig.19) parmi les technologies de régulateur celle qui sera la mieux adaptée à l'ensemble du système.



Figure 19 : Quelques régulateurs de charge disponibles sur le marché.

Il existe deux types de régulateurs : les régulateurs de charge et les régulateurs de charge/décharge. Les premiers sont les plus simples et les moins chères car ils ne contrôlent que la charge de la batterie. Les surcharges sont donc évitées, c'est pour cela qu'ils n'ont qu'une seule fonction. Ils peuvent toutefois convenir à une installation pour laquelle on est sûr de ne jamais épuiser complètement les batteries. Dans le cas contraire, les régulateurs de charge/décharge sont plus adaptés car ils permettent également d'éviter les décharges profondes en coupant l'alimentation de tout ou partie des appareils électriques.

La tension de la régulation de charge (à l'entrée) est fonction de la puissance du générateur donc du courant produit par les modules (courant de charge). Ceux-ci produisent l'électricité avec une tension soit de 12V, 24V et même jusqu'à 48V. La "tension d'entrée" du régulateur doit donc être identique.

Quant à la régulation de décharge (à la sortie), elle est fonction de la puissance totale des récepteurs donc du courant consommé par ces récepteurs (courant de décharge ou courant d'utilisation). Il est cependant rare que la tension de sortie soit différente de celle d'entrée, mais certains régulateurs haut de gamme peuvent proposer ce choix. Mais si tel n'est pas le cas, la tension de sortie du régulateur devra être la même que celle de tout le système.

A l'entrée, l'intensité admissible du courant du générateur doit être supérieure à la valeur maximale produite par le générateur. Cette intensité correspond à l'intensité maximale de chaque module multipliée par le nombre de circuits de modules montés en parallèle. L'intensité

maximale d'un module est fournie par le constructeur. Il est recommandé de choisir un régulateur dont le courant d'entre maximal admissible est égale à 1,5 fois le courant maximal de charge du panneau photovoltaïque. C'est une marge de sécurité à adoptée pour le régulateur.

A la sortie, l'intensité du régulateur doit être supérieure à la valeur maximale appelée par les récepteurs (appareils). Elle peut aussi être déterminée par la formule suivante :

$$I (A) = \frac{P}{Un}$$

- **P** : est la puissance totale en (Watt) des récepteurs lorsqu'ils fonctionnent tous au maximum de leur puissance de fonctionnement ;
- **Un** : est la tension aux bornes du générateur (en volt).

Il faut en tenir particulièrement compte dans les installations solaires de grandes tailles et celles équipées d'un régulateur de type MPPT. En effet, les modules 12V produisent en réalité 16 ou 17V dans le but justement de contrecarrer les baisses de tension dues aux câbles et à la température. Avec un régulateur normal, le surplus de tension n'est donc pas utilisé et la différence est par conséquent perdue.

En revanche, un régulateur MPPT transforme le surplus de tension en intensité. Les pertes ont donc beaucoup moins d'impacts sur la puissance de l'installation.

II.2.3.5- Dimensionnement du convertisseur de courant

Lorsque le système se compose d'appareils fonctionnant en électricité alternative (AC), il faut donc impérativement convertir l'électricité continue que produisent les modules PV en électricité alternative compatible et utilisable par ces appareils. D'où le recours à l'onduleur qui est un dispositif électronique permettant la conversion du courant continu en courant alternatif avec un choix bien précis de la fréquence.

Le convertisseur de courant se dimensionne en fonction de certains critères :

- La tension d'entrée doit être identique à celle du générateur PV et des batteries (12, 24 ou 48 V) ;
- La tension de sortie devra dépendre des appareils qui seront alimentés en AC, soit 220/230 V et 50 hertz comme indiqué sur certains appareils électroniques ;
- Pour le cas de la puissance, on se base sur la somme des puissances maximales de chaque équipement à alimenter. Cette puissance maximale peut aussi s'appeler ***puissance active***. La puissance de l'onduleur dite «*apparente*» sera légèrement

- supérieure à la puissance active pour tenir compte des éventuels courants de pointe élevés ;
- Il est important de contrôler le rendement car une partie de l'électricité transformée est consommée par le convertisseur de courant (80 et 95% de l'énergie est restituée), mais pour de bons produits, ce rendement se situe autour de 90%. De plus, la plupart des convertisseurs consomment de l'énergie même lorsqu'ils ne fonctionnent pas. Heureusement, certains sont équipés d'un système de marche/arrêt qui permet de grandes économies dans les petites installations photovoltaïques.

II.2.3.6- Dimensionnement des câbles électriques

Pour assurer le transport de l'énergie des modules jusqu'au régulateur de charge et même jusqu'à d'autres composantes du système, on ne peut pas utiliser n'importe quel câble électrique. Les câbles solaires sont faits pour résister aux conditions spéciales liées à leur utilisation. Ils sont donc les seuls à pouvoir assurer une longue durée de vie (supérieure à 30 ans) tout en minimisant les pertes d'énergie. Les câbles ordinaires, même s'ils sont conçus pour un usage extérieur, ne supportent pas aussi bien les variations de température (pouvant aller de -20°C à 80°C à proximité des modules), ainsi que l'exposition aux rayons ultraviolets et à l'ozone.

Les principaux critères de choix de câblage sont entre autres basés sur ces paramètres, ainsi que la section des câbles afin d'éviter une chute de tension importante (faible rendement du système) et du diamètre des câbles. Pour donc rester souples et maniables, ces câbles sont équipés dans la majorité des cas d'une double isolation et ne possèdent pas de substances inflammables ou toxiques (halogène) ce qui accroît donc leur sécurité.

La résistance d'un câble électrique à choisir ne doit pas dépendre de la tension ni de l'intensité du courant qui le traverse, mais de la résistivité (ρ) du matériau utilisé (cuivre, argent et fer...), de la longueur du câble, de sa section, et de la température. Le cuivre est de loin le conducteur le plus utilisé, et sa résistivité oscille entre 16×10^{-9} à 0°C et 17×10^{-9} à 25°C. L'équation permettant de connaître la résistance est la suivante :

$$R = \frac{\rho \times L}{S}$$

- la résistance R en ohm (Ω) ;
- la résistivité ρ en ohm mètre ($\Omega \cdot m$) ;
- la longueur du câble L en mètre (m) ;

- et la section du câble S en mètre carré (m²).

Le câble étant un conducteur, une partie de l'électricité qu'il transporte va se transformer en chaleur, comme dans un radiateur. Il se produit donc une baisse de tension qui peut poser problème. C'est ce que l'on appelle « l'effet joule ». Cette résistance du câble va également s'ajouter aux résistances des autres appareils de l'installation (résistance interne de la batterie par exemple).

Les pertes dans les câbles sont inévitables, mais il convient de les réduire au maximum afin de rester dans des choix de section acceptables. Ce choix est fait en fonction du courant, de la tension nominale du système et de la longueur des câbles. On considère que les pertes de tension ne doivent pas excéder un certain pourcentage pour une tension de 12 V. ainsi, la section des câbles calculée doit être telle que les chutes maximales de tension entre eux soient inférieure aux limites recommandées suivantes :

- Ligne photovoltaïque- régulateur : 3% ;
- Ligne régulateur - convertisseur : 1% ;
- Ligne régulateur - batteries : 3% ;
- Ligne principale convertisseur - appareils : 5% ;
- Ligne principale régulateur- éclairage : 3%

Ainsi, la section sera égale à :

$$S \text{ (mm}^2\text{)} = \frac{2 L \times I}{56 (V_a - V_b)}$$

L : Longueur du câble (m)

I : intensité maximale admissible (A)

V_a –V_b : Chute de tension maximale (%) [7].

Pour simplifier ces calculs, il existe des abaques (présenté en annexe) pour choisir convenablement la section des fils conducteurs. Ceux-ci ont été établis en fonction des tensions en CC(12, 24 et 48V) et CA (220V).

En ce qui concerne les protections électriques, la mise à la terre, les parafoudres, les disjoncteurs et fusibles sont nécessaires pour isoler et protéger le circuit électrique voir même le système contre tous les défauts électriques (Surcharge, surtension, court-circuit). Cependant, il est fort possible que les composants du système aient déjà leurs propres protections.

Conclusion

Il a été question pour nous dans ce chapitre de présenter les principales étapes de confection des modules photovoltaïques c'est-à-dire partir du grain de sable (silice) au module générateur). Par la suite une méthodologie pour les principales étapes de conception et du dimensionnement d'un système autonomes a suivie. C'est ainsi qu'après avoir présenté étape par étape avec des formules à l'appui comment déterminer les besoins énergétiques, la puissance crête du module, le régulateur de charge/décharge, les câbles électriques et la nécessité ou non d'utiliser des batteries et même un onduleur dans un système, des mesures de précautions ont été avancées. Il s'agit tout simplement des voies et moyens (règles) à adopter pour bénéficier pleinement d'une installation photovoltaïque autonome. C'est ainsi qu'en application de ces principes le dimensionnement d'un prototype fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE III : Dimensionnement d'un prototype et impacts

Introduction

Pour le dimensionnement du prototype, il suffit de suivre scrupuleusement les étapes présentées au chapitre précédent. Ensuite, quelques impacts (positifs ou négatifs) liés au système photovoltaïque seront présentés.

III.1- Dimensionnement d'un prototype

Le dimensionnement de ce prototype permet de valoriser le travail initié antérieurement et prouver l'indépendance énergétique d'un tel système.

III.1.1- Besoins en électricité

Il s'agit ici de calculer la puissance totale quotidienne nécessaire à l'installation. Pour ce faire il est nécessaire de définir le nombre d'appareils susceptibles d'être utilisés sans nuire au bon fonctionnement et à la durée de vie du système. Le Tableau ci-dessous donne un récapitulatif des dits appareils avec leurs temps d'utilisation journaliers.

Tableau VIII : Bilan de consommation en électricité.

Appareils	Quantité	Puissance unitaire (w)	Utilisation quotidienne (h)	Puissance (w)	Energie (w/j)
Récepteur Courant Continu (CC)					
Ampoules	7	5	4	18	140
Besoins quotidiens en énergie CC: W_1					140
Récepteur Courant alternatif (CA)					
Poste radio	1	20	2	20	40
Ordinateur	1	50	3	50	150
Télévision	1	50	4	50	200
Divers	/	/	Occasionnel	/	35
Besoins quotidiens en énergie CA: W_2					425
Besoins quotidiens en énergie CC et CA: $W_3 = W_1 + W_2$					565
Perte du système: $W_p = 20\% W_3$					113
Besoins quotidiens en énergie au total : $W_t = W_p + W_3$					678

III.1.2- Puissance crête adéquate

Pour l'obtenir, il faut de prime à bord situer géographiquement la localité, ensuite prendre en compte certains paramètres à l'instar de l'ensoleillement, l'énergie journalière consommée maximale, l'énergie journalière la plus faible de l'année et même le ratio de performance.

III.1.2.1- Ensoleillement

L'ensoleillement est fonction de la zone géographique (Tab.IX). Dans le cadre de notre étude, nous avons travaillé avec les données climatiques de la ville d'Antananarivo recueillies auprès de la NASA (données POWER) par le logiciel RETS creen. Elles sont consignées dans le Tableau X.

Tableau IX : Situation géographique du dimensionnement. Source : RETS Creen

	Unité	Lieu des données climatiques
Latitude	°N	-18,8
Longitude	°E	47,5
Élévation	m	1 276
Température extérieure de calcul de chauffage	°C	8,9
Température extérieure de calcul de climatisation	°C	28,2
Amplitude des températures du sol	°C	13,9

III.1.2.2- Puissance crête du module.

Connaissant les besoins en électricité quotidienne, l'ensoleillement maximal et minimal, on peut aisément calculer la puissance crête du module en utilisant la formule présentée dans le chapitre précédent. Avec un ratio de performance ventilé, notre puissance crête est donc :

$$P_c = \frac{0.678 * 1}{3.48 * 0.65}$$

$P_c = 0.2997 \approx 0.3 \text{ KWc} = 300 \text{ Wc}$

La puissance crête de 300 Wc permet l'utilisation de tous les appareils pendant l'ensoleillement. Néanmoins si l'on espère continuer à faire fonctionner ces appareils en l'absence du soleil, la nécessité d'une batterie s'impose. Il est à noter qu'avec une latitude de 18,8° le module devra être incliné de 20°.

III.1.3 - Capacité de la batterie

Pour connaître la capacité de la batterie qui permettra au système de consommer le double de sa puissance maximale en l'absence de rayonnement, nous appliquons la formule présentée plus haut à savoir :

$$\text{Capacité (Ah)} = \frac{300 * 2}{0.5 * 12}$$

$$\underline{\text{Capacité (Ah) = 100}}$$

III.1.4- Régulateur adéquat

Il s'agit ici de définir le régulateur de charge/décharge dont on a besoin pour optimiser la durée de vie du système. Connaissant déjà la tension du module (12V) et la puissance maximale (565 W) que peut supporter ce régulateur, dans la mesure où ce dernier ne tient pas compte des pertes engendrés dans le système, son intensité maximale est:

$$\text{Intensité (A)} = \frac{565}{12}$$

$$\underline{\text{Intensité (A) = 47 A}}$$

L'intensité du courant étant de 47 A, il faut choisir parmi les technologies de régulateur (shunt, série, PWM ou MPPT), un régulateur de 50 A.

En guise de remarque, les régulateurs Shunt et Série sont plus anciens et les moins chers, mais comme ils ne permettent pas une recharge complète de la batterie et ne se trouvent quasiment plus sur le marché, le choix se portera donc sur le régulateur MPPT.

III.1.5- Justification d'utiliser un convertisseur

Il n'est pas nécessaire d'avoir un convertisseur de courant dans un système photovoltaïque de petite taille. Compte tenu que dans ce dimensionnement il y a des appareils qui fonctionnent en AC, l'utilité d'un convertisseur est justifiée. Ce choix est d'ordre économique car son prix est relativement élevé, et une partie de l'électricité transformée est perdue (entre 1 à 10%). Mais nous envisageons un double circuit électrique, avec une partie des appareils fonctionnant en 12V CC et l'autre en 220VAC. Cela dit, un convertisseur de **500W** serait idéal car sa puissance est supérieure à celle des appareils fonctionnant en AC (425 W).

Tableau X : Données climatiques à Madagascar (Antananarivo/Ivato) : source RETScreen.

Mois	Température de l'air (°C)	Humidité relative (%)	Rayonnement solaire quotidien – horizontal (kWh/m²/j)	Pression atmosphérique (kPa)	Vitesse du vent (m/s)	Température du sol (°C)	Degrés-jours de chauffage (°C-j)	Degrés-jours de climatisation (°C-j)
Janvier	20,5	79,0%	5,22	89,7	3,1	23,8	0	326
Février	20,7	79,8%	5,08	89,6	3,1	22,8	0	300
Mars	20,1	79,5%	4,77	89,8	3,1	22,3	0	313
Avril	19,2	77,0%	4,33	89,9	2,8	21,3	0	276
Mai	16,8	78,3%	3,81	90,1	2,5	19,6	37	211
Juin	14,6	78,2%	3,48	90,3	2,5	17,4	102	138
Juillet	14,1	76,5%	3,51	90,4	3,1	17,3	121	127
Août	14,5	74,1%	4,18	90,4	3,4	18,9	109	140
Septembre	16,3	70,2%	5,10	90,2	3,4	22,4	51	189
Octobre	18,5	68,8%	5,68	90,1	3,4	24,9	0	264
Novembre	19,7	71,1%	5,65	90,0	3,1	26,3	0	291
Décembre	20,2	77,6%	5,42	89,8	2,8	25,5	0	316
Annuel	17,9	75,8%	4,68	90,0	3,0	21,9	420	2 889
Mesuré à (m)					10,0	0,0		

III.1.6- Section des câbles électriques

C'est sur la partie courant continu de l'installation que les intensités sont les plus importantes, c'est donc dans cette partie que se pose le problème des pertes joules et des chutes de tensions dans les câbles. Le but de ce choix étant de réduire les pertes à moins de 15% de l'énergie produite par le module.

- la section de câble reliant le module au régulateur situé à **5 m** est :

$$S \text{ (mm}^2\text{)} = \frac{2 * 5 * 50}{56 * 3}$$

S = 2.97 mm² donc on prendra un câble de section 3 mm².

- la section de câble reliant le régulateur à la batterie au régulateur situé à **4 m** est :

$$S \text{ (mm}^2\text{)} = \frac{2 * 4 * 50}{56 * 3}$$

S = 2.38 mm² donc on prendra un câble de section 2.5 mm².

- la section des conducteurs reliant le régulateur au convertisseur si on admet une longueur maximale de **5 m** est :

$$S \text{ (mm}^2\text{)} = \frac{2 * 5 * 50}{56 * 1}$$

S = 8.92 mm² donc on prendra un câble de section 10 mm².

- Section de câble reliant le régulateur au tableau de distribution des éclairages si on admet une longueur maximale de **5 m**.

$$S \text{ (mm}^2\text{)} = \frac{2 * 5 * 50}{56 * 3}$$

S = 2.97 mm² donc on prendra un câble de section 3 mm².

En outre, des tableaux permettant de connaître directement la résistance d'un câble, ou de choisir une section en fonction de la longueur et de l'intensité sont présentés en annexe. Ainsi, une fois même l'installation terminée, il est encore possible de réduire les pertes dans les câbles en consommant l'énergie de façon optimale et même prolonger la durée de vie de l'installation. Pour cela, il faudrait faire l'effort si possible de ne pas allumer tous les appareils en même temps.

III.2- Validation des calculs par un logiciel

De nos jours il existe plusieurs logiciels qui aident à renforcer les bonnes décisions en matière énergétiques (Energy Periscope, Hybrid2, HOMER et RETS creen etc ...) [2]. Dans le cadre de cette étude nous avons opté pour le logiciel RETS creen International, en utilisant la version 4 qui est disponible gratuitement, en plus il est très populaire et est utilisé dans plus de 200 pays et par plus de 260 000 utilisateurs [2]. RETS creen permet de simuler différents types de projets, pour différents types d'établissement ou de technologies et selon deux méthodes d'analyse. La méthode 1 permet une analyse simple et courte, tandis que la méthode 2 est caractéristique d'une analyse approfondie nécessitant de nombreuses données.

III.2.1- Interfaces

RETS creen possède un grand avantage dans la mesure où son interface est constituée des feuilles de calculs sophistiquées qui s'ouvrent dans Excel. Son utilisation est simple et intuitive dans la mesure où il suffit de choisir les technologies ou d'entrer les données en commençant par le haut de la feuille de calculs de l'onglet démarrer (relativement court à remplir) et les résultats s'affichent et se mettent à jour automatiquement au fur et à mesure que les informations sont entrées. Dans ce même onglet si c'est la méthode d'analyse 1 qui est choisi, il y aura deux onglets qui seront ouvertes (model énergétique et charge réseau) par contre si c'est la méthode 2, en plus de ces deux onglets il y aura l'analyse des coûts, l'analyse des émissions, l'analyse financière et l'analyse de risque.

III.2.2- Entrée des données

Tout débute avec l'onglet « démarrer », on entre les informations donc le nom du projet, le lieu du projet et pour qui et par qui le projet est réalisé, ensuite on choisit selon les options définies le type de projet, la technologie désirée et le type de réseau à simuler (fig. 20).

Il faut aussi choisir le type d'analyse, méthode 1 ou 2 et le pouvoir calorifique de référence. Ensuite, il faut définir le site car certains sites de partout à travers le monde sont déjà entrés dans la base de données de RETS creen avec des données moyennes par mois de gisement solaire (en kWh/m²/jour) et éolien (en m/s). Il ne suffit que de sélectionner le pays, la province ou l'état et finalement la ville désirée. En choisissant le type d'analyse : méthode 1 (simplifiée), on a une brève analyse des émissions et financière.

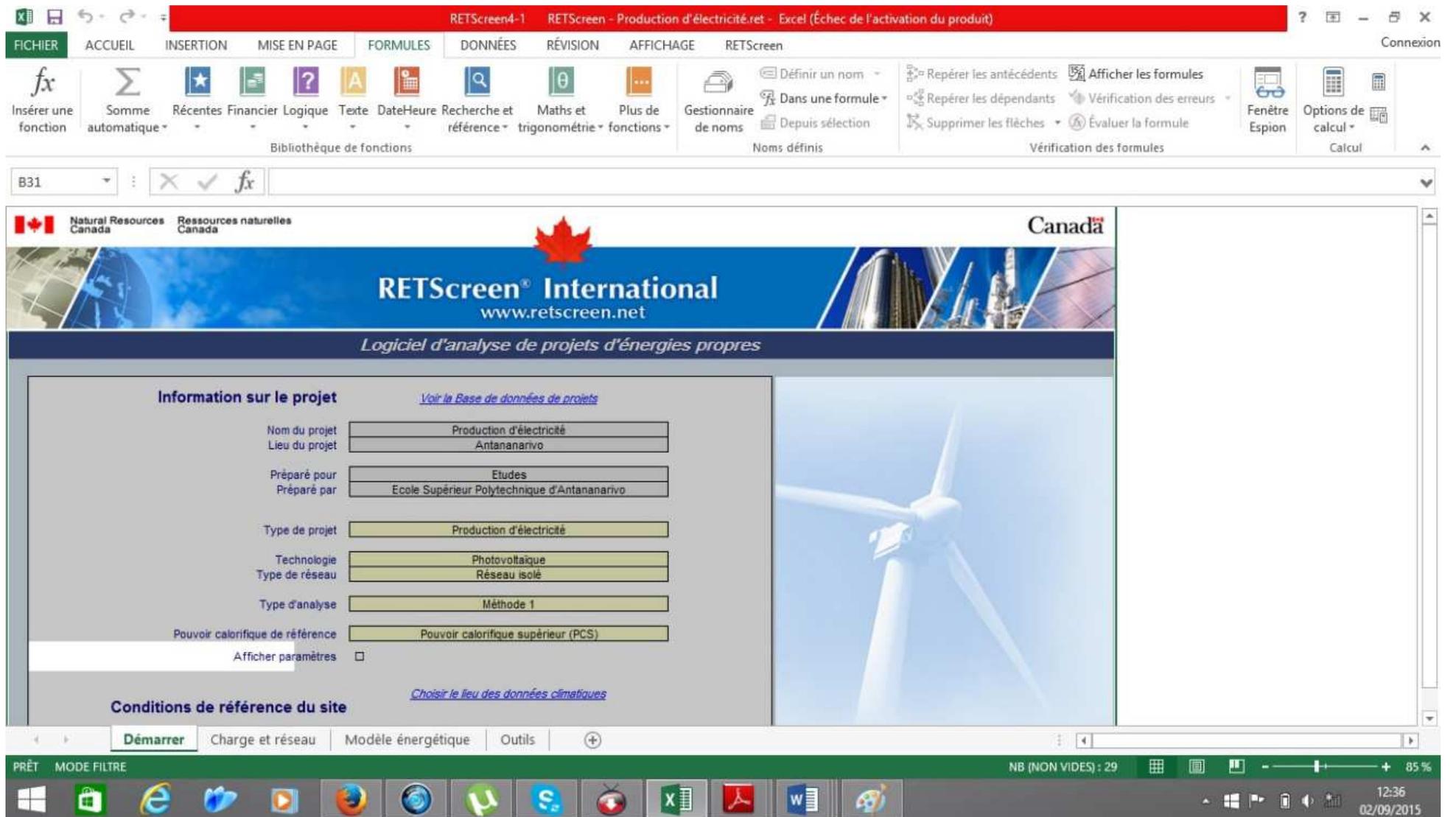


Figure 20 : interface RETScreen

Si c'est le système de production d'électricité, les panneaux solaires photovoltaïques ou les éoliennes doivent être sélectionnés parmi la base de données des équipements de RETScreen. On doit déterminer leur facteur d'utilisation en pourcentage et indiquer le prix de l'électricité exportée en \$/MWh.

Dans la section analyse d'émissions, les frais de transactions pour les crédits de GES en pourcentage et le crédit pour réduction de ces GES en \$/tonne de CO₂ doivent être entrées. On peut aussi choisir une option pour comparer la réduction nette d'émissions de GES en tonnes de CO₂ (automobiles et camions légers non utilisés, litres d'essence non consommés, barils de pétrole brut non consommés, individus réduisant leur consommation énergétique de 20%,hectares de forêt absorbant du carbone et tonnes de déchets recyclés).

Quant à la section de l'analyse financière, les paramètres financiers à définir sont le taux d'inflation, la durée de vie du projet et le ratio d'endettement. Le coût pour le système de production d'électricité doit être déterminé (coût initial pour les éoliennes ou les panneaux et pour les autres équipements). Les autres sections à remplir sont les encouragements et subventions, les frais annuels et paiements de la dette et les économies et revenus annuels.

III.2.3- Résultats pouvant être obtenus

Les résultats pouvant obtenus sont une analyse financière et une analyse des émissions. Cependant le manque de détails sur les informations de références à entrer et le temps imparti ne permettent pas de faire une comparaison avec les résultats obtenus pour ce projet. De plus pour les systèmes photovoltaïques, le coût des matériaux est tellement instable qu'il est difficile de comparer encore une fois le coût des systèmes.

III.2.4- Récapitulation

Le tableau ci-contre donne un récapitulatif des résultats obtenus ainsi que les prix des différents produits sur le marché.

Tableau XI : Récapitulatif des résultats, prix et caractéristiques

		caractéristiques	Prix (Ar)	Poids (Kg)
Puissance système (W)		678	/	/
Module (Wc)		300	700 000	12
Batterie (Ah)		100	480 000	33
Régulateur (A)		50	120 000	0.275
Câbles électriques (mm ²)		2.5 et 5		/
Convertisseur (W)		500	146 500	0.5
lampes	W	9	6 500	/
	W	5	5 000	/

III.3- Impacts des systèmes photovoltaïques

En tant que source d'énergie électrique, un système photovoltaïque offre non seulement des avantages mais aussi des inconvénients.

III.3.1- Impacts négatifs

Sur le plan social, la fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologique et requiert des investissements élevés, ce qui rend le prix d'installation encore onéreux de nos jours. Ils ne conviennent pas aux utilisations à forte consommation d'énergie, car le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28% en laboratoire). Il devient impératif d'utiliser des appareils électroménagers parcimonieux en énergie (lampe fluorescente compacte, réfrigérateur et conservateur performants, etc.).

Sur le plan économique, il existe un décalage entre la période de production (ensoleillement) et les besoins de consommation. Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome qui ne revend pas son surplus d'électricité au réseau, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé. En cas de mauvais temps prolongé, il faut un chargeur pour recharger la batterie d'accumulateurs à partir d'une autre source d'énergie. Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. De plus, il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit. La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans pour les modules, entre 2 à 12

ans pour les batteries (GEL Long Life) et environ 10 ans pour le régulateur et le convertisseur. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe [28].

III.3.2- Impacts positifs

Quant aux impacts positifs, nous pouvons les répartir en trois volets : social, économique et environnemental. La technologie photovoltaïque présente de nombreux avantages.

III.3.2.1- Social

Sur le plan social, l'utilisation des énergies renouvelables (cas du solaire) à travers les lampes électriques permet de mettre fin à l'emploi de bougies et de pétrole lampant, qui sont des produits inflammables et dangereux pour la santé.

La conservation au froid des médicaments et des vaccins, l'utilisation d'équipements médicaux électriques ou encore l'éclairage correct des salles de soins sont désormais possibles ceci dans le cadre de la santé.

L'éclairage public par cette énergie favorise la lutte contre l'insécurité, en réduisant notamment le nombre de vols (sécurité). Ils sont flexibles et peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre aux besoins de l'utilisateur en matière d'électricité.

Sur sites isolés, cette énergie offre une solution pratique pour obtenir de l'électricité à moindre coût.

Ainsi ils procurent à l'utilisateur une autonomie accrue de fonctionnement indépendant du réseau ou système de secours pendant les pannes d'électricité.

III.3.2.2- Economique

Sur le plan économique, une réduction se fait sentir au niveau de la facture énergétique, car ils n'exigent presque aucun entretien, de plus leurs coûts de fonctionnement sont très faibles et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

Ils fonctionnent de façon rentable dans les régions éloignées et dans de nombreuses applications résidentielles et commerciales (télécom, distributeurs automatiques de billets, pompage). Il y a aussi le développement de nouvelles activités et création d'emplois dédiés.

En plus en matière de technologie, la pérovskite est un matériau prometteur destiné à remplacer le silicium plus coûteux.

III.3.2.3- Environnemental

A partir du moment où ils entrent en activité, les panneaux solaires photovoltaïques produisent de l'électricité sans générer de CO₂. 100% de l'empreinte carbone des panneaux photovoltaïques est donc concentrée dans sa fabrication, car utilisant de l'énergie non verte, elle produit du CO₂. Les études estiment que 3 ans de fonctionnement ou tout au plus 4 ans au maximum, sont nécessaires pour qu'un panneau compense le CO₂ libéré pendant sa fabrication. A comparer avec la durée de vie générale d'une installation photovoltaïque : entre 20 et 30 ans. Dit autrement, entre son installation et sa fin de vie, un panneau solaire aura produit au minimum 7 fois l'énergie nécessaire à sa fabrication. Plus précisément 1 MWh d'électricité verte représente 456 kg de CO₂ « évités ». A l'échelle d'un cycle de fonctionnement de 20 ans, on considère qu'une installation d'électricité solaire génère, par KWh, entre 50 et 90% (selon les modèles) d'émissions de dioxyde de carbone de moins qu'une centrale thermique traditionnelle.

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

Notons enfin que les panneaux solaires photovoltaïques sont recyclables à 85%. Le silicium peut être utilisé pour fabriquer de nouvelles cellules, tandis que l'aluminium des cadres est fondu à nouveau.

Conclusion

Il ressort de ce chapitre que pour satisfaire les besoins en énergie électrique d'une maison rurale autonome nécessitant faire fonctionner des équipements électriques fonctionnant en CC et en AC pour une puissance totale de 565W/jpendant au moins 8heures en absence du soleil ici à Antananarivo (Madagascar), Il faut s'équiper d'un module de 300Wc, d'une batterie de 100 Ah, d'un régulateur MPPT de 50A, d'un convertisseur de courant d'une puissance de 500W et des câbles électriques de différentes longueurspour les raccordements. Le nombre d'année pour amortir le cout d'investissement devra dépendre de la qualité des matériaux acquis et des soins que l'on prendra pour le système.

Ainsi parée, cette maison bénéficiera ainsi pendant plusieurs années d'une énergie gratuite. En plus elle contribuera énormément à la lutte contre le réchauffement climatique.

Conclusion générale

En somme, les énergies fossiles et fissiles ont et continuent de nos jours à contribuer au développement ou à la destruction de notre planète. Toutefois il s'avère qu'au vu de leur réserve décroissante et de leur impact sur l'environnement, l'humanité dans le souci de ne pas en priver les générations futures s'est lancée dans la quête des solutions alternantes, relatives aux énergies renouvelables. Elles sont constituées entre autre de l'hydroélectricité, du solaire, de l'éolienne, de la géothermie et de la marémotrice etc. Ces énergies aptes à la régénération permettent donc de répondre à une partie de nos besoins énergétiques actuels (chaleur, électricité et carburant) et même futurs malgré que les coûts d'acquisition restent encore élevés dans les pays en voie de développement surtout en Afrique subsaharienne.

De ce fait, cette étude visait une contribution à l'effort global dans l'optique d'endiguer ce fléau. Nous avons ainsi pu présenter une méthodologie viable au bon dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome, avant de réaliser un prototype par la suite.

Il ressort que pour satisfaire les besoins en énergie électrique d'une maison rurale autonome nécessitant consommer des équipements électriques d'une puissance journalière de 565 W, il suffit de s'approvisionner d'un module de 300 W, d'une batterie de 100 Ah de type GEL Long Life, d'un régulateur MPPT de 50A, d'un convertisseur de courant d'une puissance de 500W et des câbles électriques de longueurs différentes pour les raccordements. Les équipements électriques qui y seront utilisés sont constitués de 07 lampes économiques de 5 W chacune fonctionnant en CC et d'un poste radio de 20W, un téléviseur et un ordinateur de 50 W chacun tous fonctionnant en AC pour une réserve en autonomie de 08 heures pour tout le système. Cette maison bénéficiera ainsi pendant plusieurs années d'une énergie gratuite tout en contribuant à la préservation de l'environnement.

Compte tenu des demandes sans cesse croissantes de nos populations en énergie, des difficultés à satisfaire ou à étendre les réseaux électriques dans les campagnes ou en périphérie de certaines villes, le potentiel de développement engendré par l'énergie solaire photovoltaïque mériterait d'être mieux pris en compte dans les politiques de développement. Car elle serait une solution viable pour la lutte contre la dépendance énergétique et les problèmes environnementaux rencontrés.

Références bibliographiques et webographiques

[1] **Journal Officiel De La République Française** : La transition énergétique 2020-2050 un avenir à bâtir, une voie à tracer avis du conseil économique, social et environnemental 2013 PDF 122 p.

[2] **Joséanne BÉLANGER-GRAVEL 2011** : analyse technico-économique d'un système hybride éolien photovoltaïque en comparaison avec les systèmes Photovoltaïque et éolien seuls. Mémoire de Maitrise. Univ. Montréal, Ecole Polytechnique 216 p.

[3] **TCHANA NKOUMI Max Jimmy 2009** : Outil d'aide au dimensionnement des systèmes photovoltaïques domestiques, Ecole nationale supérieure polytechnique de Yaoundé. Mém. Ingénieur génie électrique. Mémoire en ligne.

[4] **Syndicat des énergies renouvelables SOLER**, Groupement Français des Professionnels du Solaire Photovoltaïque dernière révision du document : juin 2012

[5] **ANDRIANAIVO Lala 2014** : cours ressources énergétiques Master I.

[6] **LAHATRA Jean Edhi 2011** : la géothermie exploitation et utilisation. Mém. De Master I. Univ. De Mahajunga fac sciences 62 p.

[7] **RAVOLASON Haja Andrianarivo 2014** : Etude d'électrification par énergie photovoltaïque pour la climatisation des salles du bloc technique de vontovorona ESPA avec progiciel de dimensionnement « solarclim ». Mém. Ingénieur. ESPA 113 p.

[8] **Andriamiarimanana Henintsoa 2014** : énergies renouvelables et soutenabilité économique. Mém. De Maitrise, Univ. Antananarivo 61 p.

[9] **Jean Fabrice Geraldo 2009** : élaboration de logiciel guide pour l'implantation de champ de module photovoltaïque dans un lieu donné. Mém. De fin d'étude pour l'obtention du CAPEN ENSET Univ. Antsiranana 102 p.

[10] **hespul.org** : Systèmes photovoltaïques : fabrication et impact environnemental Juillet 2009 pdf 35 p.

[11] **Myénergie.lu** : Conception et planification d'une installation solaire photovoltaïque pdf 8 p.

[12] **Hallou solaire** : La fabrication des cellules photovoltaïques document - 634234564258437500-2.pdf 18 p.

- [13] **Christian Matulu 2010** : Etude et dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome pour une alimentation permanente Graduation en sciences appliquées Univ. Lumumbachi Fac. Polytechnique Mémoire online.
- [14] **Olivet, J. 1982** : *.Le chauffage géothermique*. EYROLLES : Paris, 282pages.
- [15] <http://blogs.worldbank.org/voices/fr/tout-ce-que-vous-devez-savoir-sur-l-energie-et-la-pauvrete>. visité le 13 juillet 2015.
- [16] <https://www.planeteenergie.com> visité le 17/03 2015 à 16h
- [17] https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_thermique visité le 21/03 2015 à 18h
- [18] [https://www.International energy outlook 2011 US Energy Information Administration](https://www.International%20energy%20outlook%202011%20US%20Energy%20Information%20Administration). visité le 27/03/2015 à 20h
- [19] **IEA (2012a)**, [www.iea.org/books Energy Technology Perspectives 2012](http://www.iea.org/books/Energy%20Technology%20Perspectives%202012), OECD/IEA pdf 14 p.
- [20] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_nucléaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_nucl%C3%A9aire) visité le 21/03/2015 à 18h
- [21] <http://energiesdemain.e-monsite.com/pages/presentation-de-l-energie-nucleaire/l-energie-nucleaire>. visité le 27/05/2015 à 20h
- [22] <https://www.Arebor-Energie> : comment réaliser le dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome. visité le 08/05/2015 à 18h
- [23] [https://fr.wikipedia.org/wiki/énergie_marémotrice](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%A9nergie_mar%C3%A9motrice) visité le 07/03/2015 à 18h
- [24] <http://www.mtaterre.fr/dossier-mois/archives/chap/1104/Une-energie-marine-bien->
- [25] <https://www.economiedenergie.fr> : visité le 20 mai 2015 à 21 h.
- [26] [https://www.Global Wind Energy Council](https://www.Global%20Wind%20Energy%20Council) consulté le 13/05 2015 à 16h
- [27] <https://www.energies-environnement.fr>. visité le 04/04/2015 à 14.

Auteur :

NGOUMDOUM FOUMOUO Dominique

Titre : « Conception, dimensionnement et réalisation partielle d'un système solaire photovoltaïque pouvant satisfaire aux besoins en électricité d'une maison rurale »

Nombre de pages : 62

Nombre de tableaux : 11

Nombre annexes : 03

Nombre de figures : 20

RESUME

L'humanité fait face de nos jours à des crises majeures, parmi elles demeure l'épineux problème énergétique. Les énergies fossiles ou fissiles ont et continuent de participer à l'édification ou la destruction de la planète. Dans le souci de préserver l'environnement, d'autres sources d'énergies ont été découvertes. Ces énergies dont le renouvellement se veut à la fois naturel, très rapide à l'échelle de temps humain, et surtout inépuisable permettent donc de répondre à une partie des besoins énergétiques actuels, malgré leurs couts d'acquisition encore élevés.

Suite à la présentation des principales étapes de confection des modules photovoltaïques, ont suivi les principes de conception et du dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome et enfin des mesures de précautions ont été proposées. Ceci à travers les besoins énergétiques, la puissance crête du module, le régulateur de charge/décharge, les câbles électriques et la nécessité ou non d'utiliser des batteries et même un onduleur dans un tel système.

De ce fait, Il en ressort que la satisfaction des besoins en énergie électrique d'une maison rurale autonome dans la ville d'Antananarivo nécessite une puissance journalière de 565 W/j, avec une autonomie de 8 heures. Ceci impliquant inéluctablement de s'approvisionner d'un module de 300 Wc, d'une batterie de 100 Ah, d'un régulateur de type MPPT de 50A, d'un convertisseur de courant d'une puissance de 500W et des câbles électriques de différents diamètres. L'amortissement du cout d'investissement et la durée de vie d'un tel système dépendront logiquement de la qualité des appareils acquis et de son utilisation. Ainsi donc, ce dimensionnement contribuera non seulement à la lutte contre le réchauffement climatique, mais aussi à la nullité des charges liées à son utilisation.

Mots clé : *conception, dimensionnement, photovoltaïque, autonome, Antananarivo*

ABSTRACT

The humanity nowadays major crises, among them house thorny energy problem. The fossil or fissile energies have and continue to participate in the construction or destruction of the planet. In order to preserve the environment, other energy sources have been discovered. These energies whose renewal is meant both natural, very fast to the human time scale, and especially so inexhaustible provide answers to some of the current energy needs, despite their still high acquisition costs.

Following the presentation of the main steps of manufacture of photovoltaic modules, following the principles of design and sizing of an autonomous photovoltaic system and finally precautionary measures have been proposed. This through the energy needs, the peak power of the module, the charge / discharge control, electrical cables and the need or not to use the same batteries and an inverter in such a system.

Thus, it appears that meeting the electrical energy needs of an independent rural house in the city of Antananarivo requires a daily capacity of 565 W / days, with an autonomy of 8 hours. This inevitably involved to source a 300 Wp module, a 100 Ah battery, a 50A MPPT controller, a power converter with an output of 500 W and electric cables of different diameters. The amortization of the investment cost and the lifetime of such a system logically depend on the quality of acquired equipment and its use. Thus, this design will not only contribute to the fight against global warming, but also to the nullity of charges related to its use.

Keywords : *design, sizing, photovoltaic, autonomous, Antananarivo*

Encadreur : Monsieur RAKOTONINDRAINY Professeur Titulaire

Adresse de l'auteur: Lot VT85M Bis A à Andoanimandroseza Antananarivo(101) Madagascar

Téléphone : 0346145660

Adresse E-mail : dominiquefoumouo@yahoo.fr/ foumouodominique@gmail.com