

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

-----  
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

-----  
Domaine : Science de l'ingénieur

-----  
Mention : Génie Electrique

-----  
Parcours : Machines électriques, Réseaux d'énergie  
électrique et Energies Renouvelables



*Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de*

*Master 2 en Génie Electrique*

*Titre : Ingénieur*

DIMENSIONNEMENT DE L'ELECTRIFICATION  
D'UN VILLAGE : CAS DU CHEF-LIEU DE LA  
COMMUNE RURALE DE MAHASOLO PAR UNE  
CENTRALE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

**Présenté et soutenu par :**

*Harisoa Diamondra Julpheli RAKOTONIRINA*

**Directeur de mémoire :**

*Docteur Solofo Hery RAKOTONIAINA, Maître de conférences et Enseignant Chercheur à l'ESPA*

*Jean Christophe MARA SOA HAJATO, Responsable Technique au sein de la société EOSOL Madagascar*



*Soutenu publiquement le 22 Septembre 2018*

*Promotion 2017*

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO



-----  
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE



-----  
**Domaine** : Science de l'ingénieur

-----  
**Mention** : Génie Electrique

-----  
**Parcours** : Machines électriques, Réseaux d'énergie  
électrique et Energies Renouvelables

*Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master 2 en Génie  
électrique*

*Titre : Ingénieur*

**DIMENSIONNEMENT DE L'ELECTRIFICATION  
D'UN VILLAGE : CAS DU CHEF-LIEU DE LA  
COMMUNE RURALE DE MAHASOLO PAR UNE  
CENTRALE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE**

**Présenté et soutenu par :**

*Harisoa Diamondra Julpheli RAKOTONIRINA*

**Devant le jury composé de :**

**Président :**

*Pr. Yvon ANDRIANAHARISON, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo*

**Examineurs :**

- *Dr. Edmond RANDRIAMORA, Maître de conférences à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo*
- *Dr. Hajasoa RALAIVAO, Maître de conférences à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo*
- *Onja VOALINTSOA, Enseignant chercheur auprès de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo*

**Directeur de mémoire pédagogique :**

*Dr. Solofo Hery RAKOTONIANA, Maître de conférences*

**Directeur de mémoire professionnel :**

*Jean Christophe MARA SOA HAJATO, Responsable Technique auprès de la société EOSOL Madagascar*

*Soutenu publiquement le 22 Septembre 2018*

*Promotion 2017*

*« Car par lui ont été créées toutes choses, les choses qui sont dans les cieux et les choses qui sont sur la terre, les visibles et les invisibles, soit trône, ou seigneuries, ou principautés, ou autorités : toutes choses ont été créées par lui et pour lui »*

*Colossiens 1 : 16*

# REMERCIEMENTS

En l'honneur de la réalisation et l'aboutissement de ce mémoire de fin d'études, nous tenons à adresser nos sincères reconnaissances tout d'abord au Seigneur tout puissant qui a pourvu de sa grâce et sa bénédiction durant toutes ces années de formations et d'études et surtout lors de l'élaboration de ce mémoire.

Nos sincères remerciements s'adressent également à chacune des personnes suivantes :

- Professeur **Yvon ANDRIANAHARISON**, Responsable du domaine de l'ingénieur à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo pour nous avoir accueilli au sein de son établissement et qui nous fait l'honneur de présider ce présent mémoire.
- Docteur **Vonjy RAMAROZATOVO**, Responsable de la Mention Génie Electrique de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo qui n'a pas ménagé ses efforts et ses compétences pour le bon déroulement de notre formation et qui nous a permis d'effectuer quatre années d'études au sein de la mention Génie Electrique.
- Docteur **Solofo Hery RAKOTONIAINA**, Maître de conférences, Directeur de ce présent mémoire qui a accepté et accompli avec rigueur son rôle dans l'élaboration de ce travail.
- Monsieur **Jean Christophe MARA SOA HAJATO**, Responsable Technique auprès de l'EOSOL, qui a assuré le rôle d'encadreur professionnel et n'a pas ménagé ses efforts, ses compétences et ses conseils pour le bon établissement de ce mémoire de fin d'étude malgré ses différentes responsabilités.

Nos hautes et fidèles considérations s'adressent aussi aux personnes suivantes qui siègent en tant que membres de jury :

- Docteur **Edmond RANDRIAMORA**, Maître de conférences et Enseignant dans la mention Génie Electrique qui a aimablement accepté de siéger en tant que membre du jury pour examiner ce travail.
- Docteur **Hajasoa RALAIVAO**, Maître de conférences et Enseignant au sein de la mention Génie Electrique qui a bien voulu accepter de siéger en tant que membre du jury et d'être parmi les examinateurs.
- Madame **Onja VOALINTSOA**, Enseignant chercheur au sein de la mention Génie Electrique qui a accepté honorablement d'examiner ce travail et de siéger en tant que membre du jury.

Nous tenons à attribuer nos plus amples reconnaissances à toute l'équipe de la société EOSOL Madagascar :

- Madame **Camille ANDRE-BATAILLE**, Directrice Générale de la société, qui a permis un stage de mémoire au sein de la société qu'elle dirige et qui, malgré ses différentes responsabilités a fournie des conseils et recommandations pour la bonne élaboration de ce mémoire.
- Monsieur **Emilhiot MAROZARA**, Responsable Administratif et Financier d'EOSOL pour son accueil et sa coopération pendant la durée du stage.
- Madame **Norohanitra NALISON**, Responsable du Département des Opérations d'EOSOL, qui nous a aimablement fourni un stage de mémoire auprès de son département.
- Madame **Domoina Ravaka RABEFARITRA** et Monsieur **Victor Andry Larrio RANDRIAMANANTENA**, Chargés de projet auprès de l'EOSOL, qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire dans le cadre des travaux sur terrain et de l'analyse des données.

Nous tenons à attribuer nos sincères reconnaissances à Monsieur **RAJAONARIVELO**, Maire de la Commune Rurale de Mahasolo qui nous a bien accueilli durant la visite de la Commune et a fourni des renseignements nécessaires pour la bonne élaboration de ce travail.

Nous tenons à attribuer nos plus amples reconnaissances à Monsieur **Milson RATSARAEFADAHY**, Directeur Technique auprès de l'Agence de Développement de l'Electrification Rurale qui nous a attribué un entretien et a donné des informations utiles pour l'élaboration de ce mémoire.

A tous les enseignants de la Mention Génie Electrique et de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, qui ont contribué à nos 5 années de formation, sur lesquelles s'est basée la mise en œuvre de ce présent mémoire de fin d'étude, nous vous remercions pour tous les enseignements qui nous ont été donnés.

Nous tenons à adresser nos plus amples remerciements à nos parents, à toute la famille et les amis qui nous ont toujours soutenus moralement, matériellement et financièrement durant toutes les années d'études jusqu'à présent et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Nous tenons à réitérer nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

Merci à tous !

# TENY FISAORANA

Ny voalohan-teny dia misaotra an'Andriamanitra lehibe isika fa noho ny fitiavany sy ny fitantanany ary ny famindrampony no nahatontosana izao fikarohana izao. Atolotra ho Azy ny saotra sy ny dera ary ny voninahitra izay efa Azy hatramin'ny taloha indrindra ka ho mandrakizay.

Tsy hay ny tsy hisaotra an'Andriamatoa **ANDRIANAHARISON Yvon** talen'ny sekoly ambony politekinika Vontovorona izay nanaiky ny handratoako fianarana ao amin'ny sekoly izay iadidiany sy nanaiky nitarika ny fitsarana ity asa ity.

Isaorana ihany koa Andriamatoa **RAMAROZATOVO Vonjy** izay tompon'andraikitry ny fampianarana ao amin'ny « Génie électrique » nitarika ny fampianarana anay teo anivon'izany departemanta iandraiketany izany.

Manantitra ihany koa ny fisaorana an'Andriamatoa isany **RAKOTONIAINA Solofo Hery** sy **MARA SOA HAJATO Jean Christophe** izay nanampy tamin'ny fanatontosana amin'ny antsakany sy andavany izao asa izao.

Ireto mpampianatra manaraka ireto ihany koa dia isaorana manokana noho ny nahafaizan'izy ireo fotoana hitsarana izao aza izao: Ramatoa **VOALINTSOA Onja** ary Andriamatoa isany **RANDRIAMORA Edmond** sy **RALAIVAO Hajasoa**.

Manantitra ny fisaorana ihany koa an-dRamatoa **Camille ANDRE-BATAILLE** tale jeneralin'ny orinasa EOSOL Madagascar izay nanaovako ny fizaran'asa tamin'ny fanatanterahana izao fikarohana izao.

Misaotra ireo namana mpiara-miasa rehetra tao amin'ny orinasa EOSOL Madagascar noho ny fandraisana sy ny fanampiana rehetra tamin'ny fotoana nanatontosako ny asa fikarohana teo anivon'ny orinasa.

Ao ihany koa Andriamatoa **RAJAONARIVELO** izay ben'ny tanànan'ny Kaominina Mahasolo sy Andriamatoa **RATSARAEFADAHY Milson** tale teknikaka eo anivon'ny ADER izay namaly an-kitsipo nandritry ny fanadihadiana natao tamin'izy ireo ka nahatontosana amin'ny antsakany sy andavany izao asa izao.

Isaorana eram-po eran-tsaina ireo mpampianatra sy mpanabe eo anivon'ny sekoly ambony polytekinika Vontovorona izay nitarika tamin'ny fampianaranana sy nikolokolo ka nahatody anay amin'izao fotoana izao.

Isaorana amin'ny fo manontolo ireo ray aman-dreny, mpiray tampo sy fianakaviana ary ny namana sy tapaka rehetra izay nanohana tamin'ny fomba rehetra nandritry ny fotoana nianarana ary indrindra tamin'ny fanatontosana ity asa ity.

# TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	i
TENY FISAORANA.....	iii
TABLE DES MATIERES.....	iv
LISTE DES NOTATIONS ET ABREVIATIONS.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	xiii
LISTE DES TABLEAUX.....	xv
INTRODUCTION.....	1
Partie I : CONTEXTE GENERAL.....	3
Chapitre I : Etat de l'art sur le système photovoltaïque.....	4
I.1 Historique [9] [27].....	4
I.2 L'énergie solaire.....	5
I.2.1 Généralités [6].....	5
I.2.2 Paramètres de l'énergie solaire [4].....	9
I.2.3 Notions sur le rayonnement solaire [32].....	11
I.3 Les principaux composants d'une installation photovoltaïque.....	12
I.3.1 Le capteur solaire photovoltaïque [1].....	12
I.3.2 La batterie [26].....	21
I.3.3 Le régulateur [26].....	24
I.3.4 L'onduleur [26].....	25
I.3.5 L'onduleur-chargeur.....	26
I.4 Les différentes installations photovoltaïques.....	28
I.4.1 Les installations off grid.....	28
I.4.2 Les installations on grid.....	28
I.4.3 Les installations hybrides.....	29
I.5 Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque [17].....	29
I.5.1 Avantages.....	29
I.5.2 Inconvénients.....	30
Chapitre II : Généralités sur les logiciels de dimensionnement solaire.....	31
II.1 Logiciels pour le gisement solaire, l'irradiation et les données climatiques [7].....	31
II.2 Outils sur la simulation de la production d'énergie photovoltaïque [7].....	33
II.3 Outils d'analyse de cycle de vie [7].....	34
Chapitre III : Contexte énergétique à Madagascar.....	35
III.1 Situation énergétique de Madagascar [2] [13].....	35
III.1.1 La consommation énergétique à Madagascar.....	35
III.1.2 Le taux d'électrification à Madagascar.....	35
III.2 Centrales de production électrique à Madagascar [15].....	36
III.2.1 Milieu urbain.....	36
III.2.2 Milieu rural.....	36
III.3 Les énergies renouvelables à Madagascar.....	38
III.4 L'énergie photovoltaïque à Madagascar.....	39
Partie II : METHODOLOGIE.....	42
Chapitre IV : Modélisation des systèmes photovoltaïques.....	43
IV.1 Les principales caractéristiques d'un module photovoltaïque [22].....	43
IV.1.1 Puissance crête.....	43
IV.1.2 Influence de l'éclairement.....	43
IV.1.3 Influence de la température.....	44
IV.1.4 Caractéristique puissance-tension P(V).....	45
IV.1.5 Zones de fonctionnement du module photovoltaïque.....	46
IV.2 Les paramètres photovoltaïques [30].....	47

IV.2.1 Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) .....	48
IV.2.2 Tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ).....	48
IV.2.3 Facteur de forme (FF) .....	49
IV.2.4 Le rendement .....	50
IV.2.5 Le rendement quantique, EQE.....	50
IV.3 La jonction PN utilisée comme capteur .....	51
IV.4 Liaison des cellules photovoltaïques .....	54
IV.4.1 Groupement en série .....	54
IV.4.2 Groupement en parallèle.....	55
IV.4.3 Groupement mixte (série-parallèle).....	56
IV.5 Modélisation des cellules photovoltaïques [11] .....	57
IV.5.1 Modèle à deux diodes [24] .....	58
IV.5.2 Modèle à une diode.....	63
Chapitre V : Analyse socio-économique et besoins énergétiques.....	66
V.1 Analyse socio-économique.....	66
V.1.1 Les sources de revenus de la population.....	66
V.1.2 Segmentation des ménages .....	67
V.2 Besoins énergétiques .....	67
V.2.1 Evaluation de la consommation énergétique .....	67
V.2.2 Consommation énergétique envisagée à l'année m .....	70
Chapitre VI : Dimensionnement d'une centrale solaire photovoltaïque .....	71
VI.1 Puissance et tension du système .....	71
VI.1.1 Puissance totale du système .....	71
VI.1.2 Puissance de pointe journalière .....	71
VI.1.3 Choix de la tension.....	71
VI.2 Dimensionnement des différents composants.....	72
VI.2.1 Dimensionnement des panneaux photovoltaïques .....	72
VI.2.2 Dimensionnement des batteries.....	75
VI.2.3 Dimensionnement des onduleurs.....	76
VI.2.4 Dimensionnement des onduleurs chargeurs.....	77
VI.2.5 Dimensionnement des câblages DC (panneaux solaires vers onduleurs).....	77
VI.2.6 Dimensionnement des câblages AC .....	78
Chapitre VII : Méthodologie d'analyse financière avec le logiciel RETScreen 4 .....	80
VII.1 Présentation du logiciel RETScreen 4 .....	80
VII.2 Méthode d'analyse financière .....	80
VII.2.1 Problème de précision sur le coût total d'investissement .....	80
VII.2.2 Analyse financière avec RETScreen 4.....	81
Partie III : PRESENTATION DU PROJET .....	88
Chapitre VIII : Présentation de la société et objectifs du travail.....	89
VIII.1 Présentation de la Société EOSOL .....	89
VIII.1.1 Identité .....	89
VIII.1.2 Historique [36].....	89
VIII.1.3 Organisation.....	89
VIII.1.4 Activités.....	90
VIII.1.5 Rôles dans l'entreprise.....	91
VIII.2 Objectifs du travail .....	91
VIII.2.1 Contexte.....	91
VIII.2.2 Objectifs .....	91
VIII.2.3 Méthodologie et moyens utilisés .....	91
Chapitre IX : Présentation de la Commune de Mahasolo.....	92
IX.1 Localisation.....	92
IX.2 Informations générales sur la Commune .....	93

IX.2.1 Données démographiques et infrastructures existantes .....	93
IX.2.2 Sources d'énergie utilisées dans la Commune .....	93
IX.2.3 Généralités sur les revenus de la population active.....	94
IX.3 Potentiel photovoltaïque .....	94
IX.4 Justification du choix de la Commune pour un projet d'électrification par une centrale solaire photovoltaïque .....	95
IX.5 Besoins énergétiques de la Commune .....	95
IX.5.1 Consommation énergétique des ménages .....	96
IX.5.2 Consommation énergétique des Institutions Publiques .....	99
IX.5.3 Consommation énergétique des usagers productifs .....	101
IX.5.4 Besoins énergétique totale du chef-lieu de la commune .....	104
Chapitre X : Résultats du dimensionnement de la centrale solaire photovoltaïque correspondante au chef-lieu de la Commune.....	106
X.1 Puissance du système.....	106
X.2 Dimensionnement des différents composants.....	106
X.2.1 Dimensionnement des panneaux photovoltaïques .....	106
X.2.2 Dimensionnement des batteries.....	106
X.2.3 Dimensionnement des onduleurs.....	107
X.2.4 Dimensionnement des onduleurs chargeurs.....	107
X.2.5 Dimensionnement des câbles DC (des panneaux solaires vers les onduleurs) .....	108
X.2.6 Dimensionnement des câblages AC .....	108
X.3 Récapitulation des résultats.....	109
X.4 Résultats obtenus avec le logiciel Sunny Design .....	111
X.4.1 Puissance crête des modules .....	111
X.4.2 Récapitulation des résultats avec Sunny Design .....	112
Chapitre XI : Analyse financière avec le logiciel RETScreen .....	113
XI.1 Hypothèses.....	113
XI.2 Analyse financière pour le dimensionnement manuel .....	113
XI.2.1 Données d'entrée.....	113
XI.2.2 Données de sortie (feuille de calcul « Analyse financière »).....	116
XI.3 Analyse financière pour le dimensionnement avec le logiciel Sunny Design .....	118
XI.3.1 Données d'entrée.....	118
XI.3.2 Données de sortie (feuille de calcul « Analyse financière »).....	122
Chapitre XII : Discussion .....	124
XII.1 Besoins énergétiques de la Commune .....	124
XII.2 Comparaison des résultats de dimensionnement calculés manuellement et ceux obtenus à partir du logiciel Sunny Design.....	124
XII.3 Comparaison de l'analyse financière du dimensionnement manuel et celui avec Sunny Design .....	126
XII.4 Analyse d'impacts environnementaux .....	127
XII.4.1 Environnement acoustique.....	127
XII.4.2 Pollution des eaux.....	127
XII.4.3 Pollution de l'air.....	128
XII.4.4 Champ électromagnétique .....	128
XII.4.5 Déchets .....	128
XII.4.6 Sol et sous-sol.....	129
XII.4.7 Ressources en eau .....	129
XII.4.8 Climatologie .....	129
XII.4.9 Risques naturels .....	129
XII.4.10 Paysage .....	129
XII.4.11 Faune .....	130
XII.5 Recommandations.....	130

CONCLUSION .....	131
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES.....	133
ANNEXES .....	I
Annexe 1 : Types d'onduleurs avec leurs applications.....	I
Annexe 2 : Réforme du secteur électricité à Madagascar (2015).....	II
Annexe 3 : Hypothèses d'augmentation et de raccordement de chaque catégorie d'utilisateur ..	III
Annexe 4 : Caractéristiques techniques des composants du système de production.....	IV
Annexe 5 : Catalogue de section des câbles.....	VIII
Annexe 6 : Energie totale vendue annuelle sur la durée de vie du projet (hypothèses pour le dimensionnement manuel et celui effectué avec Sunny Design) .....	X
Annexe 7 : Feuilles de calcul de RETScreen .....	XII

# LISTE DES NOTATIONS ET ABBREVIATIONS

$\delta$	Déclinaison
$\psi$	Latitude
\$	Dollar
%	Pourcent
°C	Degré Celsius
2M5P	Modèle à cinq paramètres (Lumped, 2 Mechanism model with 5 Parameters)
2M6P	Modèle à six paramètres (Lumped, 2 Mechanism model with 6 Parameters)
2M7P	Modèle à sept paramètres (Lumped, 2 Mechanism model with 7 Parameters)
A	Ampère
AC	Courant alternatif
ADER	Agence de Développement de l'Electrification Rurale
Ah	Ampère-heure
AM	Masse d'air
APD	Avant-Projet Détaillé
APS	Avant-Projet Sommaire
Ar	Ariary
b	Azimut du Soleil
c	Vitesse de la lumière
C	Capitaux investis
C <sub>20</sub>	Capacité d'une batterie lors de la décharge continue et ininterrompue pendant 20 heures jusqu'à une tension de fin de décharge de 1,75 Volt par élément à 20 degrés Celsius
C <sub>comb</sub>	Coût annuel en combustible ou en électricité
C <sub>E&amp;E</sub>	Coûts annuels d'exploitation et d'entretien associé au projet d'énergie propre
CEG	Collège d'Enseignement Général
cm <sup>2</sup>	Centimètre carré
CO <sub>2</sub>	Gaz carbonique
cos $\varphi$	Facteur de puissance de l'onduleur
CSB	Centre de Santé de Base
C <sub>t</sub>	Capacité du parc batteries
C <sub>u</sub>	Capacité d'une batterie
DD	Taux de droit des douanes
DC	Courant continu
e	Albédo (coefficient propre de la nature du sol)
$\varepsilon$	Chute de tension
E <sub>a</sub>	Consommation moyenne annuelle
E <sub>ca</sub>	Consommation journalière en courant alternatif non rectifiée
E <sub>car</sub>	Consommation journalière en courant alternatif rectifiée
E <sub>cc</sub>	Consommation journalière en courant continu
E <sub>gap</sub>	Energie de gap
E <sub>i</sub>	Irradiation solaire journalière d'un lieu
E <sub>m</sub>	Consommation énergétique à l'année m

EOSOL	Société Malagasy spécialisée dans le métier d'électrification rurale
EPC	Engineering Procurment Construction
EPP	Ecole Primaire Publique
$E_{pv}$	Production spécifique photovoltaïque
EQE	Rendement quantique
ES	Encouragements et subventions
$E_t$	Consommation journalière totale
$E_{tc}$	Energie totale consommée par jour dans la Commune de Mahasolo
$E_{tip}$	Consommation journalière des institutions publiques
$E_{tm}$	Energie totale journalière consommée par les ménages
$E_{tup}$	Consommation journalière des usagers productifs
eV	Electron-Volt
$f_{ac,nom}$	Fréquence nominale
FF	Facteur de forme
G	Eclairement réel
GES	Gaz à Effet de Serre
GPV	Générateur photovoltaïque
$G_{ref}$	Eclairement à la condition de référence
h	Heure pendant laquelle un appareil fonctionne
$h_{ij}$	Heures d'utilisation de l'équipement i
$h_{ond}$	Rendement d'un onduleur
Hz	Hertz
I	Courant
$I_0$	Courant de saturation
$I_{cc}$	Courant de court-circuit
$I_{d1}$	Courant traversant la diode 1 du panneau solaire
$I_{d2}$	Courant traversant la diode 2 du panneau solaire
$I_{max,string}$	Courant maximal fourni par un string
$I_{mp}$	Courant maximal d'une cellule photovoltaïque
$I_{mpp}$	Courant à puissance maximale
$I_p$	Indice de profitabilité
IPCE	Incident Photon to Current Efficiency
$I_{ph}$	Courant photonique
$I_{ph,ref}$	Courant photonique sous condition de référence
$I_{pv}$	Courant de sortie du générateur photovoltaïque
$I_{pv,max}$	Courant d'entrée maximal
$I_s$	Courant de saturation
$I_{s1}$	Courant de saturation de la diode 1
$I_{s2}$	Courant de saturation de la diode 2
$I_{sh}$	Courant de la résistance shunt
J	Joule
JIRAMA	Jlro sy RAno MAlagasy
k	Constante de Boltzmann
K	Kelvin

$k_d$	Coefficient de décharge d'une batterie
$k_{ij}$	Coefficient de simultanéité qui est en fonction du nombre des équipements $i$ identiques
km	Kilomètre
kWc	Kilowatt crête
kWh	Kilowattheure
L	Longueur du câble
l	Litre
L3P	Modèle à trois paramètres (Lumped, 1 Mechanism model with 3 Parameters)
L4P	Modèle à quatre paramètres (Lumped, 1 Mechanism model with 4 Parameters)
m	Mètre
$m^2$	Mètre carré
mA	Milliampère
MBA	Marge Brute d'Autofinancement
$m_{cc}$	Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température
$\mu m$	Micromètre
mm	Millimètre
$mm^2$	Millimètre carré
MPPT	Point de puissance maximale
mV	Millivolt
MW	Mégawatt
N	Dopage d'un atome (l'atome présente un excès d'électrons)
n	Durée de vie du projet
$N_b$	Nombre de batteries nécessaires
Ni-Cd	Nickel-cadmium
$n_{ij}$	Nombre de l'équipement $i$ utilisé par l'utilisateur $j$
Ni-MH	Nickel-hydrure métallique
$N_j$	Nombre de jours d'autonomie
$N_m$	Nombre de modules total
$N_{ond}$	Nombre total d'onduleurs
$N_{ondCharg}$	Nombre d'onduleurs chargeurs
$N_p$	Nombre de cellules en parallèle
$N_s$	Nombre de modules par string
Off grid	Installation photovoltaïque sur site isolé
OMH	Office Malgache des Hydrocarbures
On grid	Installation photovoltaïque raccordé au réseau de distribution public
ONG	Organisation Non-Gouvernementale
ORE	Office de Régulation de l'Electricité
P	Dopage d'un atome (l'atome présente un excès de trous)
$P_0$	Puissance active de l'onduleur
$P_{ac,max}$	Puissance maximale en courant alternatif
$P_{ac,nom}$	Puissance nominale
$P_c$	Puissance crête
$P_{dc,max}$	Puissance maximale en courant continu

$P_h$	Puissance consommée à l'heure h
$P_{ij}$	Puissance de l'équipement i
$P_m$	Puissance d'un module
$P_{max}$	Puissance maximale d'une cellule photovoltaïque
P-N	Jonction de deux atomes, l'un dopé positivement et l'autre dopé négativement
$P_p$	Puissance de pointe journalière
$P_{pv}$	Puissance disponible en sortie du générateur photovoltaïque
$P_r$	Puissance radiative dans les conditions standards de test
$P_t$	Puissance totale du système
$P_u$	Puissance d'un onduleur
$P_{uOndCharg}$	Puissance d'un onduleur chargeur
pvGIS	Logiciel en ligne pour trouver l'irradiation solaire dans n'importe quel lieu du monde
q	Constante de charge d'électron
r	Taux d'actualisation
$\rho$	Résistivité du câble
$R_0$	Résistance interne de la diode d'un panneau solaire en polarisation externe nulle et sous faible flux lumineux
$R_{cap}$	Revenu annuel sur la capacité produite
$R_{éner}$	Economie ou revenu annuel en énergie
$R_{EP}$	Revenu du crédit pour la production d'énergie propre
RETScreen4	Système logiciel basé sur Excel développé par le Gouvernement canadien pour l'analyse de faisabilité de projets d'efficacité énergétique, d'énergies renouvelables et de cogénération et pour l'analyse de performance énergétique en continu se situant partout dans le monde
$R_{GES}$	Revenu du crédit pour la réduction de gaz à effet de serre
$r_s$	Angle horaire au lever du Soleil
$R_s$	Résistance série d'une cellule photovoltaïque
RS	Retour Simple
$R_{sh}$	Résistance shunt d'une cellule photovoltaïque
S	Section du câble
$S_0$	Puissance apparente de l'onduleur
SARL	Société A Responsabilités Limités
Si	Silicium
Solargis	Logiciel en ligne permettant d'obtenir les informations nécessaires pour l'implantation d'un système photovoltaïque dans n'importe quel lieu du monde
$S_{ondCharg}$	Puissance apparente des onduleurs chargeurs
STC	Standard Test Condition
Sunny Design	Logiciel de dimensionnement d'un système photovoltaïque avec la technologie SMA
T	Température
$T_c$	Température absolue
tCO <sub>2</sub>	Tonne de gaz carbonique
$t_i$	Taux de croissance des usagers

TRI	Taux de Rendement Interne
TSV	Temps Solaire Vrai
TVA	Taxe sur la Valeur Ajoutée
$U_{ac,nom}$	Tension nominale AC
$U_b$	Tension d'une batterie
$U_{mpp}$	Plage de tension photovoltaïque de l'onduleur
$U_n$	Tension nominale d'un panneau solaire
$U_{nom,tot}$	Tension nominale totale
UV	Ultraviolet
V	Volt
VAN	Valeur Actualisée Nette
$V_{co}$	Tension à circuit ouvert
ViMAP GmbH	Société allemande, actionnaire d'EOSOL
$V_{mpp}$	Tension à puissance maximale
$V_{pv}$	Tension à la sortie du générateur photovoltaïque
$V_t$	Potentiel thermodynamique
W	Watt
Wc	Watt crête

# LISTE DES FIGURES

Figure I. 1 : Rayonnement extra-atmosphérique pour une année.....	6
Figure I. 2 : Flux d'énergie entre le Soleil, l'atmosphère et le sol .....	7
Figure I. 3 : Composants du rayonnement solaire .....	7
Figure I. 4 : Atlas solaire mondial mensuel et annuel de l'irradiance solaire.....	8
Figure I. 5 : Position du Soleil [20].....	11
Figure I. 6 : Module solaire photovoltaïque .....	12
Figure I. 7 : Etapes de construction d'un générateur photovoltaïque [6].....	13
Figure I. 8 : Vue en coupe d'un module standard en silicium cristallin [6].....	13
Figure I. 9 : Cellule photovoltaïque monocristalline.....	15
Figure I. 10 : Silicium dopé.....	18
Figure I. 11 : Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	19
Figure I. 12 : Constitution d'une batterie [26].....	23
Figure I. 13 : Schéma de principe d'un régulateur [26].....	25
Figure I. 14 : Onduleur quasi sinusoïdal [26].....	26
Figure I. 15 : Onduleur sinusoïdal [26] .....	26
Figure I. 16 : Conversion AC/DC par l'onduleur-chargeur [34].....	27
Figure I. 17 : Conversion DC/AC par l'onduleur chargeur [34].....	27
Figure III. 1 : Les postes de consommation énergétique à Madagascar.....	35
Figure III. 2 : Taux d'accès à l'électricité en milieu rural.....	37
Figure III. 3 : Potentiel hydroélectrique de Madagascar .....	39
Figure III. 4 : Irradiation moyenne annuelle de Madagascar .....	40
Figure III. 5 : Centrale solaire d'Andavadoaka (60 kWc).....	41
Figure IV. 1 : La caractéristique $I=f(V)$ en fonction de l'éclairement [25].....	43
Figure IV. 2 : Caractéristique $P=f(V)$ en fonction de l'éclairement [25].....	43
Figure IV. 3 : Caractéristique de $I = f(V)$ en fonction de la température [25] .....	44
Figure IV. 4 : Caractéristique de $P = f(V)$ en fonction de la température [25].....	44
Figure IV. 5 : Caractéristique $I(V)$ d'un module solaire, $T = 25^{\circ}\text{C}$ [25] .....	45
Figure IV. 6 : Caractéristique $P(V)$ d'un panneau solaire, $T = 25^{\circ}\text{C}$ [25].....	46
Figure IV. 7 : Les différentes zones de la caractéristique $I(V)$ , $T = 25^{\circ}\text{C}$ [25] .....	47
Figure IV. 8 : Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque [25] .....	47
Figure IV. 9 : Différents régimes selon la puissance d'éclairement [25].....	49
Figure IV. 10 : Jonction P-N [22] .....	51
Figure IV. 11 : Caractéristique $I(V)$ d'une jonction PN [22].....	52

Figure IV. 12 : Schéma électrique équivalent d'une jonction PN [22].....	52
Figure IV. 13 : L'effet photovoltaïque la lumière incidente se déplace [22] .....	53
Figure IV. 14 : Association de $N_s$ modules solaires en série .....	54
Figure IV. 15 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de $N_s$ cellules identiques [22] .....	54
Figure IV. 16 : Association des modules en parallèle .....	55
Figure IV. 17 : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de $N_p$ cellules identiques [22] .....	55
Figure IV. 18 : Association mixte des modules .....	56
Figure IV. 19 : Caractéristique résultante d'un groupement mixte [22] .....	56
Figure IV. 20 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M7P .....	59
Figure IV. 21 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M6P .....	62
Figure IV. 22 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M5P .....	62
Figure IV. 23 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L3P .....	64
Figure IV. 24 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L4P .....	65
Figure V. 1 : Etapes de détermination des besoins énergétiques .....	69
Figure VI. 1 : Eléments constitutifs d'une centrale solaire photovoltaïque .....	72
Figure VII. 1 : Etape de précision du coût d'investissement d'un projet .....	81
Figure VII. 2 : Organigramme des étapes à suivre pour un projet d'électrification rurale.....	87
Figure VIII. 1 : Organigramme de la société EOSOL .....	90
Figure IX. 1 : Localisation de la Commune de Mahasolo .....	92
Figure IX. 2 : Courbe de charge journalière des ménages.....	99
Figure IX. 3 : Courbe de charge journalière des Institutions Publiques .....	101
Figure IX. 4 : Courbe de charge journalière des usagers productifs .....	104
Figure IX. 5 : Courbe de charge journalière du chef-lieu de la commune de Mahasolo .....	105
Figure XI. 1 : Graphique du flux monétaire cumulatif (dimensionnement manuel) .....	118
Figure XI. 2 : Graphique du flux monétaire cumulatif (dimensionnement avec Sunny Design) ....	123

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. 1 : Coefficient d'Albédo de quelques surfaces [14] .....	8
Tableau I. 2 : Comparaison des différentes technologies d'une cellule photovoltaïque.....	17
Tableau I. 3 : Données techniques des différentes batteries [26] .....	24
Tableau II. 1 : Logiciels pour le gisement solaire, l'irradiation et les données climatiques.....	31
Tableau II. 2 : Outils sur la simulation de la production d'énergie photovoltaïque .....	33
Tableau II. 3 : Outils d'analyse de cycle de vie .....	34
Tableau III. 1 : Proportion par type de centrale électrique en milieu urbain à Madagascar .....	36
Tableau III. 2 : Proportion par type de centrale électrique en milieu rural à Madagascar .....	37
Tableau V. 1 : Caractéristiques des segments de ménage.....	67
Tableau V. 2 : Coefficient de simultanéité en fonction du nombre d'équipements (source : Cours « électrification rurale GE L3 »).....	70
Tableau VI. 1 : Tension recommandée en fonction de la puissance totale d'un mini-système photovoltaïque.....	72
Tableau VI. 2: Angle d'inclinaison des modules suivant la latitude du site.....	75
Tableau IX. 1 : Nombre d'institutions publiques, usagers productifs et machineries existants dans la Commune de Mahasolo .....	93
Tableau IX. 2 : Tableau récapitulatif des sources énergétiques utilisées dans la Commune avec leur prix moyen.....	94
Tableau IX. 3 : Saisonnalité des revenus des ménages dans la Commune de Mahasolo .....	94
Tableau IX. 4 : Rayonnement solaire quotidien à Mahasolo.....	95
Tableau IX. 5 : Liste des équipements électriques utilisés par chaque segment de ménage .....	97
Tableau IX. 6 : Liste des équipements électriques utilisés par les Institutions Publiques .....	100
Tableau IX. 7 : Liste des équipements utilisés par les usagers productifs .....	102
Tableau IX. 8 : Récapitulation des caractéristiques des éléments constitutifs de la centrale .....	110
Tableau IX. 9 : Récapitulation des composants dimensionnés avec le logiciel Sunny Design .....	112
Tableau XI. 1 : Système de production d'électricité du cas de référence.....	113
Tableau XI. 2 : Coût d'investissement et coût d'exploitation du dimensionnement manuel [12] [35] .....	114
Tableau XI. 3 : Paramètres financières, financement et impôt sur le revenu du projet pour le dimensionnement manuel [18] .....	116
Tableau XI. 4 : Frais annuels (dimensionnement manuel).....	117
Tableau XI. 5 : Paramètres de viabilité financière du projet (dimensionnement manuel) .....	117
Tableau XI. 6 : Système de production d'électricité du cas de référence.....	118

Tableau XI. 7 : Coût d'investissement et coût d'exploitation du dimensionnement avec Sunny Design [12] [35] .....	120
Tableau XI. 8 : Paramètres financières, financement et analyse d'imposition sur le revenu du projet pour le dimensionnement avec Sunny Design [18] .....	122
Tableau XI. 9 : Frais annuels (dimensionnement avec Sunny Design).....	123
Tableau XI. 10 : Paramètres de viabilité financière du projet (dimensionnement avec Sunny Design) .....	123
Tableau XI. 11 : Tableau comparatif des paramètres financiers du dimensionnement manuel avec celui par Sunny Design .....	127
Tableau XII. 1 : Tableau comparatif des composants du dimensionnement manuel et celui avec Sunny Design .....	125
Tableau XII. 2 : Hypothèse de consommation d'énergie photovoltaïque et de carburant mensuel (source : Sunny Design).....	126
Tableau XII. 3 : Sommaire des réductions d'émission de GES.....	128

# INTRODUCTION

Actuellement, la population mondiale ne cesse de s'accroître ; notre Planète contient 7,63 milliards d'habitants en Janvier 2018 ; chaque jour, environ 244 000 nouvelles personnes sont comptées [16]. Cet accroissement démographique incessant influe la demande énergétique mondiale qui ne cesse d'augmenter également alors que les ressources fossiles sont en épuisement progressives. En effet, les hydrocarbures occupent la première place dans les ressources énergétiques utilisées dans le monde, avec 55% de part dans la production énergétique mondiale en 2013 [20] ; et ces ressources seront bientôt épuisées. De plus, le réchauffement climatique est un vécu présent dans le monde entier. Par conséquent, l'exploitation de nouvelles sources énergétiques est hautement recommandée dans toutes les Nations du monde ; il s'agit des énergies renouvelables, elles constituent incontestablement l'avenir dans le domaine de l'énergie ainsi qu'une option d'atténuation du changement climatique grâce à la faible émission de carbone. Les énergies renouvelables sont les énergies produites par des sources considérées comme inépuisables à l'échelle de vie humaine ; on distingue : l'énergie solaire, l'éolienne, l'énergie marine, la géothermie et l'hydroélectricité. La production électrique de certaines de ces technologies est intermittente, par exemple l'énergie solaire n'est disponible qu'en présence de la lumière, donc uniquement le jour, et également de l'énergie éolienne, en effet, sa production dépend de la vitesse du vent. Par contre, la géothermie, l'énergie marine et l'hydroélectricité sont des technologies produisant de l'électricité en permanence.

A Madagascar, l'électricité est produite majoritairement par des centrales thermiques qui sont exploitées et gérées principalement par la société JIRAMA (JIro sy RAno MALagasy) qui est détenue totalement par l'Etat Malagasy ; c'est une des raisons pour laquelle le Gouvernement Malagasy a adopté une stratégie nouvelle dans le secteur de l'énergie qui privilégie les énergies renouvelables [2]. Suite à la promotion du Gouvernement Malagasy pour la libéralisation et la participation privée dans le secteur de l'électricité et les hydrocarbures effectuée dans les années 1990 et 2000, des sociétés privées investissant dans la production d'électricité se sont installées à Madagascar. EOSOL Madagascar figure parmi ces sociétés, elle vise à concevoir et exploiter des projets de production d'électricité verte pour créer des bénéfices sociétaux et économiques significatives auprès des consommateurs. Depuis 2014 jusqu'à présent, environ 95% de la population rurale de Madagascar n'ont pas encore accès au service électrique [2]. EOSOL est un opérateur Malagasy indépendant spécialisé dans le métier de l'électrification rurale. Pour la réussite d'un projet d'électrification rurale il est impératif que le dimensionnement de la centrale soit précis et adéquat aux demandes énergétiques avec un coût d'investissement raisonnable et un rapide retour sur investissement. C'est exactement dans cette optique d'optimisation de dimensionnement d'un

système de production électrique et de promotion des activités économiques du chef-lieu de la Commune rurale de Mahasolo que se positionne ce mémoire qui s'intitule : « *Dimensionnement de l'électrification d'un village : Cas du chef-lieu de la commune rurale de Mahasolo par une centrale solaire photovoltaïque* ».

Afin de mieux aborder ce thème, le travail est organisé suivant trois parties qui sont :

- En premier lieu, le contexte général qui inclut les généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque, les logiciels de dimensionnement d'un système de production photovoltaïque et la situation énergétique à Madagascar.
- Ensuite, la partie méthodologie nous montrera la modélisation du système photovoltaïque, l'évaluation de la demande énergétique dans le lieu de l'étude, les méthodes de dimensionnement d'une centrale solaire photovoltaïque et d'analyse de rentabilité financière.
- Et la troisième partie est consacrée aux applications et résultats du dimensionnement pour le chef-lieu de la commune de Mahasolo avec l'analyse financière et d'impacts environnementaux.

# **Partie I : CONTEXTE GENERAL**

## Chapitre I : Etat de l'art sur le système photovoltaïque

### I.1 Historique [9] [27]

La découverte de l'effet photovoltaïque a été faite pour la première fois par *Alexandre Edmond Becquerel*, un physicien français, en 1839. *Edmond* a constaté que, certains matériaux avaient une possibilité de produire de petites quantités d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière, grâce à une électrode plongée dans une solution conductrice exposée à la lumière. *Willoughby Smith* découvre la photoconductivité du sélénium en 1873. En 1877, *W.G. Adams* et *R.E. Day* observent l'effet photovoltaïque sur du sélénium solidifié et publient « The action of light on selenium » dans « Proceedings of the Royal Society, A25, 113 ». A l'exposition universitaire de Paris de 1878, *Augustin Mouchot* présente un générateur solaire. En 1883, *Charles Fritts* développe une cellule solaire utilisant du sélénium sur une couche mince d'or et obtient un rendement de 1%. *Heinrich Hertz* conduit des recherches sur la photoconductivité de l'ultraviolet et découvre l'effet photoélectrique en 1887. Entre les années 1888 et 1891 *Aleksandr Stoletov* réalise les premières cellules solaires se basant sur l'effet photoélectrique.

En 1905, *Albert Einstein* se pencha sur ce travail, il publie un papier sur le potentiel de production d'électricité à partir de la lumière du soleil. C'est un document qui explique l'effet photoélectrique par des considérations quantiques. *William Cob Lentz*, en 1913, a posé le premier brevet pour une cellule solaire, mais il n'a jamais pu la faire fonctionner. En 1916, *Robert Millikan* a été le premier à produire de l'électricité avec une cellule solaire. Pendant les quarante années suivantes, personne ne fit beaucoup de progrès en énergie solaire car le rendement des cellules photovoltaïques était trop mauvais pour la transformation de la lumière du soleil en énergie.

Le 25 Avril 1957 les laboratoires Bell annoncent la première cellule solaire en silicium d'intérêt pratique avec une efficacité énergétique d'environ 6%.

Ceux sont des satellites qui ont réellement fait avancer l'énergie solaire dans les années 1960 lors de la course à l'espace. Les satellites ont besoin d'une source d'énergie fiable. L'énergie solaire est parfaite car c'est une source d'énergie constante pour les satellites en orbite par opposition à la disposition du solaire sur terre. L'industrie spatiale mit beaucoup de fonds dans le développement des panneaux solaires. C'était la première utilisation importante de la technologie solaire. En 1958, *Vanguard I* est le premier satellite utilisant l'énergie solaire avec un panneau de 100 cm<sup>2</sup> et 0,1 W.

Grâce à l'espace, les panneaux solaires ont prouvé leur fiabilité. Le coût de production des cellules solaires a également diminué. L'énergie solaire a eu un second élan au cours de la crise de l'énergie dans les années 1970. Quand le prix du pétrole a augmenté de façon spectaculaire, les panneaux solaires se sont développés lentement. Pendant longtemps, ils ont été considérés comme des

sources d'énergies alternatives. L'énergie solaire photovoltaïque est de nouveau en pleine essor car on prévoit une pénurie de pétrole prochaine, on se préoccupe du réchauffement de la planète et les prix de l'énergie n'ont jamais été aussi élevés. De plus, selon le rapport de l'IRENA (Agence Internationale des Energies Renouvelables), publié en Juin 2016, le coût de l'énergie solaire photovoltaïque a diminué de 58% entre 2010 et 2015, ce qui permet à la technologie de devenir compétitive sur le marché. D'ici 2025, ce coût devrait encore diminuer de 59%, faisant de cette technologie, celle à la plus grande évolution tarifaire comparée à toutes les autres technologies, fossiles ou renouvelables.

L'énergie solaire devient une priorité pour de plus en plus de pays. Dans les années 1999, la puissance photovoltaïque installée dans le monde atteint 1 GW. Actuellement, des centrales solaires sont en cours de construction dans le monde entier, par exemple la centrale photovoltaïque Noor-IV au Maroc qui, combinée avec d'autres technologies solaire (miroirs courbes et thermo-solaires avec tour) atteindra une capacité de 72 Mégawatts. Les entreprises d'électricité et les gouvernements de certains pays offrent des subventions et des réductions pour encourager les propriétaires à investir dans les panneaux solaires pour leur maison.

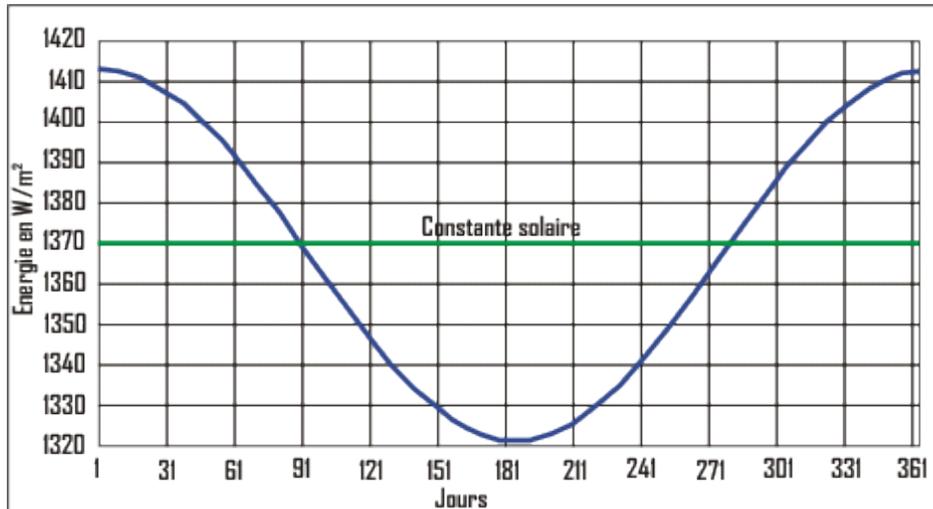
De nouveaux types de panneaux solaires sont développés : panneau solaire très fins (4 mm d'épaisseur) et flexibles, des peintures solaires. L'objectif est de réduire très fortement le coût de l'énergie solaire ; l'énergie solaire est une énergie du futur.

### 1.2 L'énergie solaire

#### 1.2.1 Généralités [6]

Le Soleil est une étoile parmi tant d'autres. Son diamètre est de 1 390 000 km, soit environ 50 fois celui de la Terre. Il est composé de 80 % d'hydrogène, 19 % d'hélium et 1 % d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus. *Langevin* et *Perrin*, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'*Einstein*, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au Soleil sa puissance. Il est aujourd'hui admis que le Soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène-hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, des réactions de fusion thermonucléaire se produisent sans cesse dans le noyau du Soleil à des millions de degrés ; elles libèrent des quantités d'énergie considérables sous forme de rayonnements électromagnétiques. Une partie de cette énergie atteint l'espace extra-atmosphérique de la Terre

avec une irradiance moyenne (constante solaire) d'environ  $1\,367 \text{ [W/m}^2] \pm 3\%$ , valeur variant en fonction de la distance Terre-Soleil (Figure I.1)<sup>1</sup> et de l'activité solaire.



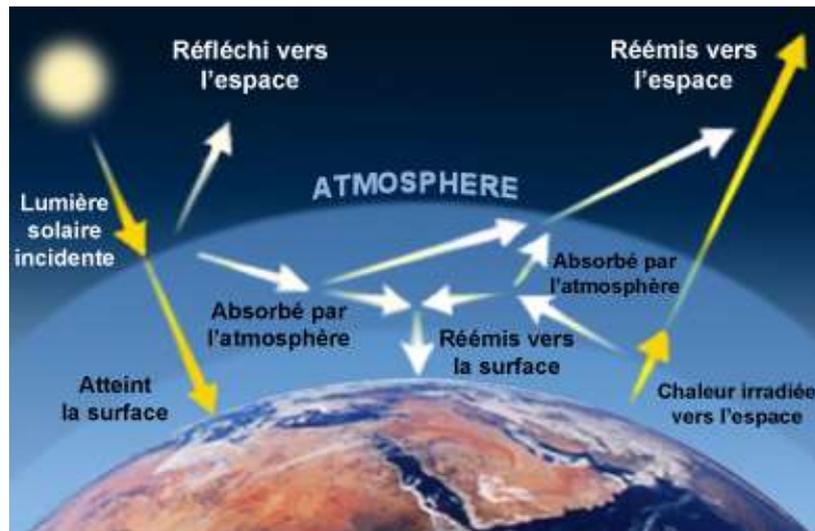
Source : Météo France

Figure I. 1 : Rayonnement extra-atmosphérique pour une année

L'irradiance solaire fait référence à l'intensité du rayonnement électromagnétique incident sur une surface de 1 mètre carré [ $\text{kW/m}^2$ ]. Cette intensité est égale à l'intégrale de l'énergie associée à chaque valeur de fréquence du spectre de rayonnement solaire.

Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il perd son intensité car il est partiellement réfléchi et absorbé principalement par les gouttelettes d'eau ou aérosols. Le rayonnement qui traverse est en partie diffusé par l'air et par les particules solides en suspensions dans l'air (Figure I.2).

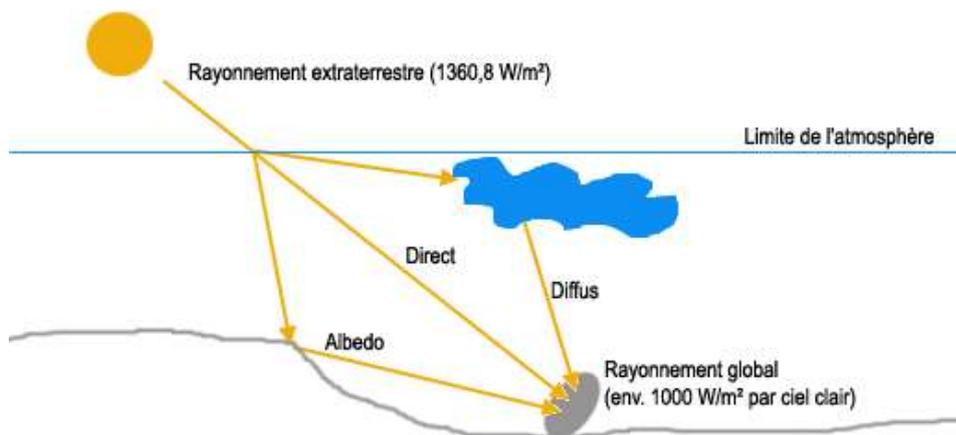
<sup>1</sup> En raison de son orbite, la Terre est à une distance minimale du Soleil (périhélie) en Décembre et en Janvier ; et à une distance maximale (aphélie) en Juin et Juillet.



Source : [www.astrosurf.com](http://www.astrosurf.com)

Figure I. 2 : Flux d'énergie entre le Soleil, l'atmosphère et le sol

L'ensoleillement fait référence à l'intégralité de l'irradiance solaire sur une période donnée [ $\text{kWh/m}^2$ ]. Par conséquent, le rayonnement tombant sur une surface horizontale est constitué d'un rayonnement direct, associé à l'irradiance directe sur la surface, d'un rayonnement diffus qui frappe la surface depuis l'ensemble du ciel et non depuis une partie spécifique de celui-ci et d'un rayonnement réfléchi sur une surface donnée par le sol et l'environnement (Figure I.3). En hiver, le ciel est couvert et le composant diffus est donc supérieur au composant direct.



Source : [123.solaire.fr](http://123.solaire.fr)

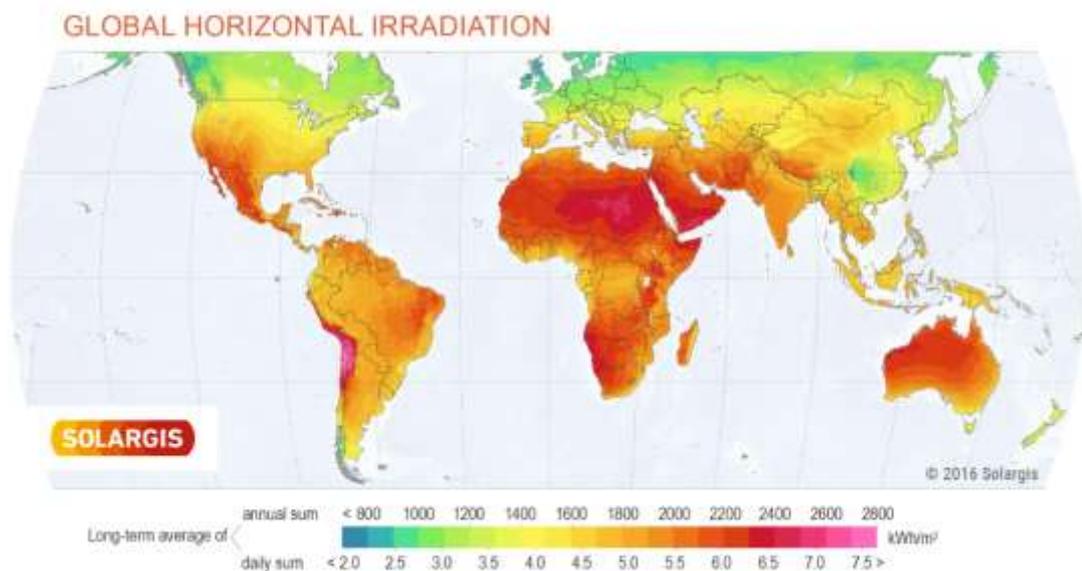
Figure I. 3 : Composants du rayonnement solaire

Le rayonnement réfléchi dépend de la capacité d'une surface à réfléchir le rayonnement solaire. Il est mesuré par le coefficient albédo<sup>2</sup> calculé pour chaque matériau.

Tableau I. 1 : Coefficient albédo de quelques surfaces [14]

Type de surface	Coefficient albédo
Routes sales	0,04
Surfaces aqueuses	0,07
Forêts de conifères en hiver	0,07
Asphalte usé	0,10
Toits et terrasses en bitume	0,13
Terre (argile, marne)	0,14
Herbe sèche	0,20
Gravats	0,20
Béton usé	0,22
Forêt en automne/champs	0,26
Herbe verte	0,26
Surfaces foncées de bâtiments	0,27

La Figure I.4 montre l'atlas mondial de l'irradiance solaire moyenne.



Source : Solargis

Figure I. 4 : Atlas solaire mondial annuel de l'irradiance solaire

<sup>2</sup> Le coefficient albédo est le pouvoir réfléchissant d'une surface, c'est le rapport entre l'énergie lumineuse réfléchie et l'énergie lumineuse incidente sur la surface donnée.

### 1.2.2 Paramètres de l'énergie solaire [4]

#### a) La latitude ( $\psi$ )

C'est l'angle formé par le plan équatorial et la direction reliant le lieu considéré, au centre de la Terre. Les latitudes de l'hémisphère Nord sont affectées d'un signe positif et celles de l'hémisphère Sud d'un signe négatif.

#### b) La longitude ( $l$ )

Elle représente l'angle formé par le plan méridien du lieu considéré et le plan méridien origine. Ce dernier passe par l'observation de *Greenwich* et a pour longitude 00. Les longitudes situées à l'Est de ce méridien sont positives et celles situées à l'Ouest négatives.

#### c) L'altitude

L'altitude est l'élévation d'un lieu par rapport au niveau de la mer, mesuré en mètre (m).

#### d) La déclinaison ( $\delta$ )

Il s'agit de l'angle entre la direction du Soleil et le plan équatorial. Elle traduit l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan écliptique. La déclinaison varie entre  $-23,45^\circ$  (le 21 Décembre) et  $+23,45^\circ$  (le 21 Juin). Cet angle varie très peu pendant une journée, ce qui permet d'approcher le mouvement quotidien du Soleil par une rotation sur cône ayant comme axe l'équateur.

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(2\pi \frac{284 + n}{365}\right) \quad (I.1)$$

Où

$n$  : numéro de jour dans l'année.

#### e) Le temps solaire vrai (TSV)

Il est défini par l'angle horaire  $\rho$  entre le plan méridien passant par le centre du Soleil et le méridien du lieu considéré. Il est compté de 0 à 24h à partir du midi vrai lorsque le Soleil culmine en un lieu donné.

La vitesse de la Terre sur sa trajectoire étant soumise à des variations, le jour solaire vrai n'est pas constant. Ainsi, un temps solaire moyen a été retenu comme unité de temps, le jour solaire moyen est défini.

$$TSV = 12 + \frac{\rho}{15} \quad (I.2)$$

**f) La durée et le taux d'insolation**

Par ciel clair et pendant la durée de jour d'ensoleillement  $S_0$  (du lever au coucher du Soleil), le sol reçoit le rayonnement solaire maximal. Mais la durée effective d'ensoleillement  $S$  d'une journée ordinaire est inférieure à cette durée maximale.

Le taux d'insolation est donné par l'expression :

$$\sigma = \frac{S}{S_0} \quad (1.3)$$

La durée maximale  $S_0$  est calculée par l'expression suivante :

$$S_0 = \left( \frac{2}{15} \right) \cos^{-1}(-\tan \psi \cdot \tan \delta) \quad (1.4)$$

Avec :

$\delta$  : déclinaison

$\psi$  : latitude du lieu

**g) L'angle horaire**

C'est l'angle formé entre le plan méridien passant par le soleil et le plan méridien du lieu obtenu par le déplacement angulaire du Soleil autour de l'axe polaire, dans sa course d'Est en Ouest, par rapport au méridien local. La valeur de l'angle est nulle à midi solaire, négative le matin, positive en après-midi et augmente de 15° par heure (donc un tour de 360° en 24 heures).

**h) Position du Soleil [22]**

La direction du Soleil dans le ciel est repérée par l'intermédiaire de deux angles :

- La hauteur angulaire ( $h$ ) : qui détermine la longueur de la traversée de l'atmosphère est l'angle formé par la direction du Soleil et le plan horizontal. Sa valeur sera 00 au lever et au coucher du Soleil et elle atteindra le maximum au zénith (midi en temps solaire vrai). Quand le sinus est négatif, c'est que le Soleil n'est pas encore levé (la durée des journées varie dans l'année). Il faut donc écrêter cette variable.

$$\sin(h) = \sin(\psi)\sin(\rho) + \cos(\psi)\cos(\rho)\cos(\delta) \quad (1.5)$$

L'angle horaire  $\rho_s$  au lever de Soleil s'obtient en écrivant  $\sin(h) = 0$  :

$$\cos(\rho_s) = -\tan(\psi)\tan(\delta) \quad (1.6)$$

Où ( $\delta$ ) la déclinaison calculée d'après l'équation (II.1) et ( $\psi$ ) la latitude du lieu.

---

- Azimut du Soleil ( $\beta$ ) : Angle que fait la projection de la direction du Soleil avec la direction du Sud. Cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest.

$$\sin(\beta) = \frac{\cos(\delta)\sin(\rho)}{\cos(h)} \quad (1.7)$$

Ces deux angles sont représentés sur la Figure I.5

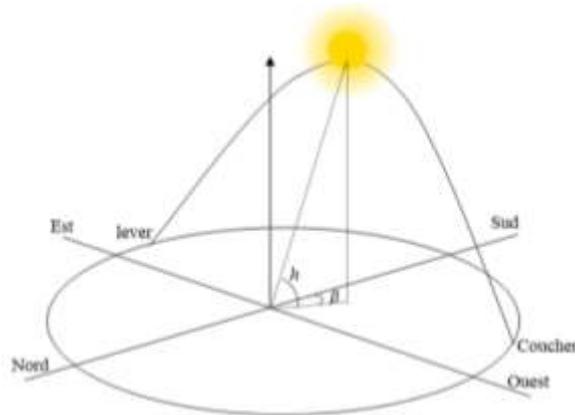


Figure I. 5 : Position du Soleil [20]

### 1.2.3 Notions sur le rayonnement solaire [32]

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ( $0,2 \mu\text{m}$ ) à l'infrarouge lointain ( $2,5 \mu\text{m}$ ). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise. Pour tenir compte de la distance traversée par les rayons, il est nécessaire d'introduire une notion de masse d'air (AM). Elle correspond à la longueur relative du parcours à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct. La masse d'air est exprimée un multiple du trajet parcouru en un point au niveau de la mer, le Soleil étant directement à l'aplomb.

Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales :

#### a) Rayonnement direct

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère.

#### b) Rayonnement diffus

C'est la partie du rayonnement provenant du Soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère.

**c) Rayonnement réfléchi**

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable, ...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lieu appelé Albédo ( $\varepsilon$ )  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ .

**d) Rayonnement global**

Un plan reçoit de la part du Soleil un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions directes, diffus et réfléchi ; il s'agit du rayonnement global.

### **I.3 Les principaux composants d'une installation photovoltaïque**

Une installation photovoltaïque est composée principalement par les éléments suivants :

- Le panneau solaire,
- La batterie,
- Le régulateur,
- L'onduleur,
- L'onduleur chargeur.

#### **I.3.1 Le capteur solaire photovoltaïque [1]**

Un capteur solaire photovoltaïque est un module photovoltaïque (Figure I.6) qui fonctionne comme un générateur électrique de courant continu constitué par un ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles électriquement, qui sert de module de base pour les installations photovoltaïques et notamment les centrales solaires photovoltaïques.



Source : Wikipédia

Figure I. 6 : Module solaire photovoltaïque

Les modules photovoltaïques les plus communément produits comprennent 36 cellules disposées en 4 rangées parallèles raccordées en série, avec une surface allant de 0,5 à 1 m<sup>2</sup>. Plusieurs modules raccordés mécaniquement et électriquement forment un panneau, autrement dit une structure commune qui peut être montée au sol ou sur un bâtiment.

Plusieurs panneaux raccordés électriquement en série constituent une rangée et plusieurs rangées raccordées électriquement en parallèle pour générer l'énergie requise constituent le générateur ou champ photovoltaïque (Figure I.7).

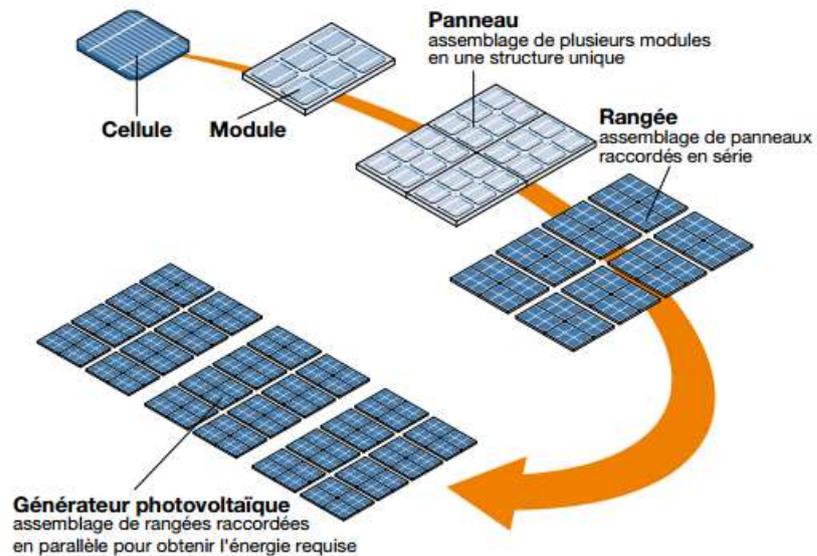


Figure I. 7 : Etapes de construction d'un générateur photovoltaïque [6]

#### a) Constitution d'un module

Un module est constitué de cellules associées en série/parallèle enrobé et encapsulé en face avant et en face arrière.

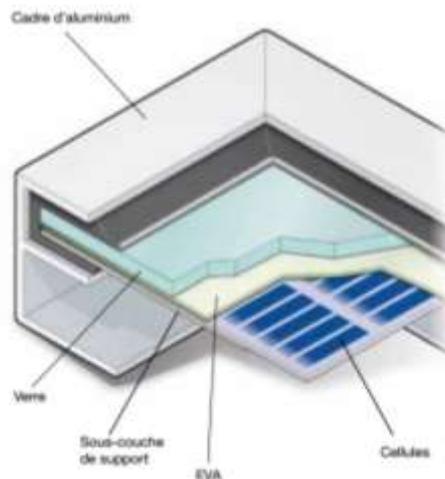


Figure I. 8 : Vue en coupe d'un module standard en silicium cristallin [6]

La face avant du module doit être en verre ayant les caractéristiques suivantes :

- Bonne transparence ;
- Résistance à l'impact et à l'abrasion (grêle, jet de pierres, vent de sable, nettoyage au chiffon) ;

- Étanchéité à l'humidité ;
- Résistance aux rayons ultraviolets, aux basses températures et aux variations soudaines de températures.

Le matériau le plus utilisé est le verre trempé.

L'enrobage des cellules doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Transparence (à l'avant) ;
- Souplesse pour enrober les cellules et connexions ;
- Adéquation aux indices optiques du verre et des cellules.

Le matériau généralement utilisé est de l'Acétate d'éthylène-vinyle (EVA).

En face arrière, le matériau doit posséder les caractéristiques suivantes :

- Protection mécanique contre le poinçonnement et les chocs (risque de mise à nu et de bris des cellules),
- Étanchéité à l'humidité,
- Bonne évacuation de la chaleur afin d'éviter que la hausse de température ne réduise l'énergie fournie par le module.
- La face arrière est généralement réalisée soit en verre (modules dits « bi-verre ») soit en composite tedlar/alu/tedlar qui est plus fragile.

Un boîtier de connexion permet :

- Le repérage des sorties (+, -, éventuellement point milieu) ;
- La connexion et le passage des câbles de liaison ;
- Le logement des diodes de protection ;
- L'étanchéité à l'humidité.

Un joint périphérique permet d'éviter les pénétrations d'humidité entre la face avant et la face arrière.

Un cadre permet le montage et la fixation mécanique, tout en participant si nécessaire à la rigidité du module. Il doit résister à la corrosion (inox, aluminium ...) et la visserie doit être choisie afin d'éviter des problèmes de corrosion. Le cadre est généralement en aluminium ou en aluminium anodisé avec visserie en matériau inoxydable.

### **b) La cellule photovoltaïque**

Une cellule photovoltaïque ou cellule solaire (Figure I.9) est un composant optoélectronique qui, exposé à la lumière c'est-à-dire aux photons, produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Elle délivre une tension continue et un courant la traverse dès qu'elle est connectée à un circuit électrique extérieur.



Source : Wikipédia

Figure I. 9 : Cellule photovoltaïque monocristalline

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs : séléniure de cuivre et séléniure d'indium. Le silicium traité adéquatement a une épaisseur d'environ 0,3 mm et une surface de 100 à 225 cm<sup>2</sup>.

Une cellule solaire se compose d'un abri du verre, d'un encapsulant et d'un métal en arrière contact afin de réduire les pertes par réflexion du rayonnement incident.

La puissance électrique produite par une cellule industrialisée est très faible, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt.

### **c) Les différents types de technologie d'une cellule photovoltaïque**

- **Silicium monocristallin**

Le silicium cristallin est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales, bien que beaucoup d'autres matériaux soient disponibles. Le terme « cristallin » implique que tous les atomes dans le matériau photovoltaïque actif font partie d'une structure cristalline simple où il n'y a aucune perturbation dans les arrangements ordonnés des atomes. Les cellules à base de silicium monocristallin possèdent un très bon rendement (14 à 20%) mais leur coût est relativement élevé.

- **Silicium polycristallin**

Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Les cellules à base de silicium polycristallin sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin. Les joints de grains dans le silicium polycristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule. L'efficacité de conversion photovoltaïque pour une cellule à base de silicium polycristallin modèle commercial s'étend entre 11 et 15%.

- ***Silicium amorphe (a-si)***

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi-conduction. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre, son rendement de conversion est faible (de 7 à 10%) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière.

Le Tableau I.2 présente un récapitulatif des différents types de technologie d'une cellule photovoltaïque.

Tableau I. 2 : Comparaison des différentes technologies d'une cellule photovoltaïque

Type	Silicium monocristallin	Silicium polycristallin	Silicium amorphe
Cellule et module			
Caractéristiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bon rendement par rapport aux autres types de module : 14 à 20%</li> <li>• Durée de vie : importante (30 ans)</li> <li>• Coût de fabrication : plus cher que les panneaux polycristallins et au silicium amorphe</li> <li>• Puissance : 100 à 150 Wc/m<sup>2</sup> ; 7 m<sup>2</sup>/kWc.</li> <li>• Rendement faible sous un faible éclairement</li> <li>• Perte de rendement avec l'élévation de la température.</li> <li>• Fabrication : élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal</li> <li>• Couleur : bleu uniforme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bon rendement : 11 à 15%</li> <li>• Durée de vie : importante (30 ans)</li> <li>• Coût de fabrication : meilleur marché que les panneaux monocristallins</li> <li>• Puissance : 100 Wc/m<sup>2</sup> ; 8 m<sup>2</sup>/kWc</li> <li>• Rendement faible sous un faible éclairement.</li> <li>• Perte de rendement avec élévation de la température.</li> <li>• Fabrication : élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux.</li> <li>• Couleur : bleu foncé non uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendement faible : 7 à 10%.</li> <li>• Durée de vie : assez importante (20 ans)</li> <li>• Coût de fabrication : peu onéreux par rapport aux autres technologies.</li> <li>• Puissance : 50 Wc/m<sup>2</sup> ; 16 m<sup>2</sup>/kWc.</li> <li>• Fonctionnement correct avec un éclairage faible.</li> <li>• Peu sensible aux températures élevées.</li> <li>• Utilisables en panneaux souples.</li> <li>• Surface de panneaux plus importante que pour les autres panneaux au silicium.</li> <li>• Rendement faible en plein soleil.</li> <li>• Performances diminuant avec le temps.</li> <li>• Fabrication : couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.</li> </ul>

**d) Protections des cellules**

Deux types de protection sont généralement indispensables au bon fonctionnement d'un module photovoltaïque : les diodes by-pass et la diode anti-retour.

- **Les diodes by-pass**

La protection par diodes parallèles ou by-pass a pour but de protéger une série de cellules dans le cas d'un déséquilibre lié à la défectuosité d'une ou de plusieurs des cellules de cette série ou d'un ombrage sur certaines cellules.

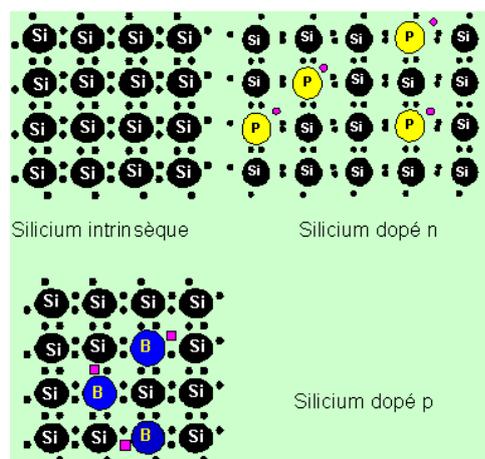
- **La diode anti-retour**

La diode série placée entre le module et la batterie empêche pendant l'obscurité le retour de courant vers le module. Elle est dans ce cas appelée diode anti-retour.

**e) Principe de fonctionnement**

Les cellules photovoltaïques se présentent généralement sous la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté. La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homo jonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction) ; le but de la structure est de créer un champ électrique interne.

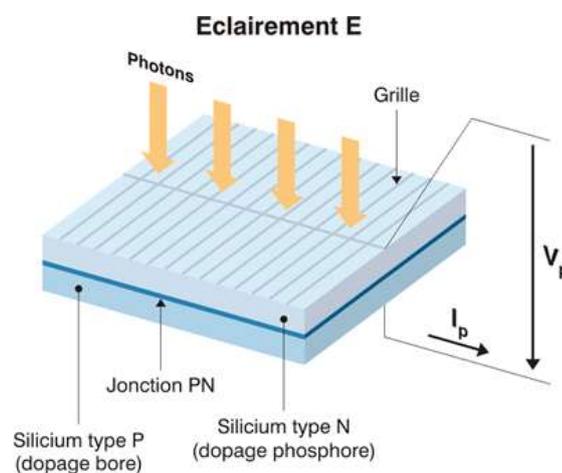
Le silicium qui comprend quatre électrons de valence (tétravalent) est dopé en ajoutant des atomes trivalents (par exemple l'atome de bore – dopage P) sur une couche et de grandes quantités d'atomes pentavalents (par exemple l'atome de phosphore – dopage N) sur l'autre. La région de type P présente un excès de trous, tandis que la région de type N a un excès d'électrons (Figure I.10).



Source : INRS Lyon

Figure I. 10 : Silicium dopé

La jonction P-N de ces matériaux fonctionne comme une diode. Lorsque cette diode est exposée à des photons dont l'énergie est supérieure à celle de l'énergie du matériau appelée énergie de bande gap, le nombre d'électrons libres du semi-conducteur de type P et celui des trous du semi-conducteur de type N augmente considérablement. Donc si l'énergie des photons incidents est inférieure à celle du matériau ils ne seront pas absorbés, c'est-à-dire que leur énergie ne contribue pas à la conversion photovoltaïque. Dans une cellule photovoltaïque, une large fraction de ces électrons et trous atteint la jonction P-N et un champ électrique se crée, donc il y a génération de courant électrique dont le sens est opposé à celui de la cellule lorsqu'elle fonctionne en tant que diode, autrement dit, quand la diode est illuminée, un courant positif traverse de N vers P (Figure I.11).



Source :

Figure I. 11 : Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

#### f) Les pertes énergétiques possibles [10] [31]

Les principales sources de pertes énergétiques sont :

- L'ombrage partiel,
- L'ombrage total,
- La dispersion de puissance nominale,
- Les pertes de connexions,
- Les pertes angulaires ou spectrales,
- Les pertes par chute ohmique,
- Les pertes liées à la chaleur,
- Les pertes à cause du rendement DC/AC de l'onduleur,
- Les pertes par suivi du point de puissance maximum (MPPT),
- Les pertes dues au vieillissement naturel du module.

- **Ombrage partiel**

L'environnement d'un module photovoltaïque peut inclure des arbres, montagnes, murs, bâtiments, etc. Il peut provoquer des ombrages sur le module qui affecte directement l'énergie collectée.

- **Ombrage total (poussière ou saletés)**

Leur dépôt occasionne une réduction du courant et de la tension produite par le générateur photovoltaïque.

- **Dispersion de puissance nominale**

Les modules photovoltaïques issus du processus de fabrication industrielle ne sont pas tous identiques. Les fabricants garantissent des déviations inférieures de 3 à 10% autour de la puissance nominale. En pratique, le module solaire photovoltaïque fonctionne en fonction des performances du pire panneau : la puissance nominale est donc généralement inférieure à celle prescrite par le fabricant.

- **Pertes de connexions**

La connexion entre modules de puissance légèrement différentes occasionne un fonctionnement à puissance légèrement réduite. Elles augmentent avec le nombre de modules en série et en parallèle.

- **Pertes angulaires ou spectrales**

Les modules photovoltaïques sont spectralement sélectifs, la variation du spectre solaire affecte le courant généré par ceux-ci. Les pertes angulaires augmentent avec l'angle d'incidence des rayons et le degré de saleté de la surface.

- **Pertes par chutes ohmiques**

Les chutes ohmiques se caractérisent par les chutes de tensions dues au passage du courant dans un conducteur de matériau et de section donnés. Ces pertes peuvent être minimisées avec un dimensionnement correct de ces paramètres.

- **Pertes liées à la chaleur**

Les modules perdent en moyenne 0,4% de production par degré supérieur à la température standard (25°C en conditions standard de mesures STC). La température d'opération des modules dépend de l'irradiation solaire incidente, de la température ambiante, de la couleur des matériaux et de la vitesse du vent.

- **Pertes à cause du rendement DC/AC de l'onduleur**

L'onduleur peut se caractériser par une courbe de rendement en fonction de la puissance de l'opération.

- **Pertes par suivi du point de puissance maximum (MPPT)**

L'onduleur dispose d'un dispositif électronique qui calcule en temps réel le point de fonctionnement de puissance maximum (3%).

- **Pertes dues au vieillissement naturel des modules**

En moyenne un module en plein air perd moins de 1% de sa capacité par an (0,8% /an en moyenne et 0,5%/an en valeur médiane).

**g) Entretien [11]**

De manière générale, les modules photovoltaïques n'ont pas besoin d'entretien particulier. Constitués d'une surface particulièrement plane et glissante (verre), la pluie, le vent et l'inclinaison suffisent à les conserver suffisamment propres au fil des années pour ne perdre qu'un minimum de production sur la durée, sauf à se trouver opacifiés par des poussières produites en quantités importantes à proximité (cimenteries, carrière, routes, ...). Ainsi, après plusieurs mois, le maximum d'opacité est atteint. Les quelques % de production perdue – probablement moins de 5% - sont donc acceptables. Quand les modules sont insérés dans le bâti, l'architecture peut cependant prévoir les conditions de maintenance dont le nettoyage.

Deux innovations récentes peuvent concourir à l'entretien des grandes installations avec plus de sécurité pour le personnel et en risquant moins d'abîmer les modules :

- Des robots nettoyeurs qui sont télécommandés par Wifi peuvent nettoyer les panneaux.
- Des drones de surveillance des anomalies permettent d'intervenir plus tôt et au bon endroit uniquement. L'autonomie du drone est encore très limitée et son passage est coûteux mais ces deux défauts sont économiquement compensés par sa maniabilité et sa rapidité d'intervention.

**1.3.2 La batterie [26]**

**a) Son rôle**

La batterie sert à stocker l'énergie électrique excédentaire produite par le ou les panneaux solaires. Cette énergie électrique est stockée sous forme chimique. La nuit, c'est la batterie qui fournit l'énergie. Le stockage est dimensionné pour une durée bien déterminée sans soleil, permettant d'avoir une large plage de secours, prenant ainsi en compte les phénomènes de durée de vie et de perte de capacité liée au cyclage (charge et décharge). Son utilisation dans une centrale

solaire photovoltaïque n'est pas obligatoire. Dans le cas où on n'utilise pas de batteries l'énergie produite par les modules est immédiatement consommée, elle n'est pas stockée.

**b) Sa capacité**

La capacité représente la quantité d'électricité que la batterie peut délivrer pendant une période donnée, sous un régime de décharge et une température ambiante donnée. La capacité diminue à basse température, à fort taux de décharge et avec le vieillissement. Cette capacité s'exprime en Ah (ampères-heures).

La norme internationale définit de la façon suivante la capacité nominale d'un accumulateur au plomb : la capacité  $C_{20}$  est la valeur obtenue en ampères-heures lors de la décharge continue et ininterrompue pendant 20 heures jusqu'à une tension de fin de décharge de 1,75 V par élément à 20 °C. L'intensité nominale correspond à 1/20 de la capacité en ampères-heures.

**La profondeur de la décharge**

Une batterie ne doit jamais être laissée dans un état de décharge profonde pendant une longue période car il y a risque de détérioration rapide de sa capacité de stockage dans ce cas. La profondeur de décharge maximale représente en pourcentage la capacité nominale au-delà de laquelle la décharge n'est pas souhaitable. Durant la décharge d'une batterie, les cristaux de sulfate de plomb se forment sur les électrodes positives et négatives. Si la batterie reste longtemps déchargée, ces cristaux de sulfate de plomb grossissent et coalescent. Ils peuvent alors déformer les électrodes et provoquer des courts-circuits en perforant les séparateurs. Si la batterie reste déchargée trop longtemps, la transformation des matériaux actifs (Pb et PbO<sub>2</sub>) en sulfate peut devenir irréversible, ce qui réduit la capacité de la batterie. De plus, les sulfates augmentent la résistance interne des batteries car ils ne sont pas de bons conducteurs électriques.

Dans une installation avec panneau solaire, la décharge journalière correspond au déficit entre la production et la consommation journalière.

La profondeur de décharge maximale autorisée est toujours supérieure à la profondeur de décharge journalière (de 5 à 30 % de la capacité nominale) ; elle dépend aussi de la température d'utilisation la plus basse.

**c) Sa constitution**

Une batterie se présente sous la forme d'un bac étanche dans lequel sont plongées deux électrodes de métaux différents constituant l'accumulateur.

Elle est composée d'un ensemble d'éléments de 2 V connectés en série pour obtenir la tension d'utilisation désirée (Figure I.12). Ces éléments sont formés de plaques positives et négatives, assemblées en alternance. Le nombre de plaques de chaque polarité, leur surface ainsi que la

quantité d'acide disponible dans l'électrolyte<sup>3</sup> sont les paramètres qui définissent la capacité de l'élément (aptitude pour la batterie chargée de restituer un certain nombre d'ampères-heures, en régime de courant de décharge constant, sous une tension d'arrêt et une température définie).

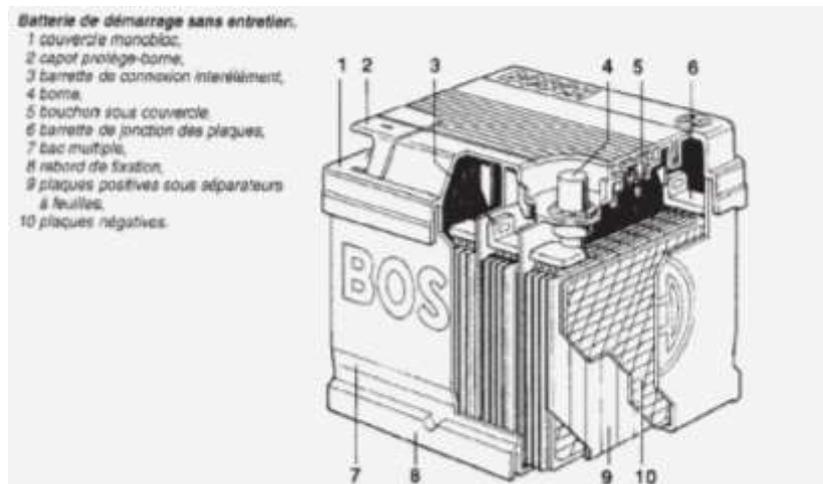


Figure I. 12 : Constitution d'une batterie [26]

- *Les batteries au plomb-acide*

Les accumulateurs les plus couramment utilisés pour le stockage d'énergie sont les accumulateurs au plomb. Ils ne disposent que d'une tension de 2 V, c'est pourquoi on les associe en série pour constituer une batterie d'accumulateurs. Ainsi les batteries 12 V de voiture sont constituées de 6 éléments accumulateurs au plomb mis en série. Les batteries au plomb sont les moins chères, mais leur durée de vie est relativement courte.

- *Les batteries au nickel*

Les batteries au nickel possèdent une durée de vie plus longue que les batteries au plomb, mais chaque élément ne procure qu'une tension de 1,2 V. Elles sont de type nickel-cadmium (Ni-Cd) ou nickel-hydrure métallique (Ni-MH) à électrolytes alcalins. Moins nocives pour l'environnement, les batteries nickel-hydrure sont amenées à remplacer progressivement les batteries nickel-cadmium qui devraient disparaître. Les batteries en nickel sont plus chères, en raison du coût plus important des matières premières et de la plus grande complexité du processus de fabrication.

---

<sup>3</sup> L'électrolyte est un composé chimique liquide ou gélifié dont le rôle est de fournir les ions sulfates nécessaires aux réactions d'oxydoréduction produites lors des recharges et décharges de la batterie.

- *Les batteries au lithium*

Les batteries au lithium (lithium-ion et lithium-polymère) se caractérisent par des densités énergétiques supérieures à 100 Wh/kg et par des puissances volumiques supérieures à 300 W/kg. La tension par élément peut dépasser 4 V. Leur inconvénient réside dans la nécessité de mise en œuvre de moyens de protection complexes.

Tableau I. 3 : Données techniques des différentes batteries [26]

Caractéristiques	Batterie plomb-acide ouvert/scellée	Batteries au nickel nickel-cadmium (Ni-Cd), nickel-hydrure métallique (Ni-MH)	Batterie au lithium lithium-ion lithium-polymère
Tension d'élément [V]	2	1,2	3 - 4
Rendement énergétique sans chauffage/refroidissement [%]	75 - 85	35 - 85	85 - 90
Puissance volumique [W/kg]	100 - 200	100 - 500	300 - 500
Durée de vie [cycles]	600- 900	> 1000	> 1000
Température normale de fonctionnement [°C]	10 - 55	20 - 55	10 - 50 ou 60

**d) Maintenance des batteries**

La batterie est le composant qui requiert le plus de maintenance car un état de décharge prononcé et chronique affecte de façon sensible sa durée de vie.

Il est indispensable de relever la tension globale du parc batterie et la température du local.

La vérification du niveau d'électrolyte dans les batteries est nécessaire et il convient de le compléter avec de l'eau déminéralisée pour les batteries au plomb ouvert et de ne jamais laisser les plaques émerger.

Il s'avère également nécessaire d'effectuer un entretien classique pour maintenir un bon état de propreté des éléments, des couvercles, du local de la batterie, entre autres éliminer les cristaux de sulfate qui apparaissent sur les bornes et les couvercles.

**1.3.3 Le régulateur [26]**

**a) Son rôle**

Le régulateur a pour fonction de gérer la charge et la décharge de la batterie. Il permet un transfert optimal d'énergie entre le générateur solaire et la batterie tout en minimisant la profondeur

de décharge et en protégeant la batterie de la surcharge, qui provoquerait un vieillissement prématuré.

**b) Sa structure**

Le régulateur possède un élément de commutation – relais, transistor bipolaire, transistor Mosfet, thyristor – placé entre le panneau solaire et la batterie. Il est commandé par une logique basée sur le contrôle de la tension de la batterie, et peut facilement commuter des courants forts sans dissipation interne d'énergie.

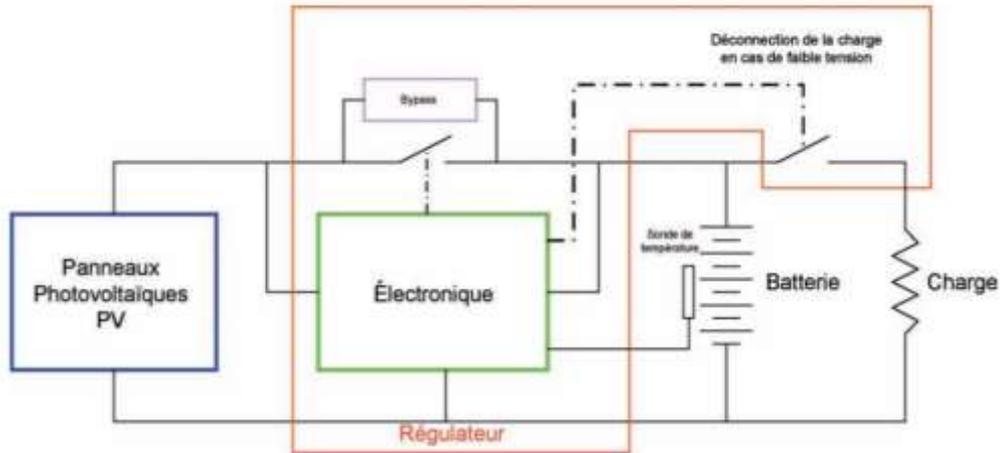


Figure I. 13 : Schéma de principe d'un régulateur [26]

**c) Ses caractéristiques**

Le régulateur possède en général plusieurs caractéristiques techniques :

- Protection contre les inversions de polarités (panneau solaire ou batterie)
- Diode anti-retour intégré (évite le retour du courant vers le générateur)
- Fonction alarme tension en cas de tension de batterie trop basse
- Visualisation des états de charge par leds
- Protection contre la foudre, les courts-circuits
- Afficheur de la tension de la batterie et des courants de charge et de décharge

En général, le choix s'effectue en fonction de la tension (12 V, 24 V) et du courant maximal provenant des panneaux solaires.

**1.3.4 L'onduleur [26]**

**a) Son rôle**

L'onduleur est un convertisseur continu-alternatif qui transforme la tension continue du générateur photovoltaïque en 220 V alternatif.

En site isolé, l'onduleur permet d'alimenter des récepteurs fonctionnant en courant alternatif. On utilise actuellement des onduleurs ayant un signal de sortie alternatif quasi sinusoïdal.

En site non isolé, on peut utiliser un onduleur pour renvoyer de l'énergie sur le réseau. Dans ce cas, on utilise un onduleur sinusoïdal, qui coûte de quatre à cinq fois plus cher qu'un onduleur quasi sinusoïdal. La différence vient du fait que le signal est pur (forme sinusoïdale) et que pour arriver à ce niveau il a fallu employer des filtres. Ce type d'onduleur ne fonctionne pas quand il y a coupure de l'électricité du réseau sauf si des dispositifs anti-délestage comme un groupe électrogène ou un parc batteries sont utilisés car l'onduleur a besoin d'une fréquence de 50 Hz pour fonctionner.

### b) Son schéma de principe

Le signal de sortie obtenu peut être quasi sinusoïdal ou sinusoïdal.

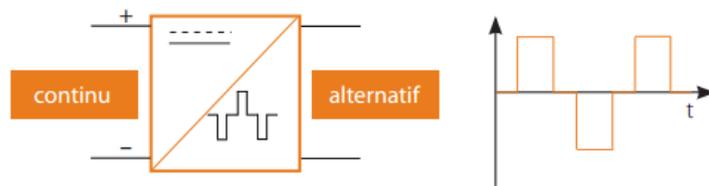


Figure I. 14 : Onduleur quasi sinusoïdal [26]

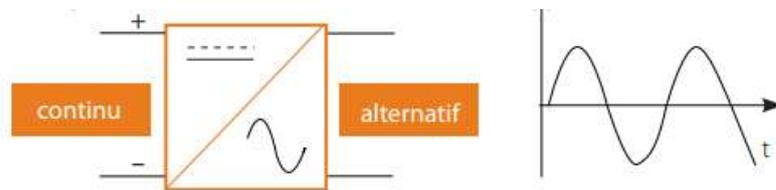


Figure I. 15 : Onduleur sinusoïdal [26]

### c) Le rendement

Les appareils modernes performants atteignent un rendement supérieur à 90% dès une charge de 5 à 10% de leur puissance nominale. Mais le rendement des appareils consommateurs dépend de la forme de l'onde, par exemple, un moteur alimenté par une onde carrée a un très mauvais rendement et se chauffe facilement.

### d) Les différents types

Il existe dans le commerce différents modèles d'onduleurs ; leurs caractéristiques sont liées aux applications auxquelles ils sont destinés (Annexe 1).

#### 1.3.5 L'onduleur-chargeur

Comme son nom l'indique, un onduleur chargeur réunit les fonctions d'onduleur et chargeur de batteries. L'onduleur chargeur assure l'interface entre batteries qui fonctionnent en courant

continu et le reste de l'installation fonctionnant avec du courant alternatif. Il régule la charge et la décharge des batteries pour optimiser leur durée de vie. Le fonctionnement de l'onduleur chargeur se fait automatiquement. On utilise l'onduleur-chargeur pour les grands systèmes (centrales photovoltaïques).

### a) Conversion AC/DC

Lorsque la puissance fournie par les panneaux solaires satisfait la demande des utilisateurs (existence d'excès de puissance), l'onduleur chargeur charge automatiquement les batteries après avoir converti en courant continu le courant alternatif provenant de l'onduleur solaire. La charge des batteries se fait avec une bonne régulation, donc l'onduleur chargeur joue le rôle de régulateur de charge. Par conséquent, une installation photovoltaïque comprenant un onduleur chargeur n'a plus besoin de régulateur.

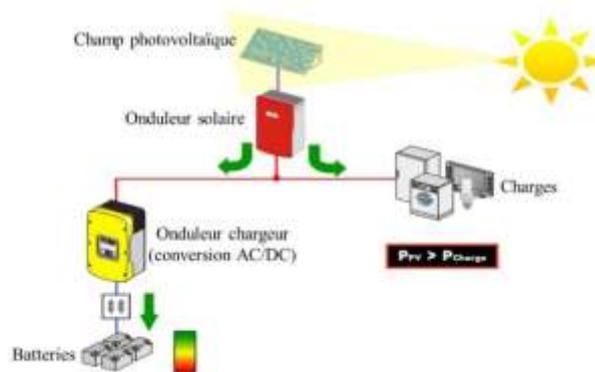


Figure I. 16 : Conversion AC/DC par l'onduleur-chargeur [34]

### b) Conversion DC/AC

En cas d'insuffisance de la puissance produite par les modules photovoltaïques, l'onduleur chargeur convertit en courant alternatif le courant continu provenant des batteries automatiquement pour alimenter les charges.

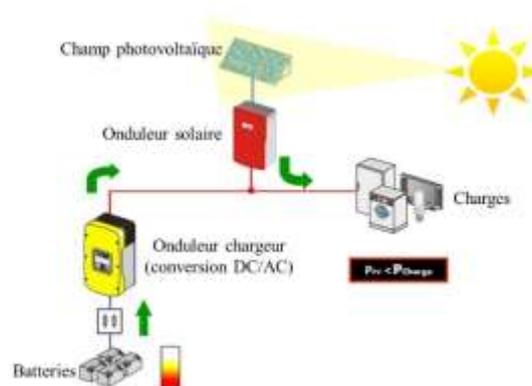


Figure I. 17 : Conversion DC/AC par l'onduleur chargeur [34]

## *1.4 Les différentes installations photovoltaïques*

Il existe trois types d'installations photovoltaïques :

- Les installations sur site isolé (off grid) ;
- Les installations raccordées au réseau de distribution public (on grid) ;
- Les installations hybrides.

### *1.4.1 Les installations off grid*

Ce type de montage est adapté aux installations ne pouvant être raccordées au réseau. L'énergie produite doit être directement consommée et/ou stockée dans des accumulateurs pour permettre de répondre à la totalité des besoins.

Les panneaux photovoltaïques produisent un courant électrique continu.

Le régulateur optimise la charge et la décharge de la batterie suivant sa capacité et assure sa protection.

L'onduleur transforme le courant continu en courant alternatif pour alimenter les récepteurs AC.

Les batteries sont chargées de jour pour pouvoir alimenter la nuit ou les jours de mauvais temps.

Des récepteurs DC spécifiques sont utilisables. Ces appareils sont particulièrement économes.

### *1.4.2 Les installations on grid*

#### **a) Solution avec injection totale**

Toute l'énergie électrique produite par les capteurs photovoltaïques est envoyée pour être revendue sur le réseau de distribution.

C'est une solution réalisée avec le raccordement au réseau public en deux points :

- Le raccordement du consommateur qui reste identique avec son compteur de consommation (on ne peut pas utiliser sa propre production) ;
- Le branchement permet d'injecter l'intégralité de la production dans le réseau.

Un unique compteur intelligent (compteur bidirectionnel) permet de gérer la production ainsi que la non-consommation (vérification qu'aucun soutirage frauduleux n'est réalisé).

Cette solution n'est pas encore appliquée à Madagascar car la loi sur l'autorisation de vente d'électricité à la société JIRAMA (Jlro sy RAno MAlagasy) n'a pas encore été instaurée.

#### **b) Solution avec injection de surplus**

C'est une solution qui est réalisée avec le raccordement au réseau public en un point : l'utilisateur consomme l'énergie qu'il produit avec le système solaire et l'excédent est injecté dans

le réseau. Quand la production photovoltaïque est insuffisante, le réseau fournit l'énergie nécessaire. Un compteur intelligent remplace l'ancien compteur pour gérer la consommation et la production d'électricité.

C'est une solution pratiquée à Madagascar, l'opérateur électrique JIRAMA n'achète pas le surplus d'électricité, c'est la facture d'électricité de l'utilisateur qui diminue en fonction de sa production d'électricité solaire photovoltaïque. Mais de nouveaux décrets d'application attendent d'être présentés au Gouvernement, on appliquera alors une compensation au volume avec des règles qui restent à définir, par exemple, pour 1 kWh solaire injecté sur le réseau en journée, le client reçoit 1 kWh du réseau en soirée (compensation 1 pour 1).

### *1.4.3 Les installations hybrides*

Dans les installations hybrides, l'énergie solaire photovoltaïque est en combinaison avec une autre source d'énergie, elle peut être renouvelable ou non. Ce type d'installation est favorable pour les zones rurales éloignées du réseau et situées dans un endroit ensoleillé. Pour une satisfaction de toutes les charges, il est nécessaire de raccorder l'installation photovoltaïque avec une ou plusieurs autres sources d'énergie car durant la nuit il n'y a pas de production électrique par les modules photovoltaïques, et l'énergie produite par le module dépend de l'ensoleillement.

## *1.5 Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque [17]*

### *1.5.1 Avantages*

- Une haute fiabilité, l'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au Mégawatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.
- Rapidité d'installation par rapport aux autres technologies de production électrique comme l'hydroélectricité avec le travail de génie civil

### *1.5.2 Inconvénients*

- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10 à 15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

## Chapitre II : Généralités sur les logiciels de dimensionnement solaire

### II.1 Logiciels pour le gisement solaire, l'irradiation et les données climatiques [7]

Pour l'évaluation du potentiel photovoltaïque d'un lieu, il est nécessaire de connaître son potentiel photovoltaïque, c'est-à-dire les données de gisement, d'irradiation et les données climatiques de l'endroit. Beaucoup de logiciels sont utilisables afin de trouver ces données. Le tableau ci-dessous nous résume ces logiciels avec leurs spécificités.

Tableau II. 1 : Logiciels pour le gisement solaire, l'irradiation et les données climatiques

LOGICIEL	CARACTERISTIQUES
<b>EERE</b>	Energy Efficiency and Renewable Energy de US Department of Energy, données climatiques et solaires sur 230 villes dans 85 pays. L'outil est un site internet. EERE a pour but d'augmenter la production d'électricité à partir de sources renouvelables en réduisant le coût de l'énergie hydroélectrique, solaire, éolienne, houlomotrice, marémotrice et géothermique.
<b>IES</b>	Base de données de l'Institute for Environment and Sustainability à Ispra en Italie sur l'irradiation solaire (valeurs moyennes mensuelles pour différentes inclinaisons, trouble de Link, rapport diffus/global ...) pour différents lieux dans 60 pays dans le monde dont 500 en France. L'IES mène des recherches pour comprendre les interactions complexes entre l'activité humaine et l'environnement physique et comment gérer les ressources stratégiques (eau, terre, forêts, aliments, minéraux, etc.) de manière plus durable.
<b>METEONORM 5.0</b>	Logiciel (de Meteotest) de données climatiques et irradiation solaire, calcul suivant l'orientation et l'inclinaison. Meteonorm 5.0 est une référence météorologique compréhensible qui donne accès à un catalogue de données météorologiques pour des applications solaires dans n'importe quel endroit du monde. Ce logiciel donne accès à un catalogue de données météorologiques pour applications solaires et conception de systèmes dans le monde entier. Il est basé sur plus de 25

	ans d'expérience dans le développement de bases de données météorologiques pour applications énergétiques. Logiciel gratuit téléchargeable.
<b>PVGis</b>	PVGis est un calculateur d'énergie solaire photovoltaïque en ligne gratuit pour les installations photovoltaïques autonomes ou connectées au réseau, en Europe, en Afrique et en Asie. Cartes de simulation des générateurs solaires et des radiations solaires.
<b>RETScreen</b>	<p>RETScreen est un outil de sensibilisation à l'énergie propre, d'aide à la décision et de renforcement des capacités. L'outil central consiste en un logiciel d'analyse de projets d'énergie propre standardisé et intégré pouvant être utilisé dans le monde entier pour évaluer la production d'énergie, les coûts du cycle de vie et les réductions d'émissions de gaz à effet de serre). Chaque modèle de technologie énergétique RETScreen (par exemple, un projet photovoltaïque) est développé dans un fichier individuel « classeur » Microsoft® Excel. Le fichier de classeur est à son tour composé d'une série de feuilles de calcul. Ces feuilles de travail ont un aspect commun et suivent une approche standard pour tous les modèles RETScreen. Outre le logiciel, l'outil comprend : des bases de données de produits, de météo et de coûts ; un manuel en ligne ; un site Web ; un manuel d'ingénierie ; études de cas de projets ; et un cours de formation.</p> <p>Logiciel gratuit téléchargeable mais une dernière version payante existe, il s'agit de RETScreen Expert (mais existence de version démo)</p>
<b>SoDa</b>	Service web (de l'Ecole des Mines de Paris) pour les professionnels en énergie solaire. Base de données climatiques et en irradiation solaire sur la planète avec différentes applications.
<b>Solar Irradiation</b>	Site de John Duffy, University of Massachusetts. Irradiation solaire mensuelle de 2 300 villes dans 120 pays (42 villes en France).
<b>Solargis</b>	Logiciel en ligne qui fournit les données d'irradiation solaire dans le monde entier. L'activité principale de la société Solargis consiste à apporter son soutien à la qualification du site, à la planification, au financement et à l'exploitation des systèmes d'énergie solaire. La société s'appuie sur 17 années d'expérience dans l'énergie solaire et le photovoltaïque.

<b>SunAngles</b>	Calcul de la position du soleil (en Anglais).
<b>WRDC</b>	World Radiation Data Center, Données sur l'irradiation solaire dans le monde (en Anglais). Le WRDC recueille et archive de manière centralisée les données radiométriques du monde pour garantir la disponibilité de ces données pour la recherche par la communauté scientifique internationale.

## II.2 Outils sur la simulation de la production d'énergie photovoltaïque [7]

Des logiciels permettent d'avoir une idée sur la production énergétique d'un système. Le tableau ci-dessous nous les résume avec leurs caractéristiques.

Tableau II. 2 : Outils sur la simulation de la production d'énergie photovoltaïque

LOGICIEL	CARACTERISTIQUES
<b>Archellos</b>	Progiciel de Cynthelia, Programme de calcul d'irradiation solaire et de simulation de système photovoltaïque.
<b>Greenius</b>	Greenius est un outil de simulation pour l'utilisation des énergies renouvelables.
<b>HOMER</b>	HOMER est un logiciel de modélisation de micro grilles. HOMER explore les complexités de la création de micro réseaux rentables et fiables combinant une alimentation, un stockage et une gestion de la charge générés de manière traditionnelle et renouvelable.
<b>PVcad</b>	Logiciel de dimensionnement de façade photovoltaïque de l'ISET.
<b>PV-Design-PRO</b>	Logiciel de simulation de systèmes photovoltaïques, en anglais et en espagnol.
<b>PV F-CHART</b>	Logiciel de simulation de systèmes photovoltaïques, en anglais et pour les USA.
<b>PVSOL</b>	Logiciel de la société Valentin, programme de simulation d'installations photovoltaïques.
<b>PVSYST</b>	Logiciel de l'Université de Genève, programme de simulation de systèmes photovoltaïques. PVsyst est conçu pour être utilisé par les architectes, les ingénieurs et les chercheurs, mais c'est aussi un outil pédagogique très utile. Il inclut une aide contextuelle approfondie, qui explique en détail la procédure et les modèles utilisés et offre une approche

	ergonomique avec guide dans le développement d'un projet. PVsyst permet d'importer des données météo d'une dizaine de sources différentes ainsi que des données personnelles.
<b>Sunny Design</b>	Logiciel en ligne développé par sma pour le dimensionnement de systèmes solaire autonomes, hybride et raccordé au réseau. Contient des bases de données météorologiques et des bases de données de produits.

### II.3 Outils d'analyse de cycle de vie [7]

L'analyse de cycle de vie consiste à réaliser un bilan environnemental multicritère et multi-étape d'un système sur l'ensemble de son cycle de vie. Le tableau suivant contient des logiciels pouvant être utilisés pour l'analyse de cycle de vie.

Tableau II. 3 : Outils d'analyse de cycle de vie

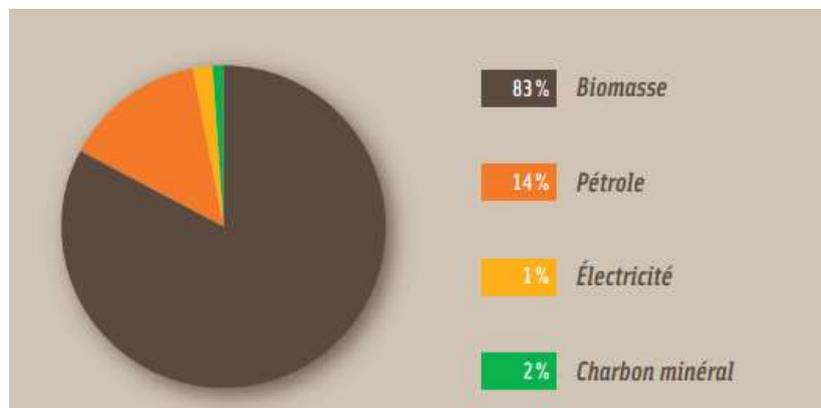
LOGICIEL	CARACTERISTIQUES
<b>EQUER</b>	Logiciel de IZUBA et de l'Ecole des Mines de Paris pour l'analyse du cycle de vie par simulation dynamique.
<b>SimaPro</b>	Logiciel d'analyse de cycle de vie. Le logiciel aide à rendre quantifiables les démarches de développement de produits éco-conçus et des objectifs de durabilité.
<b>GaBI</b>	Logiciel d'analyse de cycle de vie, de coût, d'environnement, de GES, ...
<b>RETScreen</b>	Effectue l'analyse financière et la réduction d'émission de gaz à effet de serre d'un projet d'énergie propre sur l'ensemble de son cycle de vie.
<b>TEAM</b>	TEAM est un outil d'Analyse de Cycle de Vie de produits.
<b>Square One</b>	Site d'information donnant accès à des logiciels sur l'analyse du cycle de vie.
<b>BEES</b>	Building for Environmental and Economic Sustainability, BESS software.
<b>ECOPRO LCA</b>	EcoPro, the life-cycle-assessment (LCA) tool, developed with EMPA.

## Chapitre III : Contexte énergétique à Madagascar

### III.1 Situation énergétique de Madagascar [2] [13]

#### III.1.1 La consommation énergétique à Madagascar

Actuellement, le bois de chauffe reste la principale source d'énergie de la population Malagasy que ce soit pour la cuisson, le chauffage ou l'éclairage. Les ressources forestières fournissent plus de 80% de l'énergie consommée au pays. Le pétrole est la seconde source pour l'éclairage et la motorisation ; trois quarts de la population malagasy se sert du pétrole lampant pour l'éclairage. Pour les besoins en hydrocarbure, Madagascar est obligé d'importer l'entièreté de ses besoins, environ 200 000 mètres cubes de produits liquides et 50 000 tonnes de gaz en 2014. La figure ci-dessous résume la proportion d'utilisation de différentes sources énergétiques à Madagascar.



Source : Fondation énergie pour le monde (2010)

Figure III. 1 : Les postes de consommation énergétique à Madagascar

#### III.1.2 Le taux d'électrification à Madagascar

A Madagascar, seuls les 15% de la population ont actuellement accès à l'électricité [10] dont 6,52% en milieu rurale<sup>4</sup>. Le principal opérateur électrique est la JIRAMA (Jiro sy RAno Malagasy) mais des opérateurs privés se sont mis en place depuis la réforme qui a ouvert le secteur de l'électricité à Madagascar vers la fin des années 1990 (Annexe 2).

<sup>4</sup> Source : enquête auprès du Directeur Technique de l'ADER

## III.2 Centrales de production électrique à Madagascar [15]

### III.2.1 Milieu urbain

D'après les données publiées sur le site internet de l'Office de Régulation de l'Electricité (ORE), 526 centrales de production d'électricité existent à Madagascar dans le milieu urbain, ce sont des centrales exploitées et gérées par la société JIRAMA.

Le tableau ci-après représente les centrales de production électrique qui sont déjà installées dans le milieu urbain à Madagascar avec leur nombre et leur proportion. Les données du tableau ne sont pas exhaustives, elles datent de 2016.

Tableau III. 1 : Proportion par type de centrale électrique en milieu urbain à Madagascar

Type de centrale	Nombre	Proportion	Proportion en service	Proportion hors service
Diesel	486	92,4%	77%	23%
Hydroélectrique	39	7,4%	90%	10%
Solaire	1	0,2%	100%	0%
<b>Total</b>	<b>526</b>	<b>100%</b>		

Les 92,4% de l'électricité produits à Madagascar sont produites par des centrales thermiques, les 7,4% par des centrales hydroélectriques et une seule centrale solaire est exploitée en milieu urbain.

### III.2.2 Milieu rural

Selon les informations obtenues sur le site internet de l'ORE, 133 centrales électriques sont installées et exploitées en milieu rural à Madagascar en 2016.

Dans le tableau qui suit, on trouve les types de centrale de production électrique présents dans le milieu rural à Madagascar avec leur nombre et leur proportion. Il est à noter que ces données datent de 2016 mais ne sont pas exhaustives.

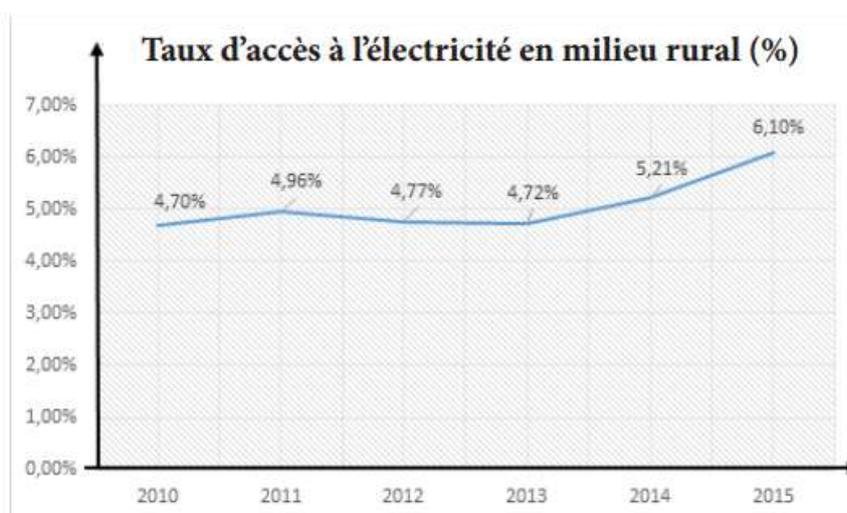
Tableau III. 2 : Proportion par type de centrale électrique en milieu rural à Madagascar

Type de centrale	Nombre	Proportion	Proportion en service	Proportion hors service
Diesel	86	65%	48%	52%
Solaire	18	14%	95%	5%
Hydroélectrique	17	13%	71%	29%
Eolienne/Diesel	6	5%	86%	14%
Biomasse/Diesel	4	2%	75%	25%
Solaire/Eolienne	1	1%	100%	0%
<b>Total</b>	<b>133</b>	<b>100%</b>		

En milieu rural, six types de centrale sont exploitées ; 65% d'entre elles sont des centrales thermiques, 14% des centrales solaires ; 13% utilise la technologie de l'hydroélectrique. Des centrales hybrides éolienne/diesel ont une proportion de 5% ; biomasse/diesel 2% et une seule centrale hybride solaire/éolienne est installée. Certains de ces centrales peuvent être actuellement en état de panne.

- **Les réalisations de l'Agence de Développement de l'Electrification Rurale (ADER) [5]**

Dans le cadre de l'électrification rurale, l'ADER est le responsable des appels d'offres et de la sélection des opérateurs indépendants. En fin 2016, 15 000 clients se sont raccordés, 214 villages desservis et 160 projets réalisés. Depuis 2005, la puissance totale installée atteint 7 865 kW. Ce sont des projets qui ont été coordonnés par l'ADER.



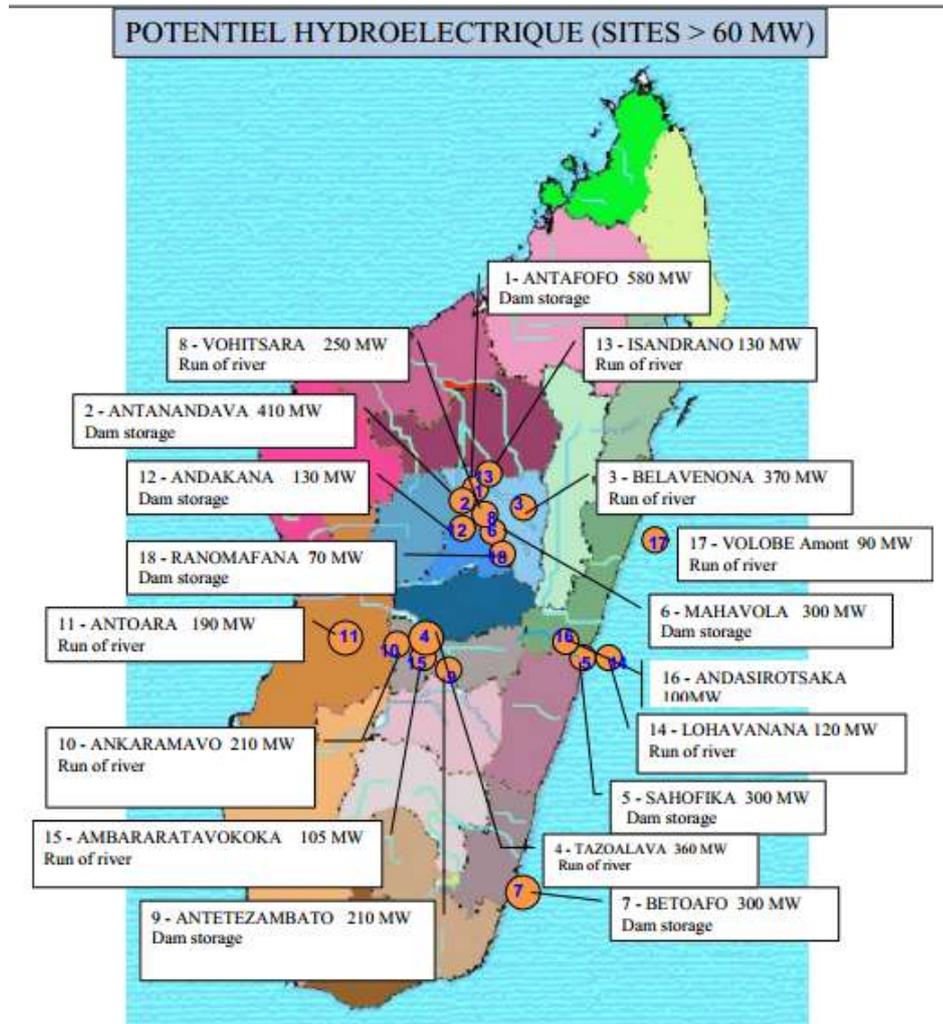
Source : Bulletin d'information trimestriel – N°01- Edition Juin 2017 (ADER)

Figure III. 2 : Taux d'accès à l'électricité en milieu rural

Vue le chiffre encore très bas du taux d'accès à l'électricité en milieu rural à Madagascar, les nombreux projets coordonnés par l'ADER n'ont pas tous eu des résultats positifs. Ce qui s'explique par la manque d'expériences en matière d'exploitation des énergies renouvelables en milieu rural à Madagascar.

### *III.3 Les énergies renouvelables à Madagascar*

La principale source d'énergie renouvelable exploitée à Madagascar est l'énergie hydraulique. Une puissance totale de 162 MW d'hydroélectricité est exploitée en 2013. Les autres ressources renouvelables sont utilisées à petite échelle alors que Madagascar possède un fort potentiel non-exploité que ce soit sur l'hydroélectrique, le solaire, l'éolienne, la biomasse ou la géothermie. Les ressources renouvelables peuvent réduire considérablement le coût d'exploitation et d'importation d'hydrocarbures. Les ressources de biomasse agricole (balle de riz, canne à sucre) et les déchets organiques et solides peuvent alimenter la production électrique. Des ressources océaniques et géothermiques représentent un potentiel futur à exploiter. D'après la carte suivante, le potentiel en hydroélectricité à Madagascar atteint les 4 225 MW ; cette gigantesque puissance n'est pas encore exploitée.

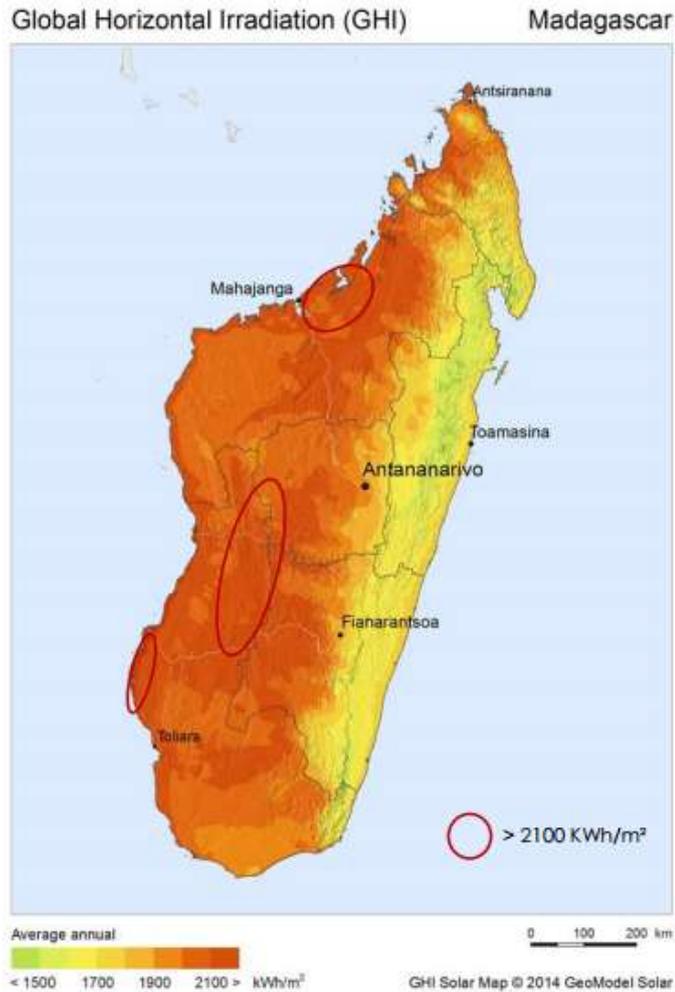


Source : Une introduction à l'énergie renouvelable et les conditions cadres à Madagascar (Atelier GIZ avec les Banques)

Figure III. 3 : Potentiel hydroélectrique de Madagascar

### III.4 L'énergie photovoltaïque à Madagascar

A Madagascar, l'irradiation solaire moyenne annuelle est de 1 500 à 2 100 kWh/m<sup>2</sup> (Figure III.6). Avec 2 000 kWh/m<sup>2</sup>/an, notre île figure parmi les pays riches en potentiel solaire. Toutes les régions du pays bénéficient de 2800 heures d'ensoleillement par an, l'un des plus élevés au monde.



Source : La transition énergétique à Madagascar dans le cadre de la Nouvelle Politique de l'Energie 2015-2030 ; Le Potentiel Solaire.

Figure III. 4 : Irradiation moyenne annuelle de Madagascar

Vue le fort potentiel solaire de Madagascar, de nouveaux projets d'électrification par l'intermédiaire des panneaux photovoltaïques sont en cours d'étude et seront bientôt réalisés<sup>5</sup>.

La figure ci-dessous représente la centrale solaire photovoltaïque d'Andavadoaka dans le District de Morombe ; avec une puissance de 60kWc. Environ 200 ménages, des bureaux d'affaires sociaux,

<sup>5</sup> Source : enquête auprès du Directeur Technique de l'ADER

un hôpital, une société privée et un hôtel bénéficient de l'électricité 24h par jour et 365 jours toute l'année.



Source : EOSOL Madagascar

Figure III. 5 : Centrale solaire d'Andavadoaka (60 kWc)

## **Partie II : METHODOLOGIE**

## Chapitre IV : Modélisation des systèmes photovoltaïques

### IV.1 Les principales caractéristiques d'un module photovoltaïque [22]

#### IV.1.1 Puissance crête

La puissance électrique produite par un module varie en fonction de l'ensoleillement. La puissance crête d'un module est la puissance délivrée sous un éclairement de 1 000 W/m<sup>2</sup> et pour une température de jonction de la cellule de 25°C.

#### IV.1.2 Influence de l'éclairement

Les Figures (IV.1) et (IV.2) présentent un exemple des courbes pour différents niveaux de rayonnement :

La température a été fixée pour différents éclairements.

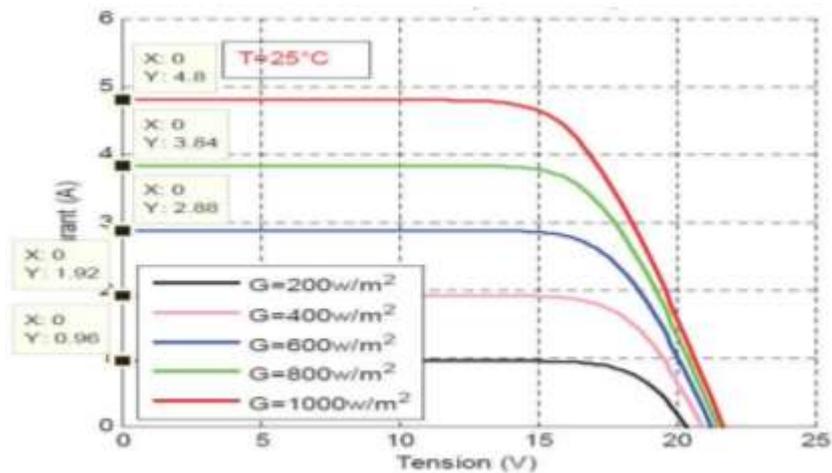


Figure IV. 1 : La caractéristique  $I=f(V)$  en fonction de l'éclairement [25]

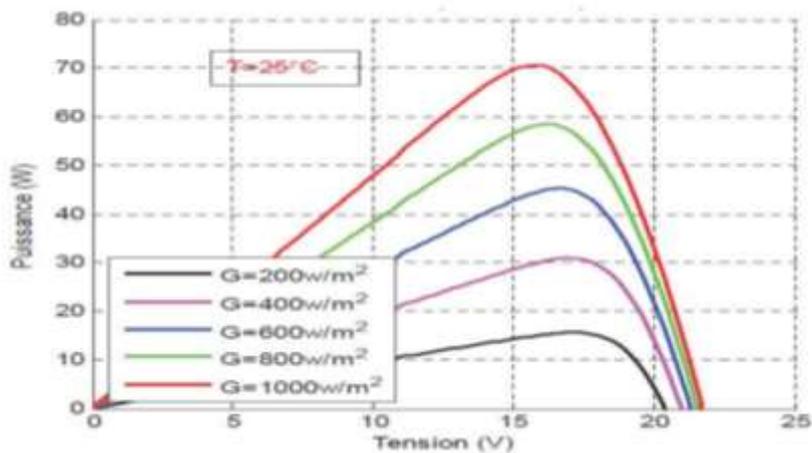


Figure IV. 2 : Caractéristique  $P=f(V)$  en fonction de l'éclairement [25]

Pour la figure (IV.2) on remarque que pour l'éclairement  $G = 1\ 000\ \text{W/m}^2$  le courant  $I_{cc} = 4,8\ \text{A}$  et pour  $G = 800\ \text{W/m}^2$  le courant  $I_{cc} = 3,84\ \text{A}$ . On constate que le courant subit une variation importante ; quand l'éclairement augmente, le courant de court-circuit augmente, mais par contre la tension varie légèrement.

#### IV.1.3 Influence de la température

Les caractéristiques I-V et P-V d'un module photovoltaïque pour un niveau d'ensoleillement  $G$  donné et pour différentes températures sont présentées ci-dessous :

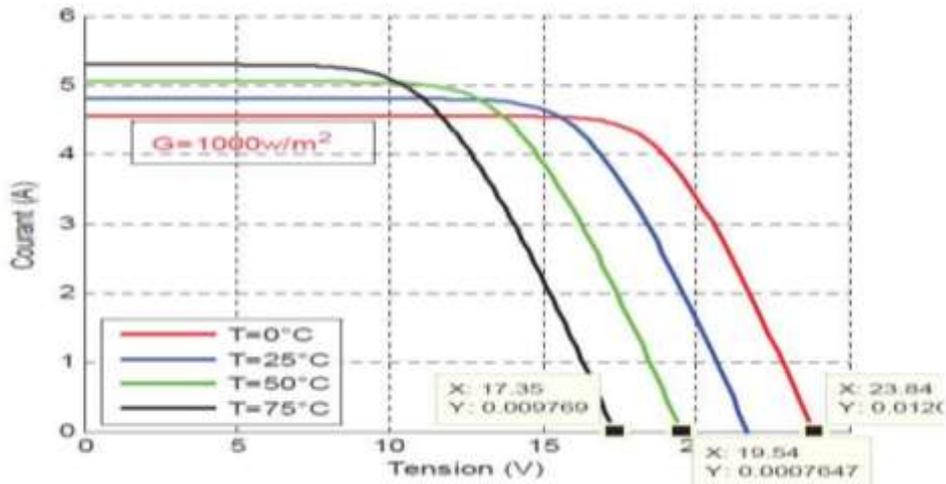


Figure IV. 3 : Caractéristique de  $I = f(V)$  en fonction de la température [25]

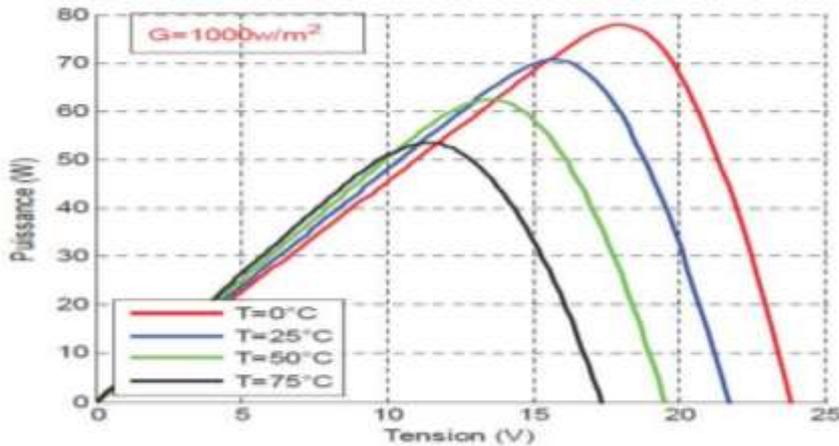


Figure IV. 4 : Caractéristique de  $P = f(V)$  en fonction de la température [25]

Pour la Figure (IV.3) on remarque que le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, on constate que la température influence négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit

ouvert diminue. La puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente (Figure IV.4).

### 1.6.1 Caractéristique courant-tension $I(V)$

Il s'agit d'une caractéristique fondamentale du module solaire type MSX62 d'un nombre de cellule ( $N_s = 36$ ) définissant cet élément comme générateur. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante (Figure IV.5).

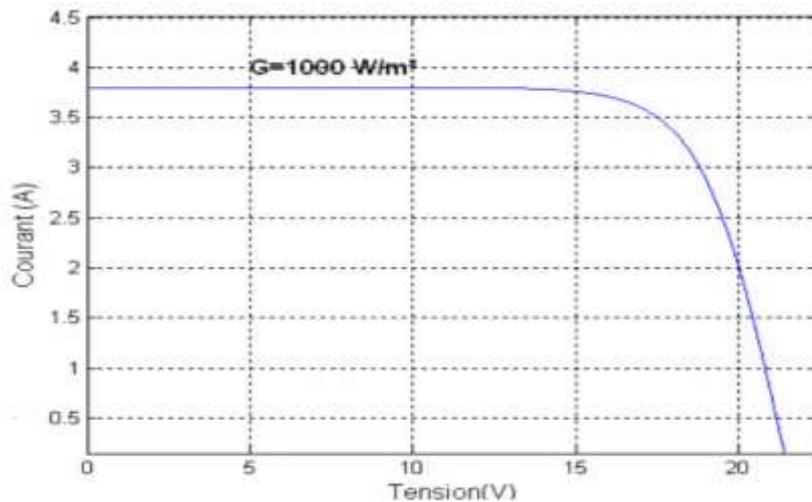


Figure IV. 5 : Caractéristique  $I(V)$  d'un module solaire,  $T = 25^{\circ}\text{C}$  [25]

### IV.1.4 Caractéristique puissance-tension $P(V)$

La puissance débitée par le panneau photovoltaïque dépend du point de fonctionnement de cette dernière ; c'est le produit de l'intensité de courant et de la tension entre ses bornes (Figure IV.6). Le point « M » représente la puissance maximale débitée par le module. Cette puissance maximale appelée Maximum Power Point (MPP) correspond à la valeur maximale du produit  $P = U.I$  pour un éclairement et une température de jonction donnés et sous les conditions de test standard. Ce point correspond à la puissance crête ( $P_c$ ) du panneau.

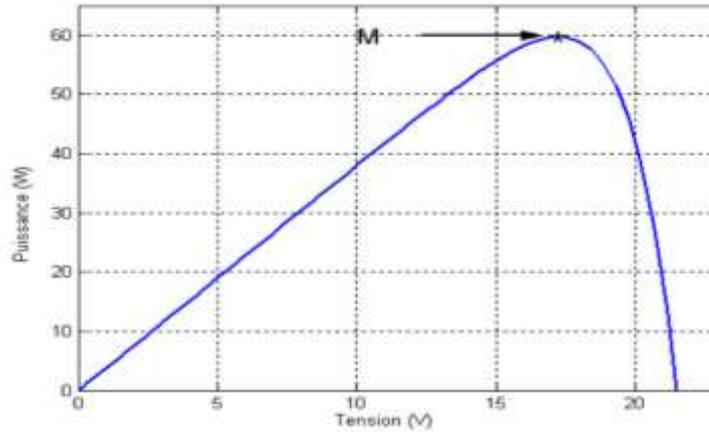


Figure IV. 6 : Caractéristique  $P(V)$  d'un panneau solaire,  $T = 25^{\circ}\text{C}$  [25]

#### IV.1.5 Zones de fonctionnement du module photovoltaïque

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement ; seule la courbe  $I(V)$  est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La Figure IV.7 représente trois zones essentielles :

- La zone I : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant  $I_{cc}$  proportionnel à l'irradiation.
- La zone II : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- La zone III : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

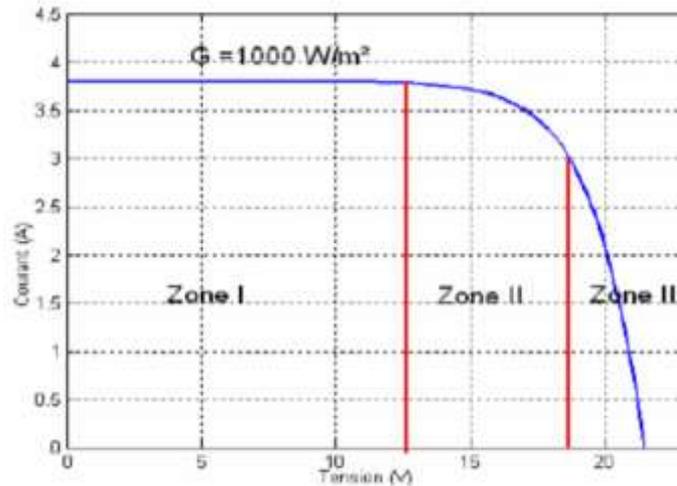


Figure IV. 7 : Les différentes zones de la caractéristique  $I(V)$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$  [25]

### IV.2 Les paramètres photovoltaïques [30]

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique  $I(V)$ .

La Figure IV.8 représente une caractéristique courant-tension  $I(V)$  dans le noir et sous illumination typique d'une cellule photovoltaïque à jonction PN. Le tracé de cette courbe permet d'accéder à bon nombre de paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), la tension à circuit ouvert ( $V_{co}$ ) et le facteur de forme (FF) du composant.

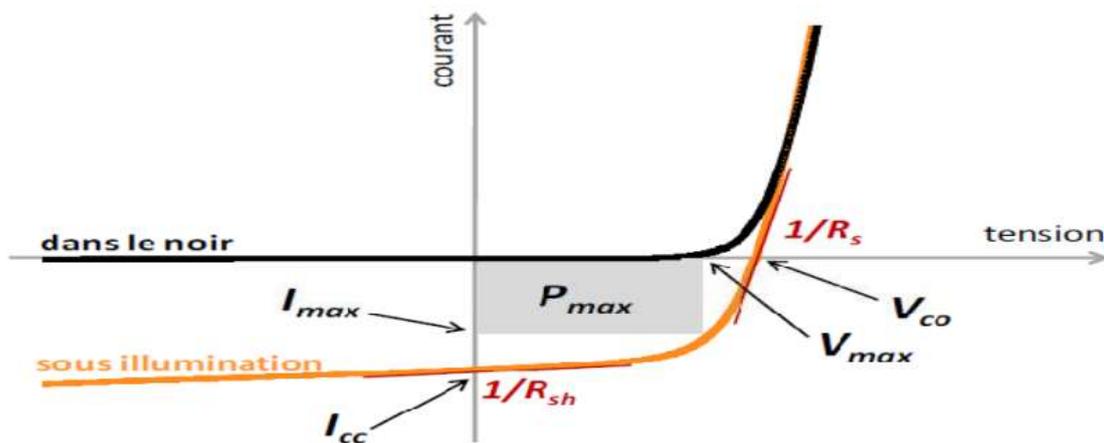


Figure IV. 8 : Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque [25]

#### IV.2.1 Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule et de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.

#### IV.2.2 Tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ )

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de l'éclairement de la cellule. La valeur de la tension de circuit ouvert varie de 18 à 22 V pour un panneau de 12 V.

$$V_{co} = \frac{kT_c}{q} \log\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (IV.1)$$

Avec :

$\frac{kT_c}{q}$  : potentiel thermique

$T_c$  : température absolue

$q$  : constante de charge d'électron,  $q = 1,602 \cdot 10^{-23}$  C

$k$  : constante de Boltzmann,  $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K

$I_{ph}$  : courant photonique

$I_s$  : courant de saturation

Deux régimes peuvent être observées suivant le degré d'éclairement.

➤ Régime des faibles flux lumineux : dans ce cas,  $I_{ph} \ll I_s$ , ce qui permet d'écrire :

$$\log\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) = \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (IV.2)$$

D'où

$$V_{co} \approx \frac{kT_c}{q} \left( \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (IV.3)$$

C'est la zone de comportement linéaire de la cellule. La formule précédente peut s'écrire aussi  $V_{co} = R_0 I_{ph}$  :  $R_0$  est la résistance interne de la diode en polarisation externe nulle (circuit ouvert) et sous faible flux lumineux.

➔ Régime des flux lumineux suffisamment intenses pour que  $I_{ph} \gg I_s$  soit :

$$\frac{I_{ph}}{I_s} \gg 1 \quad (IV.4)$$

D'où

$$V_{co} = \frac{kT_c}{q} \log \left( \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (IV.5)$$

C'est le domaine du comportement logarithmique.

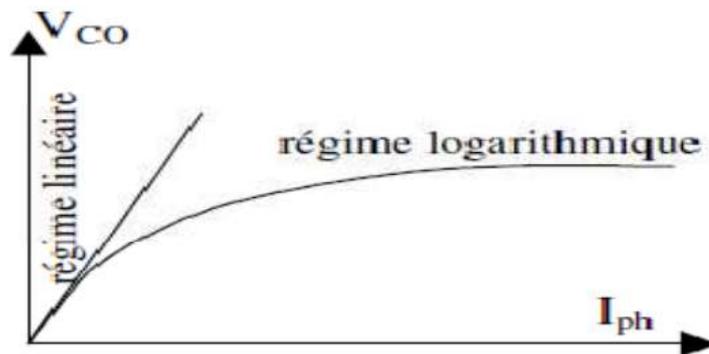


Figure IV. 9 : Différents régimes selon la puissance d'éclairement [25]

Il est important de remarquer que cette tension augmente avec le log de  $I_{ph}$ , donc avec le log de l'illumination. En revanche, elle décroît avec la température, malgré le terme  $\frac{kT_c}{q}$ . En effet, le courant de saturation  $I_s$  dépend de la surface de la diode (donc de la cellule) et des caractéristiques de la jonction : il varie exponentiellement avec la température, ce qui est important dans le dimensionnement des systèmes [40].

#### IV.2.3 Facteur de forme (FF)

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique  $I(V)$  pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur photovoltaïque : c'est le facteur de remplissage ou fill factor

(FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée  $P_{\max}$  et la puissance formée par le rectangle  $I_{cc} \cdot V_{co}$ . Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable ( $P_{\max}$ ) le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (IV.6)$$

#### IV.2.4 Le rendement

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

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \quad (IV.7)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

#### IV.2.5 Le rendement quantique, EQE

Le rendement quantique est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Lorsque les photons perdus par réflexion (à la fenêtre de la cellule) et les photons perdus par transmission à travers toute l'épaisseur de la cellule (à cause de l'absorption incomplète) ne sont pas pris en compte, cette grandeur s'appelle alors le rendement quantique interne, IQE (internal quantum efficiency). Dans le cas contraire, ce paramètre s'appelle le rendement quantique externe, EQE (external quantum efficiency). Le rendement quantique externe est défini comme suit :

$$EQE(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \cdot \frac{E(\lambda)}{e} = \frac{I_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \cdot \frac{h \cdot c}{e \cdot \lambda} \quad (IV.8)$$

Où :

$\varphi(\lambda)$  : flux lumineux incident,

$e$  : charge d'électron,

E : énergie du photon (avec  $E(\lambda) = h.c/\lambda$ , h étant la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et  $\lambda$  la longueur d'onde).

Le rapport  $I_{cc}(\lambda)/\varphi(\lambda)$  est appelé « réponse spectrale » de la cellule, elle est notée  $SR(\lambda)$ . Elle représente la sensibilité de la cellule pour chaque longueur d'onde. On peut donc redéfinir le rendement quantique externe comme suit [27] :

$$EQE(\lambda) = SR(\lambda) \cdot \frac{h.c}{e.\lambda} \quad (IV.9)$$

L'EQE est aussi désigné sous le terme d'IPCE (de l'expression anglaise Incident Photon to Current Efficiency). En remplaçant les trois constantes par leurs valeurs numériques, on obtient :

$$IPCE(\lambda) = 1,24 \frac{I_{cc}}{\varphi(\lambda).\lambda} \quad (IV.10)$$

### IV.3 La jonction PN utilisée comme capteur

Une jonction PN est formée quand les semi-conducteurs de type N et de type P sont placés en contact. Dans un tel dispositif, certains des électrons de conduction excessifs dans le matériau émigrent rapidement au matériau de type p pour combler les trous de valence. Ceci provoque un champ électrique fort et permanent à proximité de la jonction, comme le montre la figure ci-dessous.

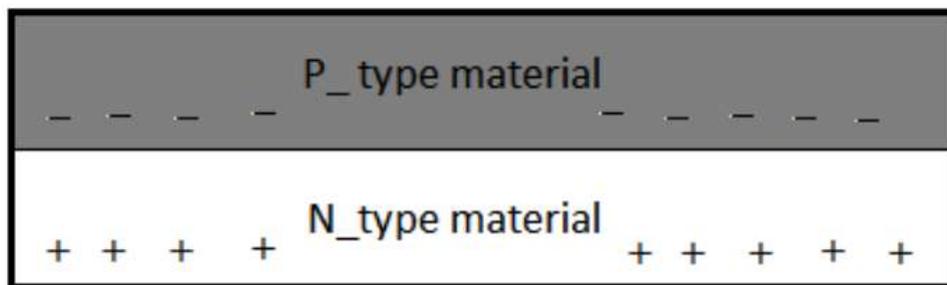


Figure IV. 10 : Jonction P-N [22]

En polarisant électriquement une jonction PN classique à base de Silicium, on obtient la caractéristique statique représentée en figure (IV.10).

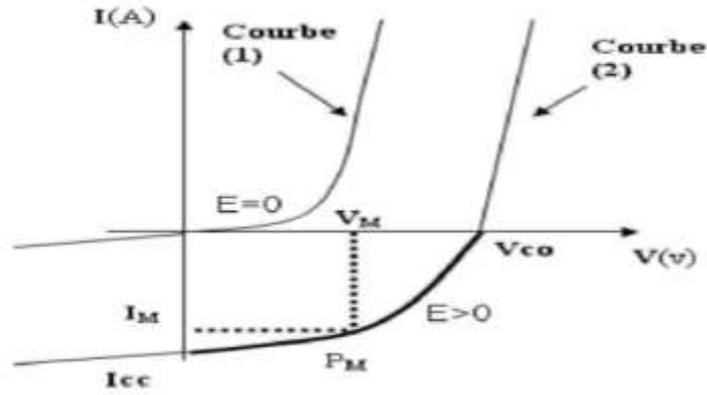


Figure IV. 11 : Caractéristique I(V) d'une jonction PN [22]

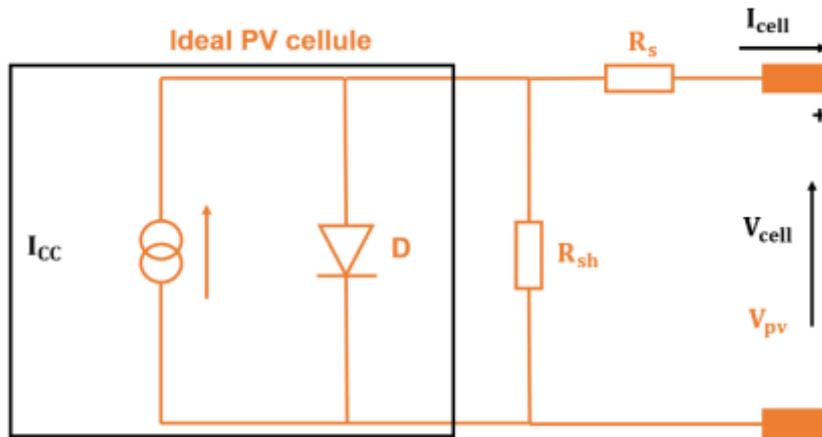


Figure IV. 12 : Schéma électrique équivalent d'une jonction PN [22]

Ce comportement statique peut être décrit par l'équation électrique suivante :

$$I_D = I_0 \left( \exp\left(\frac{q.V}{\lambda.k.T}\right) - 1 \right) \quad (IV.11)$$

Où :

$I_0$  : courant de saturation,

$k$  : constante de Boltzmann ( $1,381 \cdot 10^{-23}$  J/K),

$T$  : température effective des cellules (en Kelvin),

$q$  : charge de l'électron,

$\lambda$  : facteur de qualité de la jonction.

Sous polarisation directe, la barrière de potentiel est abaissée et le courant de porteurs peut se développer.

Sous polarisation inverse, seul un courant de porteurs minoritaires (courant de saturation) circule, cependant, il varie peu avec la tension appliquée, tant que cette tension est inférieure à la tension de claquage. Il faut noter que ces courants directs ou inverses comme pour des jonctions classiques sont sensibles à la température de jonction.

Si cette jonction PN est soumise au rayonnement solaire, alors il se produit l'effet photovoltaïque. Ainsi, le flux lumineux crée des paires électron-trous supplémentaires dans le matériau à la condition que leurs énergies soient supérieures ou égales à la bande interdite  $E_g$ . La différence de potentiel ainsi créée aux bornes de la structure, caractérise l'effet photovoltaïque et se situe selon les matériaux et la structure de la jonction entre 0,3 et 0,7 V.

Comme nous pouvons le voir sur les caractéristiques :

Si  $V < 0$ , la jonction se comporte en photorécepteur,

Si  $V > 0$ , la jonction fonctionne comme un générateur avec un courant de court-circuit  $I_{cc}$  proportionnel à l'éclairement.

Si la cellule photovoltaïque est connectée à une charge, l'électron de la bande de conduction sera repoussé par le photon incident du côté de type p de la cellule photovoltaïque. Sa circulation à travers le circuit produit un courant dans la charge comme montre la Figure IV.13.

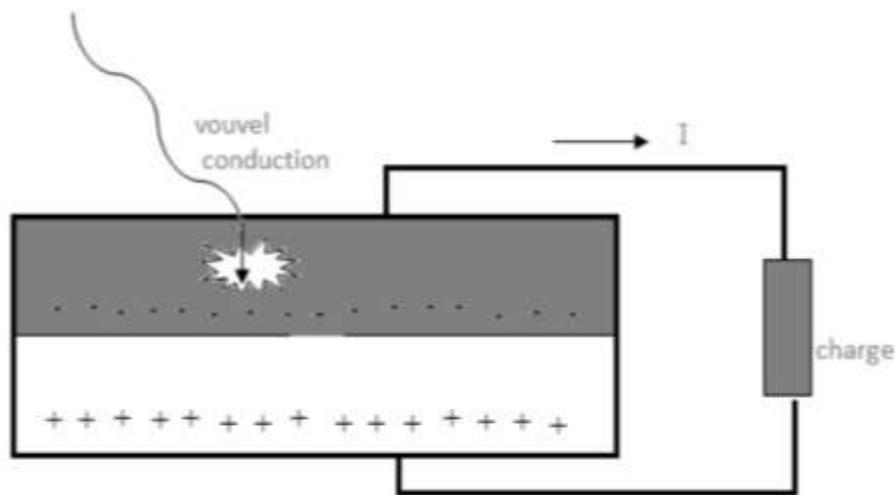
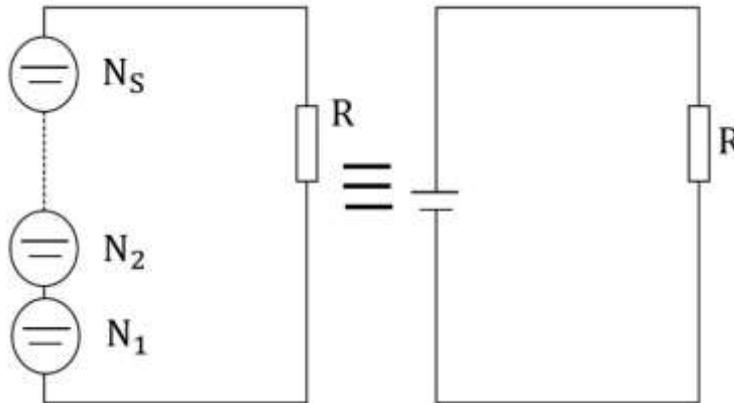


Figure IV. 13 : L'effet photovoltaïque la lumière incidente se déplace [22]

## IV.4 Liaison des cellules photovoltaïques

### IV.4.1 Groupement en série

Dans un groupement en série (Figure IV.14), les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné. La Figure IV.15 montre la caractéristique résultante ( $I_s$ ,  $V_s$ ) obtenue par l'association en série (indice s) de  $N_s$  cellules identiques ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ).



Source : Auteur

Figure IV. 14 : Association de  $N_s$  modules solaires en série

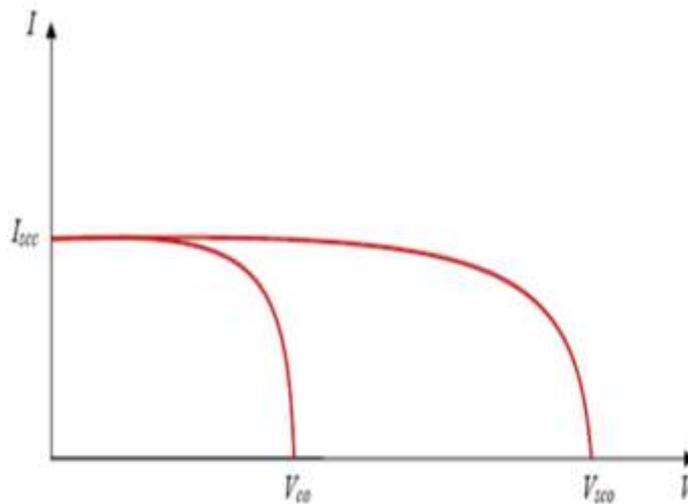


Figure IV. 15 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de  $N_s$  cellules identiques [22]

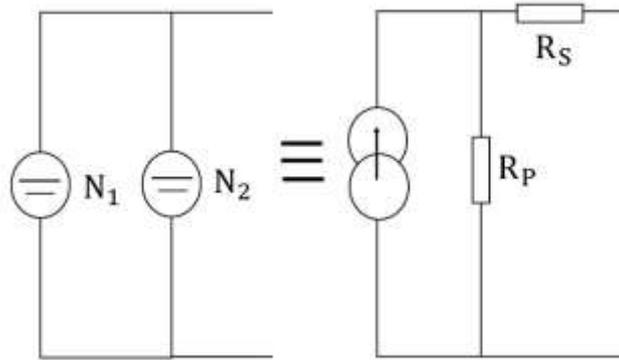
Avec :

$I_{scc} = I_{cc}$  : courant de court-circuit,

$V_{sco} = N_s V_{co}$  : tension de circuit ouvert.

IV.4.2 Groupement en parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle (Figure IV.16), les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent. La caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée. La Figure IV.17 montre la caractéristique résultante ( $I_{pcc}$ ,  $V_{pco}$ ) obtenue en associant en parallèle (indice p)  $N_p$  cellules identiques ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ).



Source : Auteur

Figure IV. 16 : Association des modules en parallèle

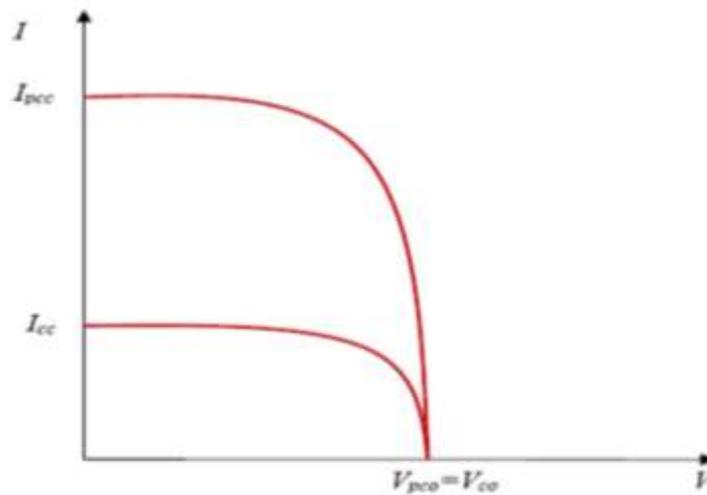


Figure IV. 17 : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de  $N_p$  cellules identiques [22]

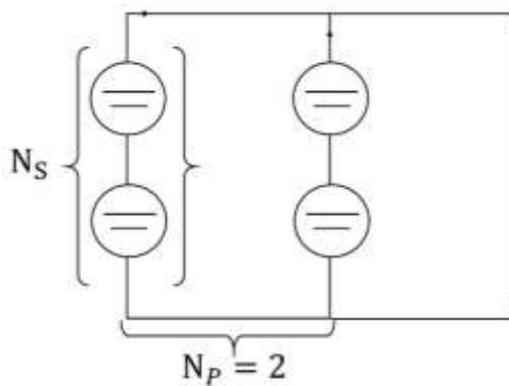
Avec :

$I_{pc} = N_p I_{cc}$  : courant de court-circuit,

$V_{pco} = V_{co}$  : tension de circuit ouvert.

IV.4.3 Groupement mixte (série-parallèle)

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques (Figure IV.18). La caractéristique électrique globale courant/tension du générateur photovoltaïque se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport  $n_s$  parallèlement à l'axe des tensions et de rapport  $N_p$  parallèlement à l'axe des courants, ainsi que l'illustre la Figure IV.19,  $N_s$  et  $N_p$  étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et en parallèle.



Source : Auteur

Figure IV. 18 : Association mixte des modules

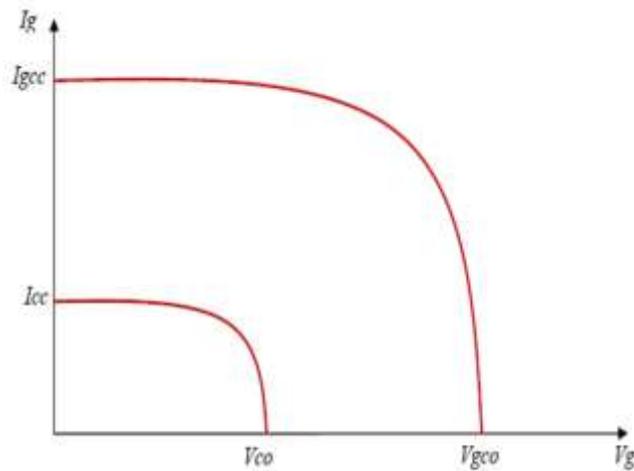


Figure IV. 19 : Caractéristique résultante d'un groupement mixte [22]

Avec :

$I_{gcc} = N_p I_{cc}$  : courant de court-circuit du module résultant,

$V_{gco} = N_s V_{co}$  : tension de circuit ouvert du module résultant.

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

La puissance disponible en sortie d'un générateur photovoltaïque constitué de  $N_s$  cellules en série constituant elles-mêmes des branches de  $N_p$  cellules en parallèle est donnée par :

$$P_{pv} = N_s \cdot V_{pv} \cdot N_p \cdot I_{pv} \quad (IV.12)$$

Avec :

$P_{pv}$  : la puissance disponible en sortie du GPV (générateur photovoltaïque),

$V_{pv}$  : la tension à la sortie du GPV,

$I_{pv}$  : le courant de sortie du GPV.

### IV.5 Modélisation des cellules photovoltaïques [11]

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents.

Afin de développer un circuit équivalent précis pour une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément, en prenant plus ou moins de détails. Selon cette philosophie, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque.

On présentera deux modèles du générateur photovoltaïque, à savoir :

- Modèle à une diode (ou exponentielle simple),
- Modèle à deux diodes (ou double exponentielle).

Les deux modèles sont basés sur l'équation de diode bien connue de Shockley.

Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque seront décrites comme suit :

- Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) qui fournit chaque cellule est :

$$I_{cc(cellule)} = \frac{I_{cc}}{N_p} \quad (IV.13)$$

- La tension du circuit ouvert ( $V_{co}$ ) de chaque cellule est :

$$V_{co(cellule)} = \frac{V_{co}}{N_s} \quad (IV.14)$$

- Le courant maximal de chaque cellule est :

$$I_{mp(cellule)} = \frac{I_{mp}}{N_p} \quad (IV.15)$$

- La tension maximale de chaque cellule est :

$$V_{mp(cellule)} = \frac{V_{mp}}{N_s} \quad (IV.16)$$

- La puissance maximale de chaque cellule est :

$$P_{max(cellule)} = I_{mp(cellule)} \cdot V_{mp(cellule)} \quad (IV.17)$$

- La résistance série de chaque cellule est :

$$R_{s(cellule)} = \frac{N_p}{N_s} \cdot R_{s(module)} \quad (IV.18)$$

- La résistance shunt de chaque cellule est :

$$R_{sh(cellule)} = \frac{N_p}{N_s} \cdot R_{sh(module)} \quad (IV.19)$$

#### *IV.5.1 Modèle à deux diodes [24]*

##### **a) Modèle à sept paramètres (2M7P)**

Le modèle à sept paramètres est aussi connu par le nom 2M7P (Lumped, 2 Mechanism model with 7 Parameters). Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent ci-dessous (Figure IV.20). Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation  $I_{s1}$  et  $I_{s2}$ ; les facteurs de diode  $n_1$  et  $n_2$ ; une source de courant produisant un photo-courant  $I_{ph}$  qui dépend de l'éclairement solaire.

La résistance série  $R_s$  rend compte de la résistivité du matériau, de celle des électrodes et du contact semi-conducteur-Métal. Sa valeur est déterminée par l'inverse de la pente de la caractéristique  $I(V)$  pour une tension  $V$  égale à  $V_{co}$ . Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ceci peut être réalisé en optimisant le contact métal/semi-conducteur, et en diminuant la résistivité du matériau utilisé. Cependant, un dopage trop élevé entraîne une augmentation de la recombinaison des porteurs.

La résistance parallèle (shunt) ou de court-circuit  $R_{sh}$  traduit quant à elle, la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible.

Le modèle à deux diodes est représenté par une équation implicite du courant qui ne peut être résolue qu'à l'aide de méthodes itératives.

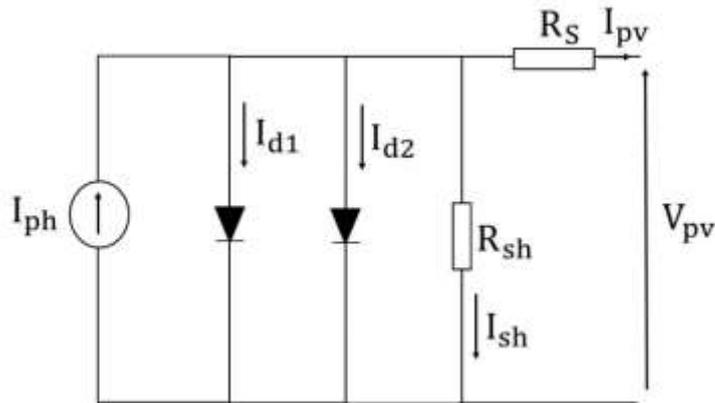


Figure IV. 20 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M7P

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (IV.20)$$

Avec :

$I_{ph}$  : courant photonique,

$I_{d1}$  : courant traversant la diode 1,

$I_{d2}$  : courant traversant la diode 2.

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_{d1} = I_{s1} \left( \exp \left( \frac{V_d}{n_1 \cdot V_t} \right) - 1 \right) \quad (IV.21)$$

$$I_{d2} = I_{s2} \left( \exp \left( \frac{V_d}{n_2 \cdot V_t} \right) - 1 \right) \quad (IV.22)$$

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (IV.23)$$

Avec :

$$V_t = \frac{KT_c}{q} : \text{potentiel thermodynamique,}$$

$T_c$  : température absolue,

$q$  : constante de charge d'électron,  $1,602 \cdot 10^{-23}$  C,

$K$  : constante de Boltzmann,  $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/k,

$I_{sh}$  : courant de la résistance shunt.

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante [21] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left( \exp \left( \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{V_t \cdot n_1} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left( \exp \left( \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{V_t \cdot n_2} \right) - 1 \right) - \left( \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \right) \quad (IV.24)$$

Le courant photonique lié à l'éclairement, à la température et au courant photonique mesuré aux conditions de référence est donné par [23] :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} \left( I_{ph\_ref} - \mu_{cc} (T_c - T_{c\_ref}) \right) \quad (IV.25)$$

Avec :

$I_{ph\_ref}$  : courant photonique sous condition de référence [A],

$\mu_{cc}$  : coefficient de sensibilité de l'intensité à la température [A/K],

$G, G_{ref}$  : éclairement réel et à la condition de référence [ $W/m^2$ ],

$T_c, T_{c\_ref}$  : température de la cellule réelle et à la condition de référence

Les courants de saturation  $I_{s1}$  et  $I_{s2}$  sont donnés par les relations suivantes :

$$I_{s1} = C_{s1} \cdot T_c^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_{gap} \cdot q}{n_1 \cdot T \cdot K}\right) \quad (IV.26)$$

$$I_{s2} = C_{s2} \cdot T_c^{3/2} \cdot \exp\left(\frac{-E_{gap} \cdot q}{n_2 \cdot T \cdot K}\right) \quad (IV.27)$$

Les constantes  $C_{s1}$  et  $C_{s2}$  sont généralement comprises respectivement entre 150 et 180 A.K<sup>-3</sup> et 1,3 à 1,7.10<sup>-2</sup> A.K<sup>-5/2</sup> pour une cellule de 100 cm<sup>2</sup>.

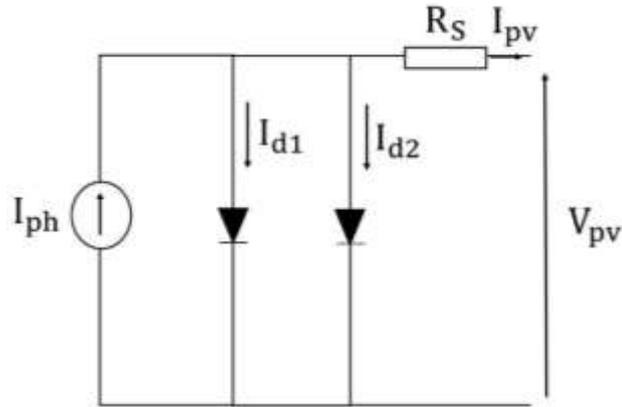
Une valeur du facteur d'idéalité  $n$  différent de l'unité est associée à un mécanisme de recombinaison prédominant et elle dépend de la nature et de la position des niveaux pièges.

- $n = 1$  : la zone de charge d'espace est dépeuplée (cas idéal),
- $1 < n < 2$  : le niveau piège est peu profond dans la zone de charge d'espace et  $n$  dépend de la polarisation [28],
- $n = 2$  : les centres de recombinaison sont distribués uniformément dans la zone de charge d'espace et sur un seul niveau au milieu de la bande interdite.
- $2 < n < 4$  : les centres de recombinaison sont distribués de façon non uniforme avec une densité réduite au centre de la zone de charge d'espace par rapport à la surface.

$E_{gap}$  : énergie de gap (Silicium cristallin = 1.12 eV, Silicium amorphe = 1,7 eV).

#### **b) Modèle à six paramètres (2M6P)**

Si la résistance shunt est considéré infinie ( $R_{sh} = \infty$ ), le nombre de paramètres à déterminer devient 6 et le nom du modèle dans ce cas est 2M6P (Lumped, 2 Mechanism model with 6 Parameters). Cette simplification est justifiée par le fait que la résistance shunt est d'habitude beaucoup plus grande que les autres résistances donc le courant qui la traverse est négligeable. Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation  $I_{s1}$  et  $I_{s2}$ , les facteurs de diode  $n_1$  et  $n_2$ , une source de courant produisant un photo-courant  $I_{ph}$  (équation IV.28) qui dépend de l'éclairement solaire et de la résistance série  $R_s$ .



Source : Auteur

Figure IV. 21 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M6P

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff [34] :

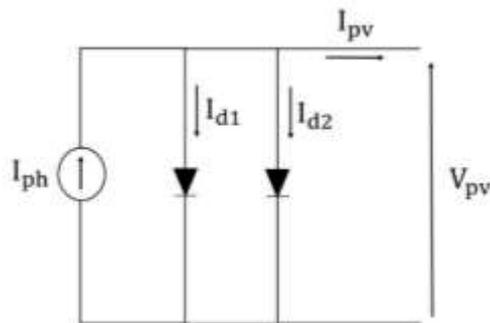
$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} \quad (IV.28)$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left( \exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{V_t \cdot n_1}\right) - 1 \right) - I_{s2} \left( \exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{V_t \cdot n_2}\right) - 1 \right) \quad (IV.29)$$

**c) Modèle à cinq paramètres (2M5P)**

Le circuit équivalent de ce modèle est obtenu en utilisant une simplification au circuit du modèle à six paramètres représentés sur la figure (IV.21) et le nom du modèle dans ce cas est 2M5P (Lumped, 2 Mechanism model with 5 Parameters). Cette simplification se traduit à supposer que la résistance shunt est infinie et la résistance série est nulle. Le circuit équivalent sera représenté comme suit :



Source : Auteur

Figure IV. 22 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M5P

Ce modèle consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation  $I_{s1}$  et  $I_{s2}$ , les facteurs de diode  $n_1$  et  $n_2$ , une source de courant produisant un photo-courant  $I_{ph}$  (équation IV.31) qui dépend de l'éclairement solaire et de la température.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} \quad (IV.30)$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left( \exp\left(\frac{V_{pv}}{V_t \cdot n_1}\right) - 1 \right) - I_{s2} \left( \exp\left(\frac{V_{pv}}{V_t \cdot n_2}\right) - 1 \right) \quad (IV.31)$$

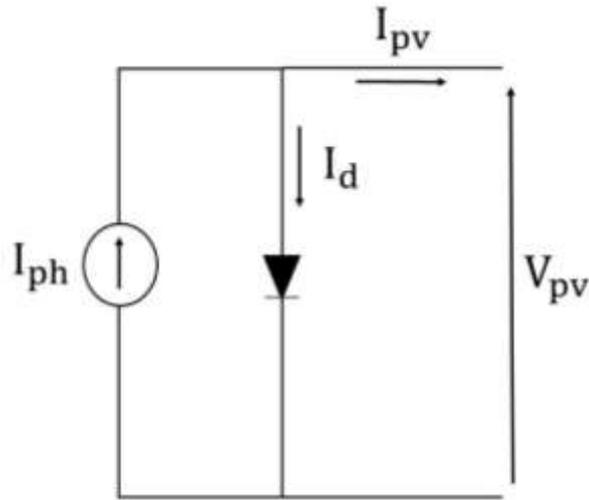
#### IV.5.2 Modèle à une diode

Le fonctionnement d'un modèle photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode établie par Shocky pour une seule cellule photovoltaïque. Il est généralisé à un module photovoltaïque en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle.

Une description plus simple est obtenue à partir du modèle à une exponentielle. Ce modèle comporte une diode de moins par rapport au modèle à deux exponentielles, ce qui implique que ce modèle comporte dans l'équation de la caractéristique courant-tension une exponentielle de moins [8] [37].

##### a) Modèle à trois paramètres (L3P)

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition P-N de la cellule photovoltaïque. Il est connu aussi sous le nom L3P (Lumped, 1 Mechanism model with 3 Parameters). Pour un générateur photovoltaïque idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode.



Source : Auteur

Figure IV. 23 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L3P

Dans le cas de cellules solaires au silicium monocristallin, on considère l'hypothèse d'une cellule idéale. Le facteur d'idéalité est alors considéré comme égal à l'unité.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (IV.32)$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation [36] :

$$I_d = I_s \left( \exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (IV.33)$$

Le courant débité équivaut à :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{V_{pv}}{V_t \cdot n}\right) - 1 \right) \quad (IV.34)$$

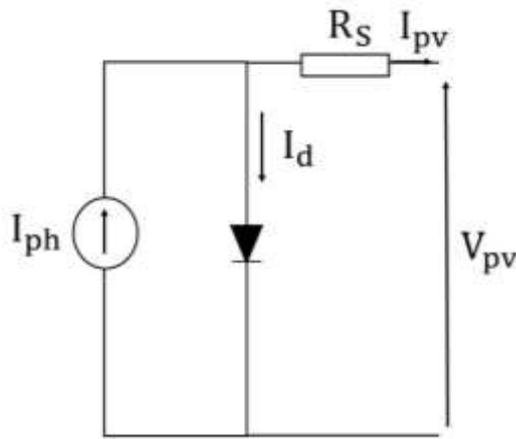
Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression [32] :

$$I_s = I_{s\_ref} \cdot \left( \frac{T_c}{T_{c\_ref}} \right)^3 \exp\left( \left( \frac{q \cdot E_{gap}}{n \cdot K} \right) \left( \frac{1}{T_{c\_ref}} \right) - \left( \frac{1}{T_c} \right) \right) \quad (IV.35)$$

**b) Modèle à quatre paramètres (L4P)**

Le modèle à quatre paramètres est un modèle largement utilisé ; il a été étudié par Townsend [19]. Ce modèle traite la cellule photovoltaïque comme une source de courant, dépendante de l'éclairement, connectée en parallèle avec une diode et en série avec une résistance série  $R_s$ .

Les quatre paramètres apparaissent dans l'équation de la caractéristique I-V sont le courant photonique  $I_{ph}$ , la résistance série  $R_s$  et deux caractéristiques de la diode,  $I_s$  et  $n$ . Ces paramètres ne sont pas des quantités mesurables et ne sont pas généralement inclus dans les données des fabricants. Par conséquent, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations I(V) pour différents points de fonctionnement (donnés par les fabricants) [7].



Source : Auteur

Figure IV. 24 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L4P

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left( \exp \left( \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{V_t \cdot n} \right) - 1 \right) \quad (IV.36)$$

## Chapitre V : Analyse socio-économique et besoins énergétiques

### V.1 Analyse socio-économique

L'analyse socio-économique est nécessaire pour un projet d'électrification rurale. En effet, il faut connaître la situation économique ainsi que l'enthousiasme des habitants d'un lieu donné avant d'y entreprendre un tel projet.

Dans le cadre de cette étude, nous avons effectué une descente sur les lieux et effectué des enquêtes<sup>6</sup> auprès de l'autorité locale (Maire de la Commune), des institutions publiques existantes (écoles, églises), des usagers productifs<sup>7</sup> ainsi qu'auprès des ménages.

Les informations obtenues auprès de l'autorité sont les données démographiques et la situation énergétique actuelle des habitants de la Commune.

Auprès des institutions publiques, des usagers productifs et des ménages les questions sont notamment sur leurs besoins énergétiques ainsi que leur capacité à payer dans le cas d'une instauration d'un service électrique.

#### V.1.1 Les sources de revenus de la population

Généralement dans le milieu rural à Madagascar, la majorité de la population travaille dans le secteur de l'agriculture et de l'élevage ou secteur primaire. Dans ce secteur d'activité, on distingue deux saisons principales :

- La haute saison ou période de récolte : période de l'année où l'ensemble de la population en général possède de l'argent sous forme de récolte, de bétails ou encore de volailles<sup>8</sup>. La population possède de l'argent durant cette période car ils vendent leurs récoltes, elle est donc liée au calendrier culturel de récolte.
- La basse saison ou période de soudure : période de l'année où presque la totalité de la population a une difficulté à survivre, surtout les plus pauvres. En général, c'est la période de semence. Il s'agit de la période inverse du calendrier culturel de récolte.

---

<sup>6</sup> Les enquêtes ne sont pas exhaustives, on en a effectué pour chaque type de consommateur

<sup>7</sup> Le terme « usager productif » désigne les utilisateurs susceptibles de consommer beaucoup plus d'énergie électrique qu'un ménage ordinaire (par exemple : les grossistes, les projecteurs de vidéos ou encore les décortiqueries, etc ...)

<sup>8</sup> Généralement les habitants ne font pas d'épargne et ne gardent pas d'argent cash chez eux, ils investissent dans l'élevage (source d'argent en cas de problème)

Les enquêtes ont permis d'obtenir les mois correspondants à ces deux saisons dans l'année et l'enquête effectuée auprès des ménages a permis d'obtenir les revenus moyens d'un ménage pour chacune des deux saisons.

### V.1.2 Segmentation des ménages

D'après les constats sur terrains et les données récoltées auprès des ménages, des caractéristiques spécifiques ont été établies pour segmenter les ménages dans la région Bongolava. On distingue trois segments, le tableau ci-après montre les caractéristiques de chacun des segments.

Tableau V. 1 : Caractéristiques des segments de ménage

Type de segment	Activités Génératrices de revenu pratiquées	Revenus moyens en période de soudure
<b>Segment 1</b>	Agriculture Petit élevage : volailles Salarial agricole	Inférieur à 110 000 Ar
<b>Segment 2</b>	Agriculture Elevage : bétails, porcs, ... Commerce : épicerie de quartier, gargote Activités génératrices de revenus régulières durant toute l'année : menuiserie sans machine, friperie, artisanat Location de bétails et de charrette	Entre 110 000 Ar et 210 000 Ar
<b>Segment 3</b>	Agriculture : possession de terrain avec une surface étendue Elevage : bétails, porcs, volailles Activités avec rémunération fixe mensuelle : fonctionnaire, professeur, agent technique local, médecin, etc... Grand commerce : épi-bar Activités importantes : hôtellerie, grossistes, machineries, collecte de produits agricoles	Supérieur à 210 000 Ar

## V.2 Besoins énergétiques

### V.2.1 Evaluation de la consommation énergétique

Pour qu'un système photovoltaïque fonctionne correctement l'énergie produite par le générateur solaire doit être en équilibre avec l'énergie consommée par l'utilisateur. Les pics de charges ponctuels sur la courbe de charge annuelle ne doivent pas être pris pour baser le dimensionnement car on risque de surdimensionner le système.

Il faut toujours veiller à ce que l'énergie produite par jour par un générateur soit supérieure ou égale aux besoins en énergie de l'utilisateur. Les besoins énergétiques des utilisateurs doivent alors être définis précisément pour dimensionner correctement le générateur.

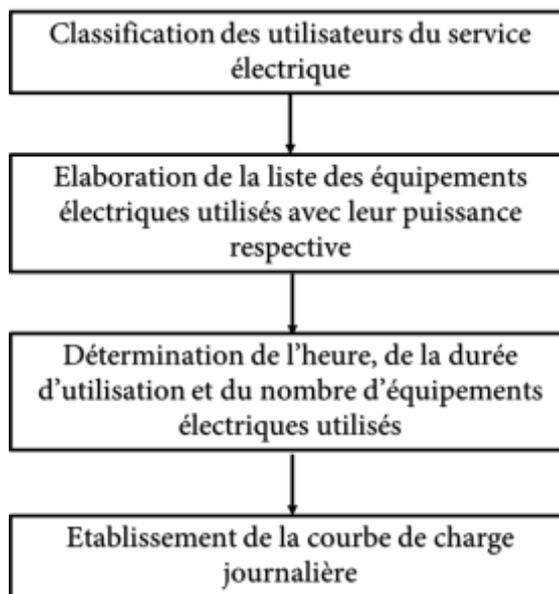
L'énergie réellement consommée par l'utilisateur doit toujours être inférieure ou égale à l'énergie réellement produite par le générateur. Ainsi, l'utilisateur est tenu de respecter la consommation d'énergie évaluée lors de la définition des besoins.

La consommation énergétique journalière représente la somme des quantités d'électricité consommées par les appareils électriques utilisés durant une journée. Il s'agit de la quantité d'énergie que le système doit délivrer à l'application pour tous les appareils fonctionnant normalement quelles que soient les conditions existantes. La consommation énergétique peut être évaluée en [kWh/j] ou en [Ah/j].

Afin de déterminer les besoins énergétiques de la Commune, les utilisateurs du service électrique ont été classés en trois catégories :

- Les ménages,
- Les institutions publiques et
- Les usagers productifs

Après avoir classifié les utilisateurs, une liste d'équipements électriques utilisés par chaque catégorie avec leur puissance respective est élaborée. On détermine ensuite la durée d'utilisation et le nombre d'équipements électriques utilisés et la courbe de charge journalière est finalement établie en effectuant la somme horaire des puissances de pointes de chaque catégorie d'utilisateur. La figure ci-après illustre les étapes pour la détermination des besoins énergétiques.



Source : Auteur

Figure V. 1 : Etapes de détermination des besoins énergétiques

Soit « i » le type d'équipement utilisé ( $1 \leq i \leq n$ ) et « j » le type d'abonné qui utilise l'équipement. La consommation d'énergie totale est obtenue par la formule :

$$E_{ij} = \sum_i^n k_{ij} \cdot n_{ij} \cdot h_{ij} \cdot P_{ij} \cdot n_j \cdot k_j \quad (V.1)$$

Avec :

$E_{ij}$  : énergie journalière consommée par l'équipement i par l'abonné j [kWh/j]

$n_{ij}$  : nombre de l'équipement i utilisé par l'abonné j

$h_{ij}$  : heures d'utilisation de l'équipement i par l'abonné j [h]

$P_{ij}$  : puissance de l'équipement i [kW]

$k_{ij}$  : coefficient de simultanéité ou de foisonnement qui est en fonction du nombre des équipements i identiques<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> Les récepteurs ne fonctionnent pas tous simultanément. Il est alors permis d'appliquer aux différents ensembles d'équipements des facteurs de simultanéité lorsque ce n'est pas assuré qu'ils fonctionnent en même temps.

$n_j$  : nombre d'abonnés j utilisant l'équipement i

$k_j$  : coefficient de simultanéité qui est en fonction du nombre d'abonnés j

Tableau V. 2 : Coefficient de simultanéité en fonction du nombre d'équipements (source : Cours « électrification rurale GE L3 »)

Nombre d'équipements ou d'abonnés	2	3	4-5	6-7	8-10	11-15	16-20	21-30	31-50	51-150	>150
Coefficient $k_{ij}$ ou $k_j$	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35

La consommation journalière totale est donnée par la formule suivante :

$$E_t = \sum_j^m \sum_i^n E_{ij} \quad (V.2)$$

Avec :

$E_t$  : consommation journalière totale [kWh/j]

$E_{ij}$  : consommation journalière de l'équipement i utilisée par l'utilisateur j

### V.2.2 Consommation énergétique envisagée à l'année m

La consommation énergétique varie selon les années de production et le taux de d'augmentation des utilisateurs et des appareils qu'ils utilisent. Ainsi, la consommation énergétique au  $m^{\text{ième}}$  année est :

$$E_m = E_1(1 + \tau_i)^{m-1} \quad (V.3)$$

Avec :

$E_m$  : consommation énergétique à l'année m

$\tau_i$  : taux de croissance des usagers<sup>10</sup>

$E_1$  : consommation énergétique à la première année

---

<sup>10</sup> Taux qui dépend de chaque catégorie d'utilisateurs

## Chapitre VI : Dimensionnement d'une centrale solaire photovoltaïque

### VI.1 Puissance et tension du système

#### VI.1.1 Puissance totale du système

Par définition, la puissance du système est la somme de toutes les consommations électriques de toutes les applications.

$$P_t = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n k_{ij1} \cdot n_{ij} \cdot P_{ij} \cdot k_{ij2} \quad (\text{VI.1})$$

Avec :

$P_{ij}$  : puissance de l'équipement  $i$  utilisé par l'abonné  $j$  [kW]

$n_{ij}$  : nombre d'équipements  $i$  utilisés par l'abonné  $j$

$k_{ij1}$  : coefficient de simultanéité qui est en fonction du nombre d'équipements  $i$  identiques utilisés par l'utilisateur  $j$

$k_{ij2}$  : coefficient de simultanéité qui est en fonction du nombre d'abonnés qui utilisent l'équipement  $i$

#### VI.1.2 Puissance de pointe journalière

On entend par puissance de pointe journalière la puissance maximale durant les heures de pointe<sup>11</sup>.

$$P_p = \max(P_h)_{00 \leq h \leq 23} \quad (\text{VI.2})$$

Avec :

$P_p$  : puissance de pointe journalière [kW]

$P_h$  : puissance consommée à l'heure  $h$  [kW/h]

$h$  : durée de fonctionnement de l'appareil par jour [h]

#### VI.1.3 Choix de la tension

La valeur de la tension du générateur photovoltaïque est déterminée en fonction de la puissance totale du système. Les tensions standards sont : 12, 24 et 48 [V] pour les petits systèmes.

---

<sup>11</sup> Heures durant lesquelles la demande énergétique est la plus élevée.

Le tableau suivant donne les plages de puissance du système avec les tensions recommandées. Les valeurs de la tension dans ce tableau ne sont applicables que pour les mini-systèmes photovoltaïques.

Pour les grands systèmes (une puissance dans l'ordre des centaines de kWc), les tensions du système varient d'une installation à une autre selon la tension d'entrée des onduleurs utilisés.

Tableau VI. 1 : Tension recommandée en fonction de la puissance totale d'un mini-système photovoltaïque

Puissance totale du système [W]	0 – 200	200 - 1000	≥ 1000
Tension recommandée pour le système [V]	12	24	48

### VI.2 Dimensionnement des différents composants

La figure ci-dessous représente le schéma des éléments constitutifs de la centrale solaire photovoltaïque :

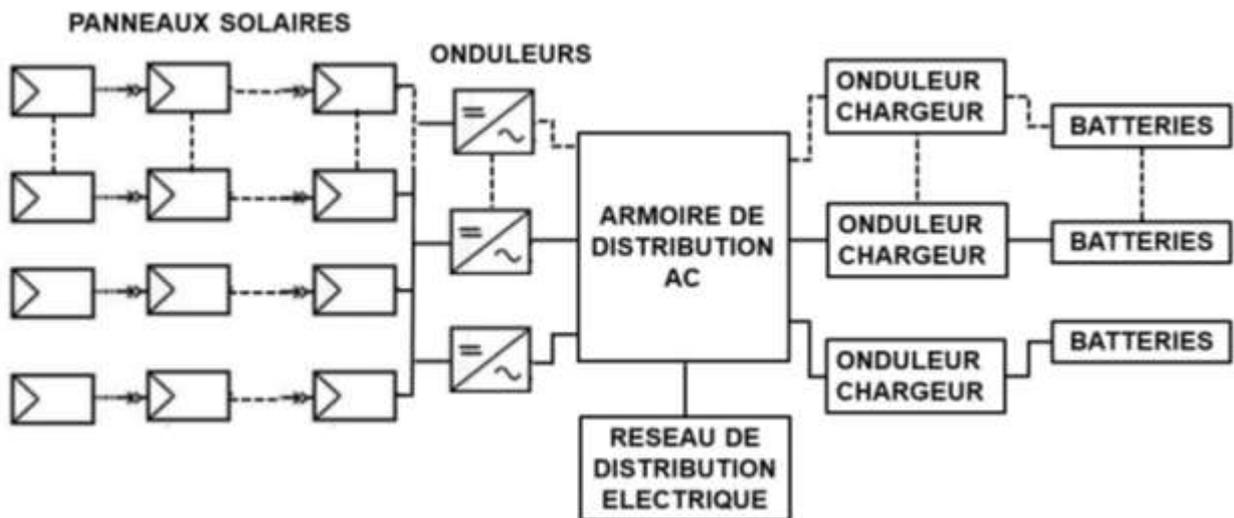


Figure VI. 1 : Eléments constitutifs d'une centrale solaire photovoltaïque

#### VI.2.1 Dimensionnement des panneaux photovoltaïques

##### a) Evaluation de la puissance crête de l'ensemble des panneaux photovoltaïques

Par définition, la puissance crête d'un panneau est la puissance maximale qu'il délivre sous les conditions standards (rayonnement solaire de 1000 W/m<sup>2</sup>, température ambiante 25°C). Elle est évaluée en watt crête et elle est déterminée par l'équation suivante :

$$P_c = \frac{E_t \cdot P_r}{k_p \cdot E_i} \quad (VI.3)$$

Avec :

$P_c$  : puissance crête de l'installation [kWc]

$E_t$  : consommation énergétique journalière en [kWh/j]

$P_r$  : puissance radiative dans les conditions standards de test (Standard Test Condition : STC)

$P_r = 1$  [kWh/m<sup>2</sup>]

$E_i$  : irradiation solaire journalière du lieu [kWh/m<sup>2</sup>/j]

$k_p$  : coefficient qui tient compte des facteurs suivants :

- L'incertitude météorologique
- Le point de fonctionnement des modules qui est rarement optimal et qui peut être aggravé par la baisse des caractéristiques des modules et la perte de rendement des modules dans le temps
- Le rendement des cycles de charges et de décharge de la batterie (90%)
- Le rendement du chargeur et de l'onduleur (90 à 95%)
- Les pertes dans les câbles et les connexions

Pour les systèmes avec des batteries, on prend généralement  $k_p = 0,5$  à  $0,7$ .

#### **b) Formule conseillée par sma [34]**

Dans cette étude, les onduleurs et onduleurs chargeurs utilisés sont ceux de l'entreprise sma, c'est pourquoi la relation qu'elle conseille est utilisée pour que les résultats de calcul manuel et ceux obtenus en utilisant l'équation qu'elle conseille pourront être confrontés.

$$P_{c,sma} = \frac{E_a \cdot 1,3}{E_{pv}} \quad (VI.4)$$

Avec :

$P_{c,sma}$  : puissance crête de l'installation [kWc]

$E_a$  : consommation moyenne annuelle [kWh/an]

$E_{pv}$  : production spécifique photovoltaïque [kWh/an/kWc]

1,3 : marge pour 30% d'excès

**c) Evaluation du nombre de panneaux**

Le nombre de panneaux solaires totaux nécessaires pour l'installation est donné par la relation suivante :

$$N_m = \frac{P_c}{P_m} \quad (VI.5)$$

Avec :

$N_m$  : nombre de modules total

$P_m$  : puissance unitaire du panneau [kWc]

**d) Choix de l'emplacement, de l'orientation et de l'inclinaison**

Il est nécessaire de définir l'emplacement des modules avant toute installation pratique car il faut les protéger de diverses agressions. Il est également nécessaire de bien choisir l'orientation et l'inclinaison des modules pour qu'ils puissent recevoir le maximum de rayonnement solaire et délivrer à leur tour une puissance maximale.

- Emplacement

L'emplacement des panneaux solaires doit répondre aux exigences suivantes :

- Hors de portée de tous, sauf des personnes chargées de leur entretien
- Exposé aux rayons solaires toute la journée et en toute saison
- Le plus près possible de l'utilisateur pour éviter les pertes en ligne
- Le plus près possible de la surveillance
- Solidement fixé pour résister au vent
- À l'abri des jets de projectiles et des oiseaux

- Orientation et inclinaison

L'orientation du panneau solaire est la direction vers laquelle il est incliné. A Madagascar, elle doit être plein Nord. Mais certaines pratiques montrent des rendements intéressants pour l'orientation Est-Ouest. L'utilisation d'une boussole s'avère donc indispensable pour éviter toute approximation qui risquerait d'induire une perte de puissance à cause d'une mauvaise orientation.

L'inclinaison constitue un paramètre important pour l'obtention d'un maximum d'énergie puisque la puissance produite à la sortie est proportionnelle au rayonnement solaire. Il faut donc bien définir l'inclinaison pour que les surfaces des modules soient perpendiculaires aux rayons solaires.

L'inclinaison (i) est l'angle que fait le panneau solaire avec l'horizontale. Cette inclinaison est égale à la latitude du site à 15° près pour un fonctionnement permanent durant toute l'année. Le tableau ci-dessous donne l'inclinaison recommandée selon la latitude du site.

Tableau VI. 2: Angle d'inclinaison des modules suivant la latitude du site (source : Cours Energie solaire GE L3, 2014-2015)

Latitude du site	Inclinaison
$L < 10^\circ$	$i = 10^\circ$
$10^\circ < L < 20^\circ$ (Madagascar)	$i = L$
$20^\circ < L < 35^\circ$	$i = L + 10^\circ$
$L > 35^\circ$	$i = L + 15^\circ$

### VI.2.2 Dimensionnement des batteries

#### a) Evaluation de la capacité réelle

La capacité de la batterie exprimée en [Ah] est donnée en fonction de :

- L'énergie consommée par les diverses utilisations
- La tension des batteries à utiliser
- Nombre de jours d'autonomie souhaité
- La profondeur de décharge maximale acceptable par la batterie d'après le type de batterie

Voici l'équation qui donne la capacité du parc de batteries :

$$C_t = \frac{N_j \cdot E_t}{k_d \cdot U_b} \quad (VI.6)$$

Avec :

$C_t$  : capacité du parc de batteries [Ah]

$N_j$  : nombre de jours d'autonomie

$k_d$  : coefficient de décharge (0,5 à 0,8)

$E_t$  : consommation énergétique totale par jour [Wh/j]

$U_b$  : tension d'une batterie [V]

#### b) Nombre de batteries nécessaires

Le nombre de batteries nécessaires pour l'installation est obtenu par la relation suivante :

$$N_b = \frac{C_t}{C_u} \quad (\text{VI.7})$$

Avec :

$N_b$  : nombre total de batteries nécessaires

$C_u$  : capacité par élément de batteries [Ah]

**c) Implantation et montage des batteries**

Les batteries doivent être placées dans un local qui assure les fonctions suivantes :

- Être correctement ventilé pour évacuer les émissions de gaz et les variations de températures ;
- Être indépendant et de taille suffisante pour permettre les inspections périodiques ;
- Être bien isolé pour protéger les batteries des intempéries et des éléments extérieurs (pluie, soleil, ...) et ne pas être accessible au public pour éviter les risques pour le matériel et les personnes.

Dans le local, les accumulateurs devraient être posés sur un chantier en bois spécifique traité spécialement ou en plastique (bien horizontal) pour l'acide et les termites. Ils doivent être disposés en escalier pour faciliter toute inspection.

*VI.2.3 Dimensionnement des onduleurs*

**a) Puissance apparente**

La puissance apparente des onduleurs est déterminée par l'équation :

$$S_0 = \frac{P_0}{\cos \varphi_0} \quad (\text{VI.8})$$

Avec :

$S_0$  : puissance apparente de l'onduleur [kVA]

$P_0$  : puissance active de l'onduleur [kW]

$$P_0 = \frac{P_c}{\eta_{ond}}$$

$P_c$  : puissance crête du champ photovoltaïque [kW]

$\cos \varphi_0$  : facteur de puissance de l'onduleur

$\eta_{ond}$  : rendement de l'onduleur

**b) Nombre d'onduleurs nécessaires**

Le nombre d'onduleurs nécessaires pour l'installation est déterminée par la relation suivante :

$$N_{ond} = \frac{S_0}{P_u} \quad (VI.9)$$

Avec :

$N_{ond}$  : nombre total d'onduleurs nécessaires

$P_u$  : puissance d'un onduleur [kVA]

**VI.2.4 Dimensionnement des onduleurs chargeurs**

**a) Puissance apparente**

$$S_{ondCharg} \geq \frac{S_0}{2} \quad (VI.10)$$

Avec :

$S_{ondCharg}$  : puissance apparente des onduleurs chargeurs [kVA]

$S_0$  : puissance apparente des onduleurs solaires [kVA]

**b) Nombre d'onduleurs chargeurs**

$$N_{ondCharg} = \frac{S_{ondCharg}}{P_{uOndCharg}} \quad (VI.11)$$

Avec :

$N_{ondCharg}$  : nombre d'onduleurs chargeurs nécessaires

$P_{uOndCharg}$  : puissance d'un onduleur chargeur [kVA]

**VI.2.5 Dimensionnement des câblages DC (panneaux solaires vers onduleurs)**

Ce sont les câbles qui raccordent les modules entre eux pour former des strings et branchent plusieurs strings en parallèle. Seuls des câbles solaires (double isolation, protection UV et ozone, etc ...) peuvent être utilisés.

**a) Tension nominale totale**

$$U_{nom,tot} = N_s \cdot U_n \quad (VI.12)$$

Avec :

$U_{nom,tot}$  : tension nominale totale [V]

$N_s$  : nombre de modules par string

$U_n$  : tension nominale d'un panneau solaire [V]

**b) Courant maximal fourni par un string**

Les conducteurs principaux de courant continu devront toujours être dimensionnés pour la surintensité maximale possible fourni par un string.

Ce courant maximal est donné par l'équation suivante :

$$I_{max,string} = 1,25 \cdot I_{cc} \quad (VI.13)$$

Avec :

$I_{max,string}$  : courant maximal fourni par un string [A]

$I_{cc}$  : courant de court-circuit dans les conditions standards de test [A]

**c) Calcul de la section des câbles**

La section des câbles est obtenue par la relation :

$$S_{DC} = \frac{\rho_{DC} \cdot L_{DC} \cdot I_{max,string}}{\varepsilon_{DC} \cdot U_{nom,tot}} \quad (VI.14)$$

Avec :

$\rho_{DC}$  : résistivité du câble [ $\Omega \cdot m$ ]. Cette valeur dépend du câble ( $1,7 \cdot 10^{-8}$  pour un câble en cuivre)

$L_{DC}$  : longueur du câble [m]

$\varepsilon_{DC}$  : chute de tension [V]

La section du câble à choisir sera donc la valeur supérieure standard la plus près de la valeur calculée.

**VI.2.6 Dimensionnement des câblages AC**

La section des câblages AC est donnée par l'équation suivante :

$$S_{AC} = \frac{\rho_{AC} \cdot L_{AC} \cdot I_{max} \cdot b \cdot \cos \varphi}{\varepsilon_{AC} \cdot U_{nom}} \quad (VI.15)$$

Avec :

$\rho_{AC}$  : résistivité du câble [ $\Omega.m$ ]. Cette valeur dépend du câble ( $1,7.10^{-8}$  pour un câble en cuivre)

$L_{AC}$  : longueur du câble [m]

$\varepsilon_{AC}$  : chute de tension [V]

$I_{max}$  : courant maximal d'emploi [A]

$b$  : coefficient qui dépend du type de circuit (égale à 1 pour un circuit triphasé et 2 pour un circuit monophasé)

$\cos \varphi$  : facteur de puissance

$U_{nom}$  : tension nominale [V]

La section du câble à choisir sera donc la valeur supérieure standard la plus près de la valeur calculée.

## **Chapitre VII : Méthodologie d'analyse financière avec le logiciel RETScreen 4**

### **VII.1 Présentation du logiciel RETScreen 4**

Pour l'analyse financière de notre projet, on utilisera le logiciel RETScreen 4. Il s'agit d'un système logiciel basé sur Excel développé par le Gouvernement canadien pour l'analyse de faisabilité de projets d'efficacité énergétique, d'énergies renouvelables et de cogénération ainsi que pour l'analyse de la performance énergétique en continu se situant partout dans le monde. Il permet d'identifier, d'évaluer et d'optimiser de façon rapide la viabilité technique et financière de projets potentiels en matière d'énergies propres. Cette plate-forme logiciel permet aussi aux gestionnaires de mesurer et de vérifier facilement les performances réelles de leurs installations, ainsi que de trouver des possibilités supplémentaires d'économies et de production d'énergie. Il évalue les projets grâce à des archétypes complets et détaillés. Il comprend plusieurs bases de données, y compris une base de données globale des conditions climatiques provenant de 6 700 stations au sol et de données de projets, une base de données de références, une base de données hydrologiques et une base de données de produits.

### **VII.2 Méthode d'analyse financière**

#### **VII.2.1 Problème de précision sur le coût total d'investissement**

Le dilemme sur le niveau de précision des coûts est illustré par le graphique ci-dessous, tiré d'une étude de la Banque Mondiale, qui fait une rétrospective de projets hydroélectriques. Au début du projet, l'estimation des coûts finaux est très imprécise mais il n'y a encore que très peu d'investissements engagés dans le projet, avec cette estimation. Une étude préliminaire de faisabilité permet de prédire le coût final d'un projet à plus ou moins 40 à 50%. C'est seulement lorsqu'on a terminé l'ingénierie détaillée du projet et qu'on en arrive à l'étape des appels d'offres où l'on connaîtra à 10% près le coût réel du projet.

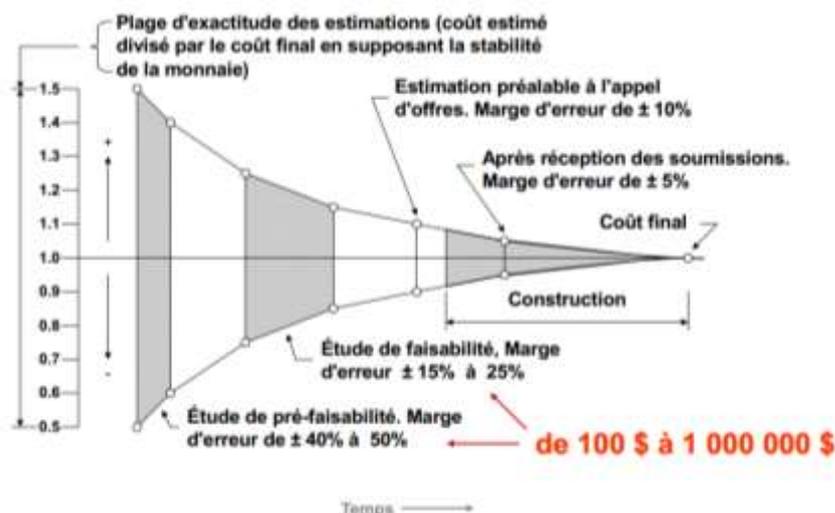


Figure VII. 1 : Etape de précision du coût d'investissement d'un projet

### VII.2.2 Analyse financière avec RETScreen 4

L'analyse effectuée par le logiciel est basée sur une comparaison entre un cas de référence qui est en général une technologie ou une solution conventionnelle, et un cas proposé qui est la technologie d'énergies propres. Le résultat de l'analyse dépend des coûts spécifiés par l'utilisateur. Ultimement, le logiciel fait peu de cas des coûts absolus mais s'intéresse plutôt aux coûts incrémentaux, c'est-à-dire les coûts supplémentaires du cas proposé par rapport à ceux du cas de référence. Par conséquent, l'utilisateur peut entrer directement les coûts incrémentaux ou entrer le coût total associé au cas proposé ainsi que tous les crédits qui découlent des coûts rendus inutiles grâce au remplacement de la technologie de base par la technologie proposée.

Dans le modèle RETScreen, les avantages énergétiques sont les mêmes pour le cas de référence et le cas proposé. Par exemple, si un parc éolien connecté à un réseau central génère 50 000 MWh par année, il sera comparé à une énergie de 50 000 MWh disponible sur le réseau et produit par les sources conventionnelles. D'un autre côté, les coûts ne seront pas les mêmes pour le cas de référence et le cas proposé. Normalement le projet proposé aura des coûts d'investissement plus élevés et des coûts annuels plus bas (grâce aux économies des combustibles par exemple). Par conséquent la tâche d'analyse de RETScreen est de déterminer si le solde des coûts et des économies sur toute la durée de vie du projet en fait une proposition financièrement intéressante ou non. Cette capacité de détermination de la viabilité d'un projet se reflète dans les divers indicateurs financiers et flux monétaires calculés par le logiciel.

L'analyse des réductions d'émission de gaz à effet de serre s'inspire de cette approche en calculant la réduction d'émission de gaz à effet de serre associée au changement de technologie du cas de référence au cas proposé.

### **Facteurs affectant la rentabilité d'un projet**

Voici les différents facteurs qui affectent la rentabilité d'un projet :

- Ressources énergétiques sur le site (le rayonnement solaire par exemple)
- Rendement des équipements, comme l'absorptivité solaire
- Coûts d'investissement du projet (par exemple les collecteurs solaires)
- Crédits en fonction du cas de référence (par exemple le revêtement conventionnel)
- Frais annuels et périodiques (par exemple le vandalisme)
- Coûts évités en énergie (par exemple le prix de gros de l'électricité)
- Financement (le ratio d'endettement, la durée de l'emprunt, le taux d'intérêt)
- Taxes sur les équipements et impôts sur les revenus ou les économies
- Impact environnemental de l'énergie remplacée (par exemple : le charbon, le gaz naturel, le pétrole)
- Existence de mesures incitatives et/ou subventions (par exemple : vente d'énergie vert à taux majoré, crédits de CO<sub>2</sub>, incitatifs financiers)
- Choix des critères permettant d'établir la rentabilité : le temps de retour simple, le taux de rendement interne, la valeur actualisée nette, le prix de revient du kWh produit.

RETScreen prend en compte tous les facteurs que l'on a évoqués et présente les résultats de l'analyse financière sous forme d'analyse des coûts globaux du projet sur son cycle de vie, ce qui permet de réaliser une juste comparaison entre les technologies d'énergies propres et les technologies conventionnelles.

Nous allons utiliser cinq feuilles de calcul pour l'analyse financière et l'impacts environnementaux de notre projet :

- Démarrer
- Modèle énergétique
- Analyse des coûts
- Analyse des émissions
- Analyse financière

**a) Démarrer**

Dans cette section du logiciel, la feuille de calcul « Démarrer » est utilisée pour entrer les informations générales à propos du projet ainsi que les conditions du site de référence en ce qui a trait au climat. C'est dans cette feuille de calcul qu'on sélectionne les paramètres standards pour effectuer l'analyse.

**b) Modèle énergétique**

La feuille de calcul « Modèle énergétique » est conçue pour spécifier le système du cas de référence et du cas proposé.

**c) Analyse des coûts**

Dans cette section, l'utilisateur est aidé par le logiciel pour estimer les coûts et les crédits relatifs au cas proposé. Le modèle considère les coûts d'investissements initiaux et les frais annuels récurrents. L'utilisateur peut consulter la base de données de produits RETScreen pour contacter des fabricants et ainsi obtenir des prix ou toute autre information nécessaire.

- Coût du kilowattheure

Le coût du kilowattheure se calcule en utilisant la relation suivante :

$$C_{kWh} = \frac{C + C_{exp} + A + T_C - ES}{E_{tot_v}} \quad (VII.1)$$

Avec :

$C_{kWh}$  : coût du kilowattheure [Ar]

$C$  : coût d'investissement total du projet [Ar]

$C_{exp}$  : coût d'exploitation [Ar]

$A$  : amortissement [Ar]

$ES$  : encouragements et subventions [Ar]

$T_C$  : coût d'allocation sur les capitaux propres [Ar]

$E_{tot_v}$  : énergie totale vendue sur la durée de vie du projet [kWh]

- Tarif minimum du kilowattheure

Le tarif minimum du kilowattheure est obtenu en utilisant l'équation suivante :

$$T_{kWh} = C_{kWh} + M_b + TVA \quad (VII.2)$$

Avec :

$M_b$  : marge bénéficiaire [Ar]

TVA : taxe sur les valeurs ajoutées [Ar]

#### **d) Analyse des émissions**

Dans cette feuille de calcul, l'utilisateur doit compléter les informations sur le combustible du cas de référence. Certaines valeurs d'entrées seront ajoutées à la feuille de calcul « Analyse financière » afin de calculer d'éventuels crédits ou coûts liés aux réductions d'émissions de GES. On choisit parmi trois méthodes pour cette analyse ; la méthode 1 est une analyse simplifiée des émissions de GES, la méthode 2 utilise plusieurs paramètres prédéfinis dans les calculs, tandis que pour la méthode 3, ces paramètres devront être entrés par l'utilisateur. Si la méthode 1 est choisie, RETScreen propose des facteurs typiques d'émissions de GES liés à la production d'électricité applicables à différents pays choisis dans une liste déroulante.

#### **e) Analyse financière**

Cette feuille d'analyse financière comprend six sections : Paramètres financiers, Revenus annuels, Sommaire des coûts, économies et revenus du projet, Viabilité financière, Flux monétaires annuels et Graphique des flux monétaires cumulatifs.

Les paramètres financiers entrés sont utilisés pour effectuer les calculs dans la feuille de calcul « Analyse financière ». Les valeurs de chaque paramètre dépendront du point de vue de l'utilisateur, par exemple, un service public fournisseur ou distributeur d'énergie ou un producteur indépendant d'électricité.

#### **Indicateurs de viabilité financière d'un projet**

- Retour simple ou Durée de Récupération des Capitaux Investis

Le Retour Simple est le nombre d'années qu'il faut pour que le flux monétaire (excluant le paiement de la dette) soit égale à l'investissement total (qui est égal à la somme de la dette et des capitaux propres investis). Ci-dessous la relation pour l'obtenir :

$$RS = \frac{C - ES}{(R_{\text{ener}} + R_{\text{cap}} + R_{\text{EP}} + R_{\text{GES}}) - (C_{\text{E\&E}} + C_{\text{comb}})} \quad (\text{VII.3})$$

Avec :

$C$  : coût d'investissement total du projet

$ES$  : encouragements et subventions

$R_{\text{ener}}$  : économie ou revenu annuel en énergie

$R_{\text{cap}}$  : revenu annuel sur la capacité produite

$R_{\text{EP}}$  : revenu du crédit pour la production d'énergie propre

$R_{\text{GES}}$  : revenu du crédit pour la réduction de gaz à effet de serre

$C_{\text{E\&E}}$  : coûts annuels d'exploitation et d'entretien associé au projet d'énergie propre

$C_{\text{comb}}$  : coût annuel en combustible ou en électricité

- Valeur Actualisée Nette (VAN)

La valeur actualisée nette d'un projet est la valeur de tous les flux monétaires futurs, actualisés selon le taux d'actualisation, en monnaie courante. Elle est calculée en actualisant tous les flux monétaires comme l'exprime l'équation suivante :

$$VAN = \sum_{n=0}^N \frac{MBA}{(1+r)^n} - C \quad (\text{VII.4})$$

Avec :

$MBA$  : Marge Brute d'Autofinancement

$r$  : taux d'actualisation

$n$  : durée de vie du projet [années]

Une valeur positive de la VAN indique qu'un projet est rentable.

- Taux de Rendement Interne (TRI)

Le Taux de Rendement Interne est calculé en trouvant un taux d'actualisation qui ramène à zéro la Valeur Actualisée Nette du projet. Il est calculé en résolvant l'équation suivante :

$$0 = \sum_{i=0}^n \frac{MBA}{(1+TRI)^i} - C \quad (\text{VII.5})$$

Avec :

*MBA* : Marge Brute d'Autofinancement

*TRI* : taux de rendement interne

*n* : durée de vie du projet [années]

Pour évaluer la rentabilité d'un projet, on peut comparer le taux d'actualisation choisi et le TRI trouvé après la résolution de l'équation (VII.3). Si le TRI est supérieur au taux d'actualisation, alors le projet est rentable.

- Ratio avantages-coûts (Indice de profitabilité  $I_p$ )

Le ration avantages-coûts ou indice de profitabilité représente la rentabilité relative du projet. Il est calculé par la relation suivante :

$$I_p = \sum_{n=0}^N \frac{MBA}{(1+r)^n \cdot C} \quad (\text{VII.4})$$

Pour conclure cette seconde partie, voici la figure résumant toutes les étapes à effectuer au cours d'un projet d'électrification rurale.

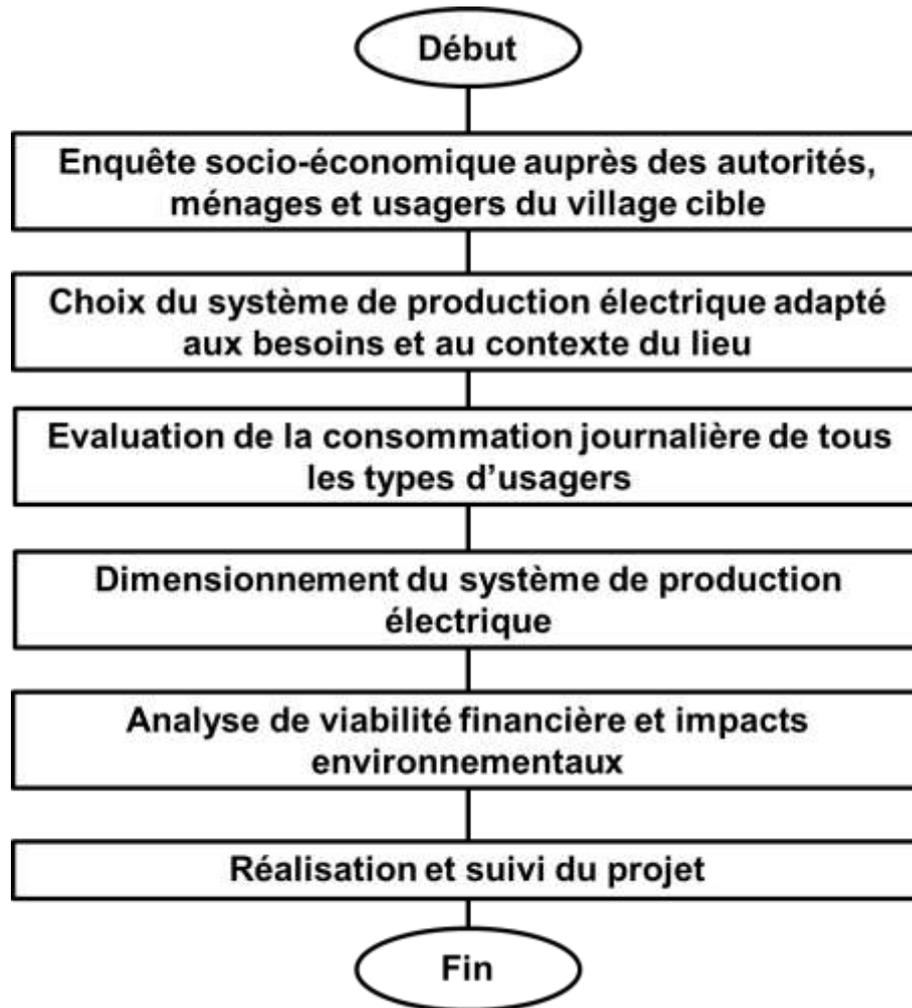


Figure VII. 2 : Organigramme des étapes à suivre pour un projet d'électrification rurale.

## **Partie III : PRESENTATION DU PROJET**

## *Chapitre VIII : Présentation de la société et objectifs du travail*

### *VIII.1 Présentation de la Société EOSOL*

#### *VIII.1.1 Identité*

La société EOSOL Madagascar de forme juridique Société à Responsabilité Limitée (SARL) est située à Tsiadana, Lot 56 rue du Général Charles de Gaulle, rez-de-chaussée de l'Espace Dera, Route de l'Université, 101 Antananarivo, Madagascar. Elle est immatriculée au Registre du Commerce et des Sociétés d'Antananarivo, sous le numéro RCS 2008B00906 et portant le numéro statistique 35301112008010926 et d'identification fiscale n° 4000955242, représentée et gérée par Madame Camille ANDRE-BATAILLE, en sa qualité de Directrice Générale. EOSOL Madagascar est un opérateur indépendant, spécialisé dans le métier d'électrification rurale.

#### *VIII.1.2 Historique [36]*

- 2008 : Création de la société EOSOL
- 2009 : Crise politique à Madagascar – Début du Régime de transition
- 2014 : Mise en service des centrales d'Andavadoaka (60 kWc) et Befandefa (15 kWc) dans la région Atsimo Andrefana. Fin du Régime de transition par la tenue d'élections libres
- 2015 : Augmentation de 5% des revenus par rapport à 2014
- 2016 : Instauration d'une nouvelle gérance, impulsion d'une nouvelle vision et d'une nouvelle stratégie. Augmentation de 65% des revenus par rapport à 2015
- 2016-2017 : Changement d'actionariat. 75% à ViMAP GmbH et 25% à Madame Camille ANDRE-BATAILLE.

#### *VIII.1.3 Organisation*

La gestion de la société se compose d'une Direction Générale et de trois Directions principales qui sont : la Direction des Opérations, la Direction Administrative et Financière et la Direction Marketing et Commerciale. L'organigramme se présente comme suit :

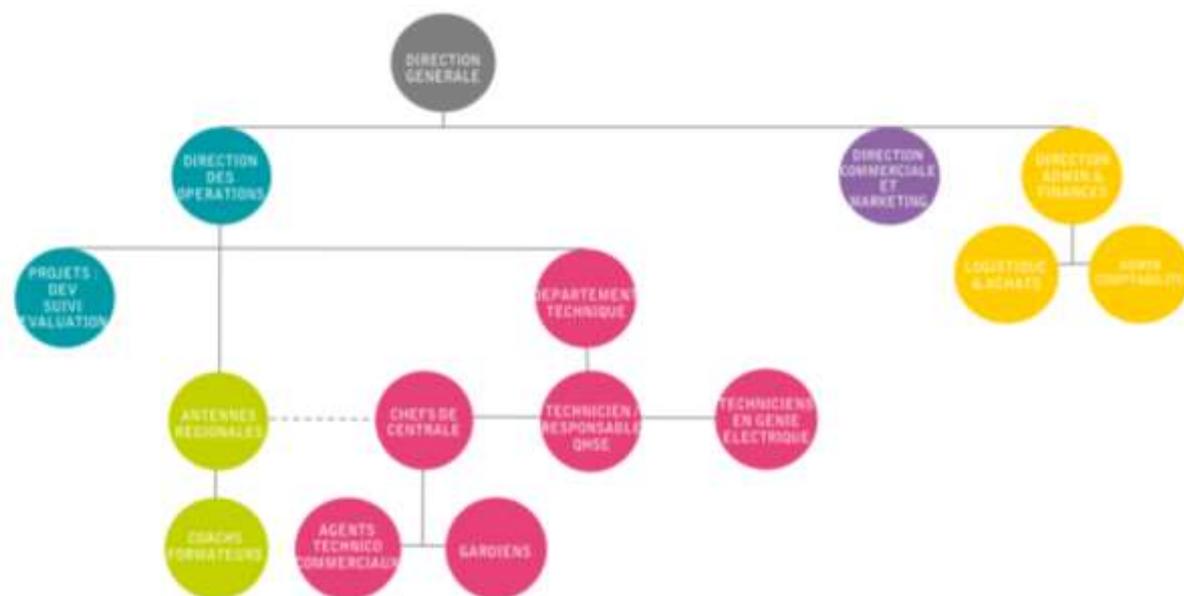


Figure VIII. 1 : Organigramme de la société EOSOL

Source : EOSOL Madagascar

### VIII.1.4 Activités

La société EOSOL Madagascar effectue de multiples tâches dans le domaine de l'énergie renouvelable, presque tous les métiers rattachés à cette filière sont pratiqués dans cette société. Les activités pratiquées sont les suivantes :

- Etude d'avant-projet, que ce soit sommaire ou détaillée (APS/APD) ;
- Installation de systèmes photovoltaïques (on grid et off grid) dans les zones rurales ;
- Installation de systèmes plug-and-play ou hybridation ;
- Production d'électricité avec la tension du secteur 220V/380V (Monophasé et Triphasé) par les énergies renouvelables ;
- Gestion et maintenance de centrales de production électriques ;
- Opérateur Commercial (vente de crédit pour le rechargement du compteur des clients pour le mode de paiement prépaiement cash, facturation de la consommation pour les clients en mode de paiement post paiement) ;
- Engineering Procurement Construction (EPC) ;
- Monitoring permettant de suivre les besoins des consommateurs et d'anticiper les opérations techniques ;
- Accompagnement, sensibilisation, formation et suivi des communautés pour une utilisation productive de l'énergie ;
- Education et formation des clients aux bénéfices de l'utilisation et l'exploitation des énergies renouvelables pour la préservation de l'environnement ;

- Formation locale des jeunes avec les engagements sociaux de la société ;
- Transfert de compétences auprès des communautés ;
- Consultance pour des organismes publics ou privés dans le domaine de l'électrification rurale.

### *VIII.1.5 Rôles dans l'entreprise*

Durant trois mois de stage auprès de la société, voici les travaux effectués :

- Enquête socio-économique des ménages, institutions et usagers productifs dans le District de Tsiroanomandidy durant le premier mois pour connaître leur consommation énergétique ;
- Traitement des données collectées après enquête visant à déduire la courbe de charge journalière, mensuelle et annuelle de chaque localité ;
- Diverses tâches technico-opérationnelles.

## *VIII.2 Objectifs du travail*

### *VIII.2.1 Contexte*

Le stage effectué est dans le contexte d'une étude d'avant-projet détaillé pour l'électrification des villages qui n'ont pas encore accès à l'électricité dans le district de Tsiroanomandidy.

### *VIII.2.2 Objectifs*

Les objectifs du stage sont les suivants :

- Connaître les étapes à suivre pour un projet d'électrification rurale ;
- Savoir faire des enquêtes auprès des ménages, institutions et usagers productifs ;
- Savoir faire le traitement des données collectées après les enquêtes ;
- Savoir dimensionner une centrale solaire photovoltaïque off grid.

### *VIII.2.3 Méthodologie et moyens utilisés*

La méthodologie et les moyens utilisés durant le stage sont présentés ci-après :

- Formation avant la mission pour les enquêtes à effectuer ;
- Diverses questionnaires (ménages, institutions, usagers productifs) pour les enquêtes ;
- Microsoft Excel pour le traitement des données collectées ;
- Logiciel d'évaluation de l'irradiation solaire (pvGIS) ;
- Logiciel de dimensionnement de système photovoltaïque (Sunny Design) ;
- Logiciel d'analyse de viabilité financière d'un projet d'électrification (RETScreen4).

## *Chapitre IX : Présentation de la Commune de Mahasolo*

### *IX.1 Localisation*

Mahasolo est une Commune Rurale de la région Bongolava dans le District de Tsiroanomandidy. Elle se situe dans la partie Sud-Est de la région Bongolava à 20 km d'Ankadinondry Sakay et à 172 km d'Antananarivo.



Source : Wikipédia

Figure IX. 1 : Localisation de la Commune de Mahasolo

### IX.2 Informations générales sur la Commune

#### IX.2.1 Données démographiques et infrastructures existantes

La Commune de Mahasolo compte en 2018 (considérée comme la première année de l'étude) 2 730 habitants et 546 toits d'après une projection des données<sup>12</sup> du recensement effectué en 2015.

Le tableau qui suit montre le nombre d'institutions et d'utilisateurs productifs existants dans la Commune.

Tableau IX. 1 : Nombre d'institutions publiques, usagers productifs et machineries existants dans la Commune de Mahasolo

Institutions / Usagers productifs / Machineries	Nombre
Bureau Communale	1
Gendarmerie	1
CSB	2
Centre de santé privé	2
EPP	1
CEG	2
Lycée	1
Ecole privée	2
Eglise	8
ONG / Association	11
Restaurant / Bar	10
Grossiste	6
Projection vidéo	10
Multiservice	2
Microfinance	1
Hôtellerie	1
Décortiquerie	5
Ouvrage métallique	5
Machine à bois	3

Source : Enquête auprès du Maire de la Commune

#### IX.2.2 Sources d'énergie utilisées dans la Commune

La majorité des habitants de la Commune de Mahasolo utilisent des kits solaires domestiques (puissance entre 20 et 100 Wc) avec un taux de 50%. La source d'énergie qui arrive en second lieu est le pétrole lampant avec 40% d'utilisateurs. L'utilisation de la bougie et des lampes kiosques est

<sup>12</sup> Source : Maire de la Commune de Mahasolo

## Partie III : PRESENTATION DU PROJET

en troisième place avec 30%. La source énergétique la moins utilisée est le mini-kit solaire (puissance < 20 Wc) avec seulement 20% de consommateur.

Tableau IX. 2 : Tableau récapitulatif des sources énergétiques utilisées dans la Commune avec leur prix moyen

Sources énergétiques utilisées	% Consommateurs	Prix moyen
Kit solaire 20 W < x < 100 W	50%	150 000 Ar
Bougies	30%	500 Ar
Kiosque énergétique	30%	200 Ar ; 300 Ar
Mini kit solaire < 20 W	20%	75 000 Ar

Source : Enquête auprès du Maire de la Commune

### IX.2.3 Généralités sur les revenus de la population active

La principale activité pratiquée par la population est l'agriculture avec 80% de pratiquants, l'élevage tient également une place importante pour les agriculteurs alors presque tous les agriculteurs le pratiquent. Les 20% restants de la population active sont commerçants ou fonctionnaires.

Tableau IX. 3 : Saisonnalité des revenus des ménages dans la Commune de Mahasolo

Saisons	Haute saison	Basse saison
Mois	Janvier – Avril - Mars	Février – Mars – Octobre – Novembre - Décembre

Source : Enquête auprès du Maire de la Commune

### IX.3 Potentiel photovoltaïque

Selon les données obtenues en utilisant le logiciel pvGIS, le rayonnement solaire quotidien annuel à Mahasolo est de 5,88 kWh/m<sup>2</sup>/j. Le tableau ci-dessous représente les valeurs moyennes journalières par mois du rayonnement solaire à Mahasolo.

Tableau IX. 4 : Rayonnement solaire quotidien à Mahasolo

Mois	Rayonnement solaire quotidien horizontal [Wh/m <sup>2</sup> /j]
Janvier	6 020
Février	6 020
Mars	5 980
Avril	5 680
Mai	5 010
Juin	4 740
Juillet	4 990
Août	5 730
Septembre	6 470
Octobre	6 740
Novembre	6 730
Décembre	6 470
Annuel	<b>5 880</b>

Source : pvGIS

### IX.4 Justification du choix de la Commune pour un projet d'électrification par une centrale solaire photovoltaïque

Mahasolo est une Commune en plein développement, les habitants ont déjà eu accès à l'eau potable depuis 1973. Il existe huit bornes fontaines dans le chef-lieu et le nombre d'abonnés individuels atteint les 200 ménages<sup>13</sup>. Après un constat sur terrain, les habitants et les autorités de la Commune sont très actifs alors cette Commune peut être considérée étant une « petite grande ville ». La Commune de Mahasolo a été choisie pour ce projet car en premier lieu c'est un chef-lieu de Commune ; ensuite, elle possède un fort potentiel photovoltaïque (en moyenne 5,88 kWh/m<sup>2</sup>/jour). De plus, tous les ménages enquêtés ont montré beaucoup d'enthousiasme par rapport à l'arrivée de l'électricité. Et enfin, le représentant de l'autorité lui-même a déclaré avoir déjà entrepris des initiatives pour un projet d'électrification de la Commune mais jusqu'à présent il n'y a pas eu de retour concret. Avec une population et une autorité aussi enthousiastes, le développement de la Commune est assuré avec l'arrivée de l'électricité.

### IX.5 Besoins énergétiques de la Commune

Les besoins énergétiques de chaque type de consommateur ont été projetés sur cinq ans selon des hypothèses précises (Annexe 4) qui reposent sur les enquêtes effectuées auprès de ces

<sup>13</sup> Source : enquête auprès de la JIRAMA à Mahasolo

consommateurs et les constats sur terrain. C'est à partir de ces besoins que la centrale photovoltaïque sera dimensionnée.

### *IX.5.1 Consommation énergétique des ménages*

A la cinquième année la Commune de Mahasolo compte 645 ménages qui ont été classés dans trois segments selon des caractéristiques bien définies d'après les informations récoltées et le profil de la Commune.

Le tableau suivant illustre la consommation énergétique journalière en courant alternatif des ménages.

## Partie III : PRESENTATION DU PROJET

Tableau IX. 5 : Liste des équipements électriques utilisés par chaque segment de ménage

Type de segment	Nombre à la 5 <sup>ème</sup> année <sup>14</sup>	Nombre de raccordés à la 5 <sup>ème</sup> année <sup>15</sup>	Equipements électriques utilisés	Nombre d'équipements	Puissance [W]	Durée d'utilisation [h]
Segment 1	409	102	Lampe	2	11	2
			Radio	1	20	3
			Chargeur de téléphone	1	10	3
Segment 2	89	36	Lampe	4	11	3
			Radio	1	20	5
			Chargeur de téléphone	2	10	3
			Télévision	1	110	2
			Lecteur DVD	1	20	2
Segment 3	147	125	Lampe	5	11	3
			Chargeur de téléphone	2	10	3
			Télévision	1	110	4
			Lecteur DVD	1	20	4

<sup>14</sup> Estimation du nombre de ménages par segment à la cinquième année avec un taux d'augmentation de 4% par an (Annexe 4)

<sup>15</sup> Nombre de ménages raccordés par segment à la cinquième année selon l'hypothèse du taux de raccordement (Annexe 4)

### Partie III : PRESENTATION DU PROJET

---

			Subwoofer	1	30	4
			Canal+	1	60	4
			Radio	1	20	8
			Réfrigérateur	1	90	24
			Ordinateur	1	100	2

La figure IX.2 représente la courbe de charge journalière des ménages de la Commune de Mahasolo.

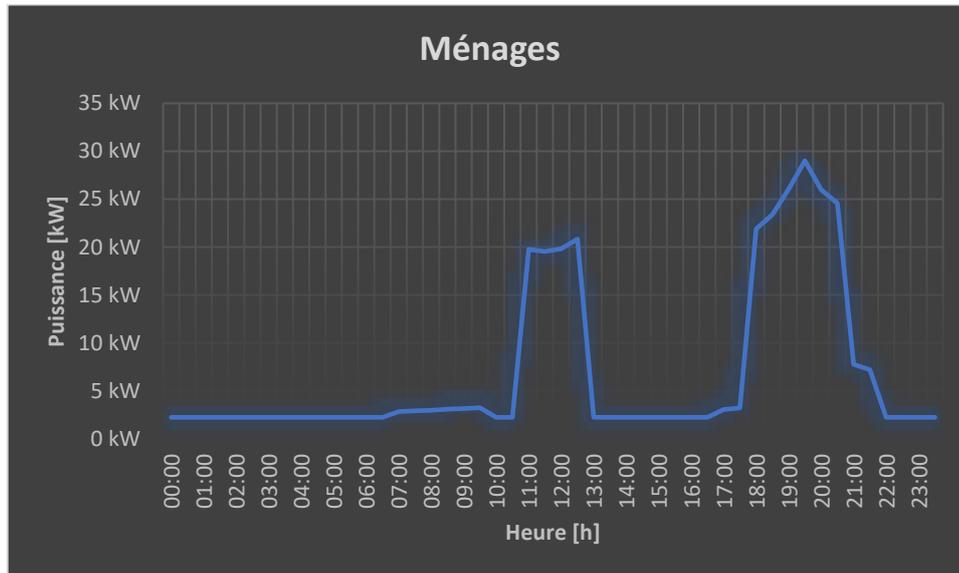


Figure IX. 2 : Courbe de charge journalière des ménages

La puissance pointe journalière auprès des ménages à Mahasolo est atteinte entre 19h30 et 20h et a pour valeur 29 [kW].

L'énergie totale journalière consommée par les ménages est :

$$E_{tm} = 166 \text{ [kWh/j]}$$

### IX.5.2 Consommation énergétique des Institutions Publiques

Les administrations publiques comme le Bureau Communal, les Centres de Santé, les Ecoles et les Eglises sont classés parmi les institutions publiques.

Le tableau IX.6 montre les équipements électriques utilisés par chaque institution. Tous les équipements fonctionnent en courant alternatif.

## Partie III : PRESENTATION DU PROJET

Tableau IX. 6 : Liste des équipements électriques utilisés par les Institutions Publiques

Institution Publique	Nombre à la 5 <sup>ème</sup> année	Nombre de raccordés 5 <sup>ème</sup> année	Equipements électriques utilisés	Nombre d'équipements	Puissance [W]	Durée d'utilisation [h]
<b>Administration publique (Mairie)</b>	1	100	Lampe	5	11	2
			Ordinateur	1	100	7
			Imprimante	1	80	2
			Eclairage publique	40	40	11
			Chargeur de téléphone	5	10	3
<b>Bureau gendarmerie</b>	1	100	Lampe	5	11	11
			Chargeur de téléphone	5	10	3
			Ordinateur	1	100	7
			Imprimante	1	80	2
<b>Centre de Santé</b>	4	100	Lampe	6	11	11
			Ordinateur	1	100	7
			Imprimante	1	80	2
			Réfrigérateur	1	90	24
<b>Ecole</b>	7	6	Lampe	6	11	2
			Ordinateur	1	100	7
			Imprimante	1	80	2
			Vidéo projecteur	1	120	2
<b>Eglise</b>	9	8	Lampe	5	11	5
			Sonorisation	1	200	5

La figure IX.3 représente la courbe de charge journalière des Institutions Publiques de la Commune de Mahasolo.

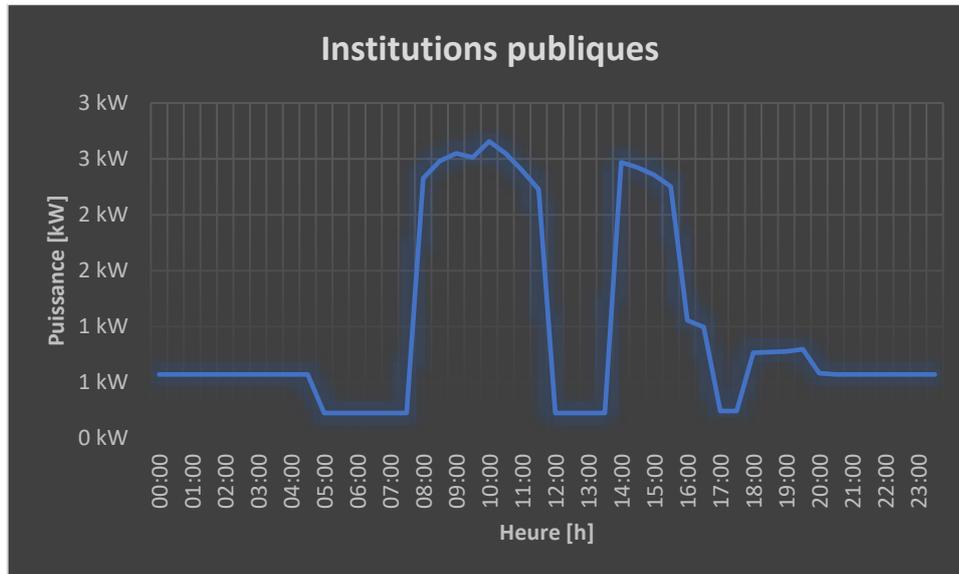


Figure IX. 3 : Courbe de charge journalière des Institutions Publiques

La puissance pointe des Institutions Publiques de la Commune de Mahasolo est atteinte entre 10h et 10h30 et a pour valeur 2,66 [kW].

La consommation énergétique journalière des institutions publiques est :

$$E_{tip} = 24 \text{ [kWh/j]}$$

### IX.5.3 Consommation énergétique des usagers productifs

Dans la catégorie des usagers productifs on trouve : les centres de loisirs, les bureaux des organisations ou associations, les hôtels, les restaurants ou bars, les bureaux des microfinances, les machineries (ouvrage métallique, décortiquerie, menuiserie) et les multiservices.

Le tableau ci-dessous illustre les équipements électriques utilisés par les usagers productifs. Les équipements fonctionnent tous en courant alternatif.

## Partie III : PRESENTATION DU PROJET

Tableau IX. 7 : Liste des équipements utilisés par les usagers productifs

Usagers productifs	Nombre à la 5 <sup>ème</sup> année	Nombre de raccordés à la 5 <sup>ème</sup> année	Equipements électriques utilisés	Nombre d'équipements	Puissance [W]	Durée d'utilisation [h]
Centre de loisirs	12	12	Lampe	2	11	2
			Télévision	1	110	2
			Lecteur DVD	1	20	2
			Subwoofer	1	30	2
Bureau d'organisation	26	19	Lampe	4	11	2
			Ordinateur	1	100	7
			Imprimante	1	80	2
			Chargeur de téléphone	2	10	3
Hôtel	1	1	Lampe	10	11	4
			Lecteur DVD	1	20	6
			Télévision	1	110	6
			Canal+	1	60	6
			Subwoofer	1	30	4
			Réfrigérateur	1	90	24
			Ordinateur	1	100	2
Restaurant / Bar	17	17	Lampe	5	11	4
			Télévision	1	110	6
			Canal+	1	60	6
			Réfrigérateur	1	90	24
			Lecteur DVD	1	20	6
	2	2	Lampe	4	11	2

Partie III : PRESENTATION DU PROJET

<b>Bureau de microfinance</b>			Ordinateur	1	100	7
			Imprimante	1	80	2
			Chargeur de téléphone	2	10	3
<b>Machinerie</b>	1	1	Poste à soudeuse	5	8000	7
			Décortiqueuse	5	9600	7
			Machine à bois	3	13000	7
<b>Multiservice</b>	3	100	Lampe	3	11	2
			Ordinateur	1	100	7
			Imprimante	1	80	7
			Photocopieuse	1	150	7
			Chargeur de téléphone	5	10	8

La figure ci-dessous illustre la courbe de charge journalière des usagers productifs de la Commune de Mahasolo.

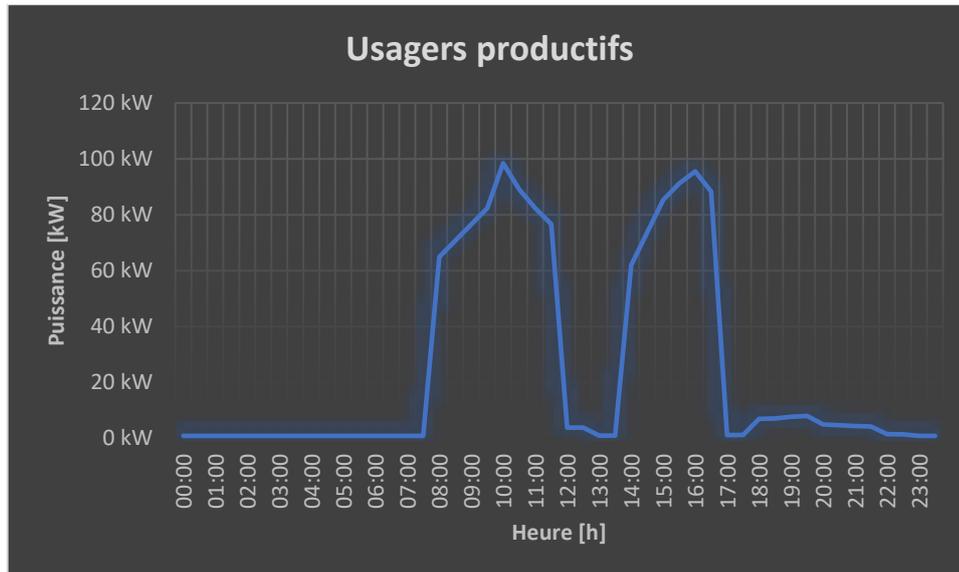


Figure IX. 4 : Courbe de charge journalière des usagers productifs

La puissance pointe des usagers productifs de la Commune de Mahasolo est atteinte de 10h à 10h 30 et elle a pour valeur 98 [kW].

L'énergie totale consommée par jour par les usagers productifs est :

$$E_{tup} = 608 \text{ [kWh/j]}$$

### IX.5.4 Besoins énergétique totale du chef-lieu de la commune

En combinant les consommations énergétiques journalières des trois catégories de consommateurs on obtient la courbe de charge journalière totale du chef-lieu de la commune.

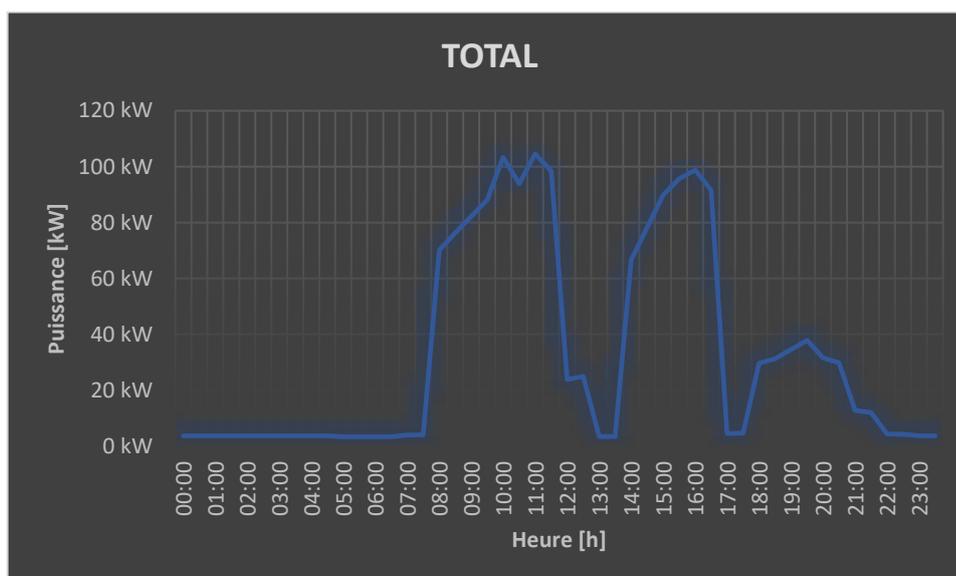


Figure IX. 5 : Courbe de charge journalière du chef-lieu de la commune de Mahasolo

La puissance de pointe journalière de la Commune de Mahasolo est atteinte entre 11h et 11h30 et a pour valeur 105 kW.

L'énergie totale consommée par jour dans le chef-lieu de la commune de Mahasolo est :

$$E_{tc} = 798 \text{ [kWh/j]}$$

## **Chapitre X : Résultats du dimensionnement de la centrale solaire photovoltaïque correspondante au chef-lieu de la Commune**

### **X.1 Puissance du système**

En appliquant la relation (VI.1) à la page 71, on obtient la puissance du système :

$$P_t = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n k_{ij} \cdot n_{ij} \cdot P_{ij} \cdot N_k \cdot k_k$$

$$P_t = 169 \text{ [kW]}$$

### **X.2 Dimensionnement des différents composants**

#### **X.2.1 Dimensionnement des panneaux photovoltaïques**

##### **a) Puissance crête**

Pour calculer la puissance crête des modules photovoltaïques, on applique l'équation (VI.3) à la page 72 :

$$P_c = \frac{E_t \cdot P_r}{k_p \cdot E_i} \quad \text{Avec } E_i = 4,74 \text{ [kWh/m}^2\text{/j]} ; P_r = 1 \text{ [kWh/m}^2\text{]} ; E_t = 798 \text{ [kWh/j]} \text{ et } k_p = 0,6$$

$$P_c = 281 \text{ [kWc]}$$

##### **b) Nombre de panneaux nécessaires**

Le panneau solaire choisi pour l'installation est le E20-327. La relation (VI.5) à la page 74 permet de calculer le nombre de modules nécessaires :

$$N_m = \frac{P_c}{P_m} \quad \text{Avec } P_c = 281 \text{ [kWc]} \text{ et } P_m = 0,327 \text{ [kWc]}$$

$$N_m = 860 \text{ [panneaux]}$$

#### **X.2.2 Dimensionnement des batteries**

##### **a) Capacité réelle des batteries**

La batterie choisie est la Batterie Hoppecke 26 OPZS solar.power 4700Ah. Pour calculer la capacité réelle des batteries, on applique l'équation (VI.6) à la page 75 :

$$C_t = \frac{N_j \cdot E_t}{k_d \cdot U_b} \quad \text{Avec } N_j = 3 \text{ [j]} ; k_d = 0,8 ; E_t = 798 \text{ [kWh/j]} \text{ et } U_b = 2 \text{ [V]}$$

$$C_t = 1\,496,8 \text{ [kAh]}$$

**b) Nombre de batteries nécessaires**

Pour le calcul du nombre de batteries nécessaires, on utilise la relation (VI.7) à la page 75 :

$$N_b = \frac{C_t}{C_u} \text{ Avec } C_t = 1\,496\,804 \text{ [Ah]} \text{ et } C_{10} = 3\,488 \text{ [Ah]}$$

$$N_b = 430 \text{ [batteries]}$$

*X.2.3 Dimensionnement des onduleurs*

L'onduleur choisi pour l'installation est l'onduleur Sunny Tripower CORE1.

**a) Puissance apparente**

L'équation (VI.8) à la page 76 est appliquée pour calculer la puissance apparente des onduleurs :

$$S_0 = \frac{P_0}{\cos \varphi_0} \text{ Avec } P_0 = \frac{P_c}{\eta_{ond}}$$

$$S_0 = \frac{P_0}{\cos \varphi_0 \cdot \eta_{ond}}$$

$$P_c = 281 \text{ [kVA]} ; \cos \varphi_0 = 1 \text{ et } \eta_{ond} = 0,98$$

$$S_0 = 286 \text{ [kVA]}$$

**b) Nombre d'onduleurs nécessaires**

La relation (VI.9) à la page 77 permet de calculer le nombre d'onduleurs nécessaires :

$$N_{ond} = \frac{S_0}{P_u} \text{ Avec } S_0 = 286 \text{ [kVA]} \text{ et } P_u = 50 \text{ [kVA]}$$

$$N_{ond} = 6 \text{ [onduleurs]}$$

*X.2.4 Dimensionnement des onduleurs chargeurs*

L'onduleur chargeur choisi pour l'installation est l'onduleur SI 8.0 H.

**a) Puissance apparente**

Pour calculer la puissance apparente de l'onduleur chargeur, on applique l'équation (VI.11) à la page 77 :

$$S_{ondCharg} \geq \frac{S_0}{2}$$

$$S_{ondCharg} \geq 143 \text{ [kVA]}$$

**b) Nombre d'onduleurs chargeurs**

Afin de calculer le nombre d'onduleurs chargeurs nécessaires pour l'installation, on applique la relation (VI.12) à la page 77 :

$$N_{ondCharg} = \frac{S_{ondCharg}}{P_{uOndCharg}} \text{ Avec } P_{uOndCharg} = 8 [kVA] \text{ et } S_{ondCharg} = 143 [kVA]$$

$$N_{ondCharg} = 18 [\text{onduleurs chargeurs}]$$

L'utilisation d'un Multicluster box est nécessaire pour ce système. Le Multicluster box permet des installations off-grid de 30 à 300 kWc. Deux à 36 clusters triphasés constitués de trois SI 8.0H peuvent être connectés en parallèle. Les Multicluster Box sont spécialement conçus comme des centres de distribution AC pour le raccordement de générateurs et de charges à alimenter. Celui correspondant au système est le MCB 36.3.

*X.2.5 Dimensionnement des câbles DC (des panneaux solaires vers les onduleurs)*

**a) Tension nominale totale**

Pour calculer la tension nominale totale, on applique l'équation (VI.12) à la page 77 :

$$U_{nom,tot} = N_s \cdot U_n \text{ Avec } N_s = 14 \text{ et } U_n = 54,7 [V]$$

$$U_{nom,tot} = 765,8 [V]$$

**b) Courant maximal fourni par un string**

Le calcul du courant maximal fourni par un string se fait en appliquant la relation (VI.13) à la page c)78.

$$I_{max,string} = 1,25 \cdot I_{cc,STC} \text{ Avec } I_{cc,STC} = 6,46 [A]$$

$$I_{max,string} = 8,08 [A]$$

**c) Calcul de la section des câbles**

On applique l'équation (VI.14) à la page 78 pour calculer la section des câbles :

$$S_{DC} = \frac{\rho_{DC} \cdot L_{DC} \cdot I_{max,string}}{\varepsilon_{DC} \cdot U_{nom,tot}} \text{ Avec } \rho_{DC} = 0,023 [\Omega \cdot mm^2/m] ; L_{DC} = 150 [m] \text{ et } \varepsilon_{DC} = 0,02 [V]$$

$$S_{DC} = 3,6 [mm^2]$$

La section directement supérieure à 3,6 [mm<sup>2</sup>] dans le catalogue des sections de câbles (Annexe 5) est 4 [mm<sup>2</sup>].

*X.2.6 Dimensionnement des câblages AC*

La section des câbles AC est obtenue en appliquant la relation (VI.15) à la page 78 :

$$S_{AC} = \frac{\rho_{AC} \cdot L_{AC} \cdot I_{max} \cdot b \cdot \cos \varphi}{\varepsilon_{AC} \cdot U_{nom}} \text{ Avec } \rho_{AC} = 0,0179 [\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}] ; L_{AC} = 20 [\text{m}] ; I_{max} = 30 [\text{A}] ; U_{nom} = 220 [\text{V}] ;$$

$$b = 1 ; \cos \varphi = 1 \text{ et } \varepsilon_{AC} = 0,03 [\text{V}]$$

$$S_{AC} = 15,64 [\text{mm}^2]$$

La section directement supérieure à 13,64 [mm<sup>2</sup>] dans le catalogue des sections de câbles (Annexe 5) est 16 [mm<sup>2</sup>].

### *X.3 Récapitulation des résultats*

Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus pour le dimensionnement de la centrale solaire photovoltaïque correspondante à la Commune Rurale de Mahasolo.

## Partie III : PRESENTATION DU PROJET

Tableau IX. 8 : Récapitulation des caractéristiques des éléments constitutifs de la centrale (dimensionnement manuel)

<b>CHAMP PHOTOVOLTAÏQUE</b>	
Type de module	Polycristalin
Puissance crête d'un module [Wc]	327
Puissance crête totale du champ [kW]	281
Nombre	860
<b>BATTERIES</b>	
Type	Batterie au plomb
Capacité C <sub>10</sub> [Ah]	3 488
Tension nominale [V]	2
Coefficient de décharge [%]	80
Capacité totale [kAh]	1 499,84
Nombre	430
<b>ONDULEURS</b>	
Type	Triphasé
Puissance DC max. (pour cos φ = 1) [W]	51 000
Plage de tension MPPT / tension d'entrée assignée [V]	150 à 1 000 / 500 à 800
Plage de tension AC [V]	365 - 465
Puissance assignée [VA]	50 000
Facteur de puissance	1
Rendement [%]	98
Fréquence [Hz]	50
Nombre	6
<b>ARMOIRE DE DISTRIBUTION AC</b>	
Nombre maximal des onduleurs chargeurs	36
Puissance nominale des onduleurs chargeurs [kW]	216
Nombre	1
<b>ONDULEURS CHARGEURS</b>	
Puissance unitaire	8 000 W
Tension nominale AC (réglable) [V]	230 (202 – 253)
Fréquence nominale [Hz]	50
Courant assigné AC [A]	20
Facteur de puissance	-1 à +1
Tension d'entrée (plage) [V]	230 (172,5 – 264,5)
Courant d'entrée AC max. (réglable) [A]	50
Puissance d'entrée maximale [kVA]	11,5
Nombre	18
<b>SECTION DES CÂBLES</b>	
DC	4 [mm <sup>2</sup> ]
AC	16 [mm <sup>2</sup> ]

### *X.4 Résultats obtenus avec le logiciel Sunny Design*

Les données à entrer dans le logiciel pour le dimensionnement sont : le lieu de l'installation, la puissance crête du champ photovoltaïque et la courbe de charge journalière. Le logiciel nous donne ensuite la liste complète des composants utiles pour l'installation. Sunny Design est pratique pour un bon dimensionnement car il garantit la suffisance du champ photovoltaïque par rapport aux charges et la compatibilité des onduleurs qu'on peut combiner<sup>16</sup>. Le logiciel donne le pourcentage mensuel de part consommé en énergie photovoltaïque à titre indicatif.

#### *X.4.1 Puissance crête des modules*

La valeur de la puissance crête du champ photovoltaïque est celle obtenue avec la formule (VI.4) conseillée par sma à la page 73.

$$P_{c,sma} = \frac{E_a \cdot 1,3}{E_{pv}}$$

$$E_a = 798 \times 365 \text{ [kWh/a]}$$

$$E_{pv} = 1\,700 \text{ [kWh/a/kWc]}$$

La puissance crête des modules est :

$$P_{c,sma} = 223 \text{ [kWc]}$$

---

<sup>16</sup> Possibilité de connecter trois types d'onduleur au maximum

*X.4.2 Récapitulation des résultats avec Sunny Design*

Le tableau ci-après illustre le résultat du dimensionnement avec le logiciel Sunny Design.

Tableau IX. 9 : Récapitulation des composants dimensionnés avec le logiciel Sunny Design

<b>CHAMP PHOTOVOLTAÏQUE</b>	
Type de module	Polycristallin
Puissance unitaire [W]	270
Nombre	826
<b>ONDULEURS</b>	
Type d'onduleur	Triphasé
Puissance unitaire [kW]	50
Nombre	5
<b>ARMOIRE DE DISTRIBUTION AC</b>	
Nombre maximal de Sunny Island	36
Puissance nominale des Sunny Island [kW]	216
Nombre	1
<b>ONDULEUR CHARGEUR</b>	
Puissance unitaire [kW]	6
Nombre	21
<b>BATTERIES</b>	
Type	Plomb
Capacité unitaire C <sub>10</sub> [Ah]	3 220 [Ah]
Capacité totale [kAh]	805
Nombre	250
<b>GENSET (GROUPE ELECTROGENE)</b>	
Puissance active	88 [kW]
Efficacité énergétique moyenne	3,5 [kWh/l]
<b>SECTION DES CABLES</b>	
DC	6 [mm <sup>2</sup> ]
BT	16 [mm <sup>2</sup> ]

## *Chapitre XI : Analyse financière avec le logiciel RETScreen*

### *XI.1 Hypothèses*

Pour ce présent projet, nous allons faire une analyse en utilisant la méthode 2 du logiciel dans lequel les données que nous avons déterminées précédemment seront utilisées. Nous allons effectuer l'analyse de rentabilité financière des deux dimensionnements qui ont été faits.

Le cas de référence choisi pour l'analyse est l'utilisation d'un groupe électrogène qui fournirait une même puissance que l'installation photovoltaïque qui est le cas proposé. Le logiciel va donc comparer ces deux types de technologie.

### *XI.2 Analyse financière pour le dimensionnement manuel*

#### *XI.2.1 Données d'entrée*

Pour que le logiciel RETScreen puisse évaluer la viabilité financière du projet des données bien précises sont à entrer dans les feuilles de calcul : modèle énergétique, analyse des coûts et analyse financière.

#### **a) Feuille de calcul « Modèle énergétique »**

Les données entrées dans la feuille de calcul modèle énergétique sont résumé dans le tableau ci-dessous.

Tableau XI. 1 : Système de production d'électricité du cas de référence

<b>Technologie</b>	Moteur à pistons <sup>17</sup>
<b>Type de combustible</b>	Diesel (mazout #2) - L
<b>Prix du combustible [Ar/l]</b>	3 400
<b>Capacité [kW]</b>	300

#### **b) Feuille de calcul « Analyse des coûts »**

Dans la feuille de calcul analyse des coûts les coûts d'investissement et d'exploitation sont à remplir. On trouve ces valeurs dans le tableau ci-après.

<sup>17</sup> Modèle du groupe électrogène dans le logiciel RETScreen

## Partie III : PRESENTATION DU PROJET

Tableau XI. 2 : Coût d'investissement et coût d'exploitation du dimensionnement manuel [12] [35]

<b>COÛT D'INVESTISSEMENT</b>						
	Coût unitaire [Ar]	Quantité	Coût total [Ar]	DD	TVA	Coût total TTC [Ar]
Panneau solaire	1 412 151	860	1 214 449 860	0%	0%	<b>1 214 449 860</b>
Batteries	5 421 000	328	1 778 088 000	0%	0%	<b>1 778 088 000</b>
Onduleur PV	18 591 300	6	111 547 800	5%	20%	<b>140 550 228</b>
Onduleur chargeur	11 712 000	18	210 816 000	5%	20%	<b>258 987 456</b>
Armoire de distribution AC	48 673 480	1	48 673 480	5%	20%	<b>59 795 370</b>
Accessoires (fusibles, supports, câbles, ...)	620 000 000	1	620 000 000	5%	20%	<b>761 670 000</b>
Compteur intelligent 5 Ampères	137 200	222	30 458 400	5%	20%	<b>38 377 584</b>
Compteur intelligent 60 Ampères monophasé	205 800	174	35 809 200	5%	20%	<b>45 119 592</b>
Compteur intelligent 60 Ampère triphasé	343 000	18	6 174 000	5%	20%	<b>7 779 240</b>
Compteur intelligent totaliseur	514 500	3	1 543 500	5%	20%	<b>1 944 810</b>
Accessoires pour les compteurs intelligents	4 630 500	1	4 630 500	5%	20%	<b>5 834 430</b>
Main d'œuvre	14 742 000	10	147 420 000	0%	20%	<b>176 904 000</b>
Réseau et mise en service	4 489 500 570	30%	1 346 850 171	0%	20%	<b>1 616 220 205</b>
Transport	11 700 000	1	11 700 000	0%	20%	<b>14 040 000</b>
Frais imprévus	6 119 760 774	10%	611 976 077	0%	0%	<b>611 976 077</b>

### Partie III : PRESENTATION DU PROJET

<b>COÛT D'INVESTISSEMENT TOTAL</b>			<b>6 731 736 851</b>
<b>COÛTS ANNUELS</b>			
	Coût unitaire [Ar]	Quantité	Coût total [Ar/an]
Deux techniciens (coût)	1 000 000	12	12 000 000
Deux gardiens (coût)	600 000	12	7 200 000
Matériels et équipements	8 400 000	1	8 400 000
<b>COÛT ANNUEL TOTAL</b>			<b>27 600 000</b>
<b>REVENUS ANNUELS</b>			
	Montant unitaire [Ar]	Quantité	Montant total [Ar/an]
Prix annuel du kWh (crédit) <sup>18</sup>	Tarif productif (06h à 18h)	1 200	276 162
	Tarif de base (18h à 21h)	1 500	40 824
	Tarif nuit (21h à 06h)	1 800	16 160
Frais de raccordement et redevance (crédit)	4 926 452	12	59 117 429
<b>REVENU ANNUEL TOTAL</b>			<b>480 836 481</b>
<b>COÛTS PERIODIQUES</b>			
	An	Coût unitaire [Ar]	Coût total [Ar]
Changement onduleurs	10	36 038 520	36 038 520
Changement batteries	5	455 920 000	455 920 000

<sup>18</sup> Consommation annuelle sur 25 ans : Annexe 6

- Coût du kilowattheure

En appliquant la formule (VII.1) dans la page 83 on obtient le coût du kilowattheure.

$$C_{kWh} = \frac{C+A+C_{exp}+T_C-ES}{E_{tot,v}} \text{ Avec } T_C = \text{Capitiaux}_{propres} 10\% ; A = \frac{\text{Capitiaux}_{propres}}{d} \text{ et } ES = C \cdot 20\%$$

On a pris  $d = 15$  ans

D'où,

$$C_{kWh} = 1\,080,29 \text{ [Ar/kWh]}$$

- Tarif du kilowattheure

Le tarif du kilowattheure est obtenu en utilisant la formule (VII.2) dans la page 83.

$$T_{kWh} = C_{kWh} + M_b + TVA \text{ Avec } M_b = C_{kWh} \cdot 20\% \text{ et } TVA = C_{kWh} \cdot M_b \cdot 20\%$$

D'où,

$$T_{kWh} = 1\,555,61 \text{ [Ar/kWh]}$$

### c) Feuille de calcul « Analyse financière »

Les données à remplir dans la feuille de calcul analyse financière sont les paramètres financiers et le financement du projet. Le tableau ci-dessous illustre ces données.

Tableau XI. 3 : Paramètres financiers, financement et impôt sur le revenu du projet pour le dimensionnement manuel [18]

PARAMETRES FINANCIERS	
Taux d'inflation [%]	7
Taux d'actualisation [%]	15
Durée de vie du projet [an]	25
FINANCEMENT	
Encouragement et subvention [%]	20
ANALYSE D'IMPOT SUR LE REVENU	
Taux d'imposition sur le revenu [%]	20
Méthode d'amortissement	Linéaire
Allocation du coût en capital [%]	10
Période d'amortissement [an]	15

#### XI.2.2 Données de sortie (feuille de calcul « Analyse financière »)

Après avoir rempli toutes les feuilles de calcul le logiciel donne en sortie toutes les informations pour évaluer la viabilité financière du projet.

### a) Recette annuelle

Le tableau ci-après illustre la recette moyenne annuelle sur 25 ans.

Tableau XI. 4 : Recette annuelle (dimensionnement manuel)

Exploitation [Ar]	453 233 625
<b>Total de la recette annuelle [Ar]</b>	<b>453 233 625</b>

### b) Viabilité financière

Le tableau suivant contient tous les paramètres nécessaires pour évaluer la viabilité financière du projet.

Tableau XI. 5 : Paramètres de viabilité financière du projet (dimensionnement manuel)

<b>TRI avant impôt - capitaux propres [%]</b>	16,5
<b>TRI avant impôt – actifs [%]</b>	16,5
<b>TRI après impôt - capitaux propres [%]</b>	15,1
<b>TRI après impôt – actifs [%]</b>	15,1
<b>Retour simple [an]</b>	7,7
<b>Retour sur les capitaux propres [an]</b>	7
<b>Valeur Actualisée Nette (VAN) [Ar]</b>	37 486 532
<b>Économies annuelles sur la durée de vie [Ar/an]</b>	5 799 144

**c) Les flux monétaires annuels**

La figure suivante représente le graphique des flux monétaires cumulatifs durant la durée de vie du projet.

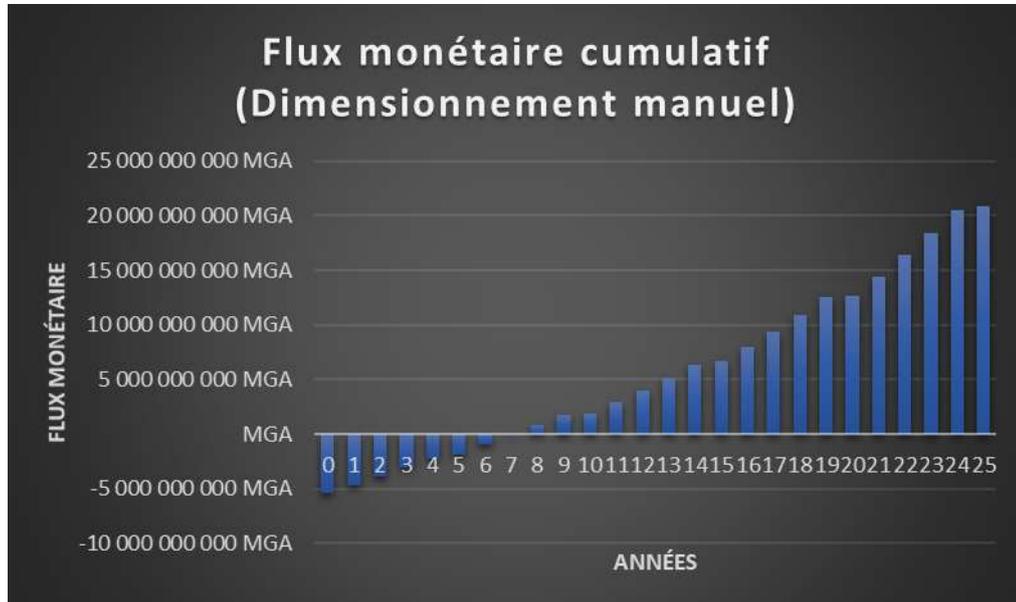


Figure XI. 1 : Graphique du flux monétaire cumulatif (dimensionnement manuel)

**XI.3 Analyse financière pour le dimensionnement avec le logiciel Sunny Design**

**XI.3.1 Données d'entrée**

Pour que le logiciel RETScreen puisse évaluer la viabilité financière du projet des données bien précises sont à entrer dans les feuilles de calcul : modèle énergétique, analyse des coûts et analyse financière.

**a) Feuille de calcul « Modèle énergétique »**

Les données entrées dans la feuille de calcul modèle énergétique sont résumé dans le tableau ci-dessous.

Tableau XI. 6 : Système de production d'électricité du cas de référence

<b>Technologie</b>	Moteur à pistons <sup>19</sup>
<b>Type de combustible</b>	Diesel (mazout #2) – L
<b>Prix du combustible [Ar/l]</b>	3 400
<b>Capacité [kW]</b>	300

<sup>19</sup> Modèle du groupe électrogène dans le logiciel RETScreen

### **b) Feuille de calcul « Analyse des coûts »**

Dans la feuille de calcul analyse des coûts les coûts d'investissement et d'exploitation sont à remplir. On trouve ces valeurs dans le tableau ci-après.

## Partie III : PRESENTATION DU PROJET

Tableau XI. 7 : Coût d'investissement et coût d'exploitation du dimensionnement avec Sunny Design [12] [35]

<b>COÛT D'INVESTISSEMENT</b>						
	Coût unitaire [Ar]	Quantité	Coût total [Ar]	DD	TVA	Coût total TTC [Ar]
Panneau solaire	1 368 900	826	1 130 711 400	0%	0%	<b>1 130 711 400</b>
Batteries	5 343 000	250	1 335 750 000	0%	0%	<b>1 335 750 000</b>
Onduleur PV	18 591 300	5	92 956 500	5%	20%	<b>117 125 190</b>
Onduleur chargeur	11 419 200	21	239 803 200	5%	20%	<b>302 152 032</b>
Armoire de distribution AC	47 456 643	1	47 456 643	5%	20%	<b>59 795 370</b>
Accessoires (fusibles, supports, câbles, ...)	585 000 000	1	585 000 000	5%	20%	<b>737 100 000</b>
Groupe électrogène	21 621 600	1	21 621 600	5%	20%	<b>27 243 216</b>
Compteur intelligent 5 Ampères	137 200	222	30 458 400	5%	20%	<b>38 377 584</b>
Compteur intelligent 60 Ampères monophasé	205 700	174	35 809 200	5%	20%	<b>45 119 592</b>
Compteur intelligent 60 Ampères triphasé	343 000	18	6 174 000	5%	20%	<b>7 779 240</b>
Compteur intelligent totaliseur	514 500	3	1 543 500	5%	20%	<b>1 944 810</b>
Accessoires pour les compteurs intelligents	4 630 500	1	4 630 500	5%	20%	<b>5 834 430</b>
Transport	11 700 000	1	11 700 000	0%	20%	<b>14 040 000</b>
Réseaux et mise en service	3 960 564 864	30%	1 188 169 459	0%	20%	<b>1 425 803 351</b>
Main d'œuvre	12 636 000	10	126 360 000	0%	20%	<b>151 632 000</b>
Frais imprévus	5 401 106 759	10%	540 110 676	0%	0%	<b>540 110 676</b>

### Partie III : PRESENTATION DU PROJET

<b>COÛT D'INVESTISSEMENT TOTAL</b>				<b>5 941 217 435</b>
<b>COÛTS ANNUELS</b>				
		Coût unitaire [Ar]	Quantité	Coût total [Ar/an]
Deux techniciens (coût)		1 000 000	12	12 000 000
Deux gardiens (coût)		600 000	12	7 200 000
Matériels et équipements (coût)		4 186 200	1	4 186 200
Coût diesel et huile pour le groupe électrogène (coût)		20 800 000	1	20 800 000
<b>COÛT ANNUEL TOTAL</b>				<b>44 186 200</b>
<b>REVENUS ANNUELS</b>				
		Montant unitaire [Ar]	Quantité	Montant total [Ar/an]
Prix annuel du kWh (crédit) <sup>20</sup>	Tarif productif (06h à 18h)	1 200	260 017	312 020 729
	Tarif de base (18h à 21h)	1 500	38 438	57 656 326
	Tarif nuit (21h à 06h)	1 800	15 215	27 387 315
Frais de raccordement et redevance (crédit)		4 463 278	12	53 559 346
<b>REVENU ANNUEL TOTAL</b>				<b>450 623 716</b>
<b>COÛTS PERIODIQUES</b>				
		An	Coût unitaire [Ar]	Coût total [Ar]
Changement onduleurs		10	30 032 100	30 032 100
Changement batteries		5	342 500 000	342 500 000

<sup>20</sup> Consommation annuelle sur 25 ans : Annexe 6

a) Coût du kilowattheure

En appliquant la formule (VII.1) dans la page 83 on obtient le coût du kilowattheure.

$$C_{kWh} = \frac{C+A+C_{exp}+T_C-ES}{E_{totv}} \text{ Avec } T_C = \text{Capitiaux}_{propres} 10\% ; A = \frac{\text{Capitiaux}_{propres}}{d} \text{ et } ES = C \cdot 20\%$$

D'où,

$$C_{kWh} = 1\,105,78 \text{ [Ar/kWh]}$$

b) Tarif du kilowattheure

Le tarif du kilowattheure est obtenu en utilisant la formule (VII.2) dans la page 83.

$$T_{kWh} = C_{kWh} + M_b + TVA \text{ Avec } M_b = C_{kWh} \cdot 20\% \text{ et } TVA = C_{kWh} \cdot M_b \cdot 20\%$$

D'où,

$$T_{kWh} = 1\,592,32 \text{ [Ar/kWh]}$$

**c) Feuille de calcul « Analyse financière »**

Les données à remplir dans la feuille de calcul analyse financière sont les paramètres financiers et le financement du projet. Le tableau ci-dessous illustre ces données.

Tableau XI. 8 : Paramètres financiers, financement et analyse d'imposition sur le revenu du projet pour le dimensionnement avec Sunny Design [18]

PARAMETRES FINANCIERS	
Taux d'inflation [%]	7
Taux d'actualisation [%]	15
Durée de vie du projet [an]	25
FINANCEMENT	
Encouragement et subvention [%]	20
ANALYSE D'IMPOT SUR LE REVENU	
Taux d'imposition sur le revenu [%]	20
Méthode d'amortissement	Linéaire
Allocation du coût en capital [%]	10
Période d'amortissement [an]	15

**XI.3.2 Données de sortie (feuille de calcul « Analyse financière »)**

Après avoir rempli toutes les feuilles de calcul le logiciel donne en sortie toutes les informations pour évaluer la viabilité financière du projet.

**a) Recette annuelle**

Le tableau ci-après illustre la recette annuelle.

Tableau XI. 9 : Recette annuelle (dimensionnement avec Sunny Design)

Exploitation [Ar]	405 807 522
<b>Total des recettes annuelles [Ar]</b>	<b>405 807 522</b>

**b) Viabilité financière**

Le tableau suivant contient tous les paramètres nécessaires pour évaluer la viabilité financière du projet.

Tableau XI. 10 : Paramètres de viabilité financière du projet (dimensionnement avec Sunny Design)

TRI avant impôt - capitaux propres [%]	19,7
TRI avant impôt – actifs [%]	19,7
TRI après impôt - capitaux propres [%]	16,4
TRI après impôt – actifs [%]	16,4
Retour simple [an]	6,3
Retour sur les capitaux propres [an]	6,9
Valeur Actualisée Nette (VAN) [Ar]	477 975 615
Économies annuelles sur la durée de vie [Ar/an]	73 942 542

**c) Les flux monétaires annuels**

La figure suivante représente le graphique des flux monétaires cumulatifs durant la durée de vie du projet.

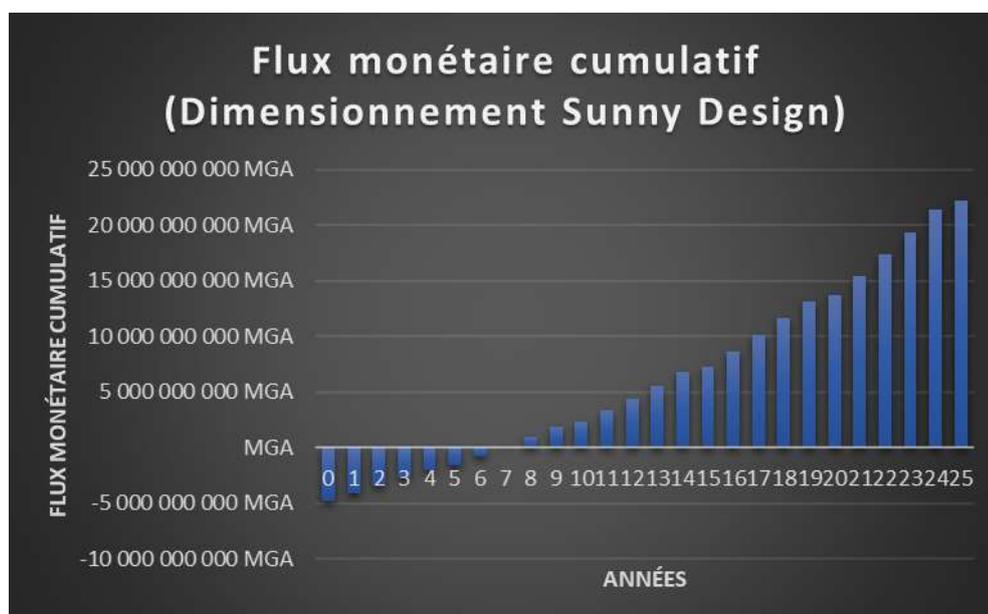


Figure XI. 2 : Graphique du flux monétaire cumulatif (dimensionnement avec Sunny Design)

## *Chapitre XII : Discussion*

### *XII.1 Besoins énergétiques de la Commune*

Habituellement, dans les pays en voie de développement la puissance de pointe journalière est atteinte entre 19h et 20h [38], il s'agit des horaires durant lesquels les ménages utilisent le plus leurs équipements. Mais pour la Commune Rurale de Mahasolo, cette valeur est atteinte entre 11h et 11h 30. Cet horaire se justifie par l'horaire d'utilisation des équipements électriques des usagers productifs, des institutions publiques et des ménages et de leur nombre respectif. En effet, l'énergie consommée par les usagers productifs la matinée est plus importante que celle consommée par les ménages la soirée, d'où l'atteinte de la puissance de pointe de 11h à 11h30.

### *XII.2 Comparaison des résultats de dimensionnement calculés manuellement et ceux obtenus à partir du logiciel Sunny Design*

Le tableau ci-dessous montre les résultats du dimensionnement manuel et ceux avec le logiciel Sunny Design.

## Partie III : PRESENTATION DU PROJET

Tableau XII. 1 : Tableau comparatif des composants du dimensionnement manuel et celui avec Sunny Design

	Dimensionnement manuel	Dimensionnement avec Sunny Design
<b>CHAMP PHOTOVOLTAÏQUE</b>		
Type de panneau	Polycristallin	Polycristallin
Puissance crête d'un panneau [Wc]	327	270
Puissance crête totale du champ [kWc]	281	223,02
Nombre	860	826
<b>BATTERIES</b>		
Type	Batterie au plomb	Batterie au plomb
Capacité C <sub>10</sub> [Ah]	3 488	3 220
Tension nominale [V]	2	2
Coefficient de décharge [%]	80	80
Nombre de jours d'autonomie	3	1,9
Nombre	430	250
<b>ONDULEURS</b>		
Type	Triphasé	Triphasé
Puissance DC max. (pour cos φ = 1) [W]	51 000	50 000
Nombre	6	5
<b>ARMOIRE DE DISTRIBUTION AC</b>		
Nombre maximal d'onduleurs chargeurs	36	36
Puissance nominale des onduleurs chargeurs [kW]	216	216
Nombre	1	1
<b>ONDULEURS CHARGEURS</b>		
Puissance unitaire [kW]	8	6
Nombre d'onduleurs	18	21
<b>SECTION DES CÂBLES</b>		
DC [mm <sup>2</sup> ]	4	6
BT [mm <sup>2</sup> ]	16	16
<b>GENSET (GROUPE ELECTROGENE)</b>		
Puissance active		88 [kW]
Efficacité énergétique moyenne		3,5 [kWh/l]

Pour la puissance crête du champ, la valeur calculée manuellement dépasse de 57,98 kWc celle obtenue en utilisant la formule conseillée par sma. Or, le système photovoltaïque calculé avec la formule conseillée par sma ne couvre pas la consommation toute l'année, il est alors nécessaire

d'utiliser un groupe électrogène. Le tableau ci-dessous illustre l'hypothèse de consommation énergétique effectuée par le logiciel Sunny Design.

Tableau XII. 2 : Hypothèse de consommation d'énergie photovoltaïque et de carburant mensuel (source : Sunny Design)

Mois	Degré de couverture solaire [%]	Part consommée d'énergie photovoltaïque [%]	Consommation de carburant [l]
Janvier	100	76	0
Février	93	80	415
Mars	100	85	0
Avril	100	86	0
Mai	93	89	440
Juin	89	85	679
Juillet	92	90	515
Août	100	83	0
Septembre	100	68	0
Octobre	100	73	0
Novembre	100	76	0
Décembre	100	81	0

Pour le stockage de l'énergie, la durée d'autonomie du dimensionnement avec le logiciel Sunny Design est de 1,9 jours alors qu'elle a été fixée à 3 jours pour le dimensionnement manuel. Les onduleurs pour les deux dimensionnements ont la même puissance mais le nombre d'onduleur du dimensionnement manuel excède de 1 celui avec Sunny Design car la puissance crête du champ photovoltaïque du dimensionnement manuel est plus grande que celle du dimensionnement avec Sunny Design. Les puissances unitaires des onduleurs chargeurs sont différentes pour les deux dimensionnements, c'est pour cela que celui avec Sunny Design excède de 3 le nombre d'onduleurs chargeurs calculé manuellement.

### *XII.3 Comparaison de l'analyse financière du dimensionnement manuel et celui avec Sunny Design*

Le tableau ci-dessous présente une comparaison des paramètres financiers du dimensionnement manuel et celui avec Sunny Design.

## Partie III : PRESENTATION DU PROJET

Tableau XI. 11 : Tableau comparatif des paramètres financiers du dimensionnement manuel avec celui par Sunny Design

Paramètres financiers	Dimensionnement manuel	Dimensionnement avec Sunny Design
Coût du kWh [Ar/kWh]	1 080,29	1 105,78
Tarif minimum du kWh [Ar/kWh]	1 555,61	1 592,32
Prix de vente du kWh [Ar/kWh]	Tarif productif (06h à 18h)	1 200
	Tarif de base (18h à 21h)	1 500
	Tarif nuit (21h à 06h)	1 800
TRI avant impôt - capitaux propres [%]	16,5	19,7
TRI avant impôt – actifs [%]	16,5	19,7
TRI après impôt - capitaux propres [%]	15,1	16,4
TRI après impôt – actifs [%]	15,1	16,4
Retour simple [an]	7,7	6,3
Retour sur les capitaux propres [an]	7	6,9
Valeur Actualisée Nette (VAN) [Ar]	37 486 532	477 975 615
Économies annuelles sur la durée de vie [Ar/an]	5 799 144	73 942 542

D'après ce tableau, les coût et tarif minimum du kilowattheure du dimensionnement manuel est plus bas que ceux du dimensionnement avec Sunny Design, ce qui s'explique par les coûts d'exploitation, en effet l'entretien et l'utilisation du groupe électrogène engendre des coûts supplémentaires (diesel, huile, ...). Du point de vue viabilité, que ce soit pour le dimensionnement manuel ou celui avec le logiciel Sunny Design, la rentabilité du projet est prouvée. En effet, pour les deux dimensionnements, le TRI après impôt est supérieur au taux d'actualisation (15%) ; de plus, la VAN est positive. Dès la septième année, des bénéfices sont cumulés. Si de plus, des procédures pour obtenir des revenus pour la réduction de GES sont entreprises et le taux de subvention augmente, d'autres économies seraient ajoutées au revenu annuel du projet.

### XII.4 Analyse d'impacts environnementaux

#### XII.4.1 Environnement acoustique

En phase chantier il y a émissions de bruit (circulation d'engins de chantier et opérations de travaux et d'assemblage des équipements internes à l'installation). En phase d'exploitation, la centrale de production photovoltaïque ne produit aucune émission acoustique aux abords immédiats des locaux techniques (onduleurs). Pas d'émission sonore de nuit ni sur la santé humaine ni sur l'environnement acoustique. Il n'y a pas de vibration.

#### XII.4.2 Pollution des eaux

Il n'existe aucun impact sur la qualité des eaux superficielles et souterraines.

#### XII.4.3 Pollution de l'air

En phase de chantier, les travaux de construction de la centrale photovoltaïque et la circulation des engins de travaux peuvent générer un dégagement de poussières qui peuvent affecter la qualité de l'air, en cas de temps sec et venté. En phase d'exploitation, il n'y a aucun rejet atmosphérique.

Le projet de production d'électricité du cas proposé n'émet aucun Gaz à Effet de Serre (GES) pour le dimensionnement manuel. Par contre, avec le dimensionnement de Sunny Design, un groupe électrogène est utilisé pour le back-up ; par conséquent il y a émission de GES pour le dimensionnement avec Sunny Design. Le tableau ci-après représente le sommaire des réductions d'émission de GES pour le projet pour le dimensionnement manuel et celui avec Sunny Design.

Tableau XII. 3 : Sommaire des réductions d'émission de GES

	Dimensionnement manuel	Dimensionnement avec Sunny Design
<b>Emission de GES du cas de référence [tCO<sub>2</sub>]</b>	912	912
<b>Emission de GES du cas proposé [tCO<sub>2</sub>]</b>	0	63,6
<b>Réduction annuelle nette d'émissions de GES [tCO<sub>2</sub>]</b>	912	848
<b>Equivalence en automobiles et camions légers non-utilisés</b>	167	155

D'après le tableau ci-dessus, pour le dimensionnement manuel ce projet ne produit pas de GES. La réduction annuelle nette d'émission de gaz à effet de serre est de 912 tonnes de CO<sub>2</sub>, ce qui est équivalent à 167 voitures et camions légers non-utilisés. Par contre, pour le dimensionnement avec Sunny Design, il y a une émission de GES de 63,6 tonnes de CO<sub>2</sub> par an car il y a utilisation de groupe électrogène, la réduction annuelle d'émission de GES est alors de 848 tonnes de CO<sub>2</sub>, ce qui est équivalent à 155 voitures et camions légers non-utilisés.

#### XII.4.4 Champ électromagnétique

Ce champ est produit principalement par les onduleurs, il n'a aucun impact en choisissant un site à une grande distance (à 1 000 m) des habitants.

#### XII.4.5 Déchets

En phase de chantier et de démantèlement, il y a production de déchets mais aucun déchet ne sera produit en phase d'exploitation.

### *XII.4.6 Sol et sous-sol*

En phase de chantier il y a risques de pollution par déversement de produits dangereux, au plus sur les premiers centimètres du sol. En phase d'exploitation il n'y a pas risque d'érosion du sol par l'écoulement des eaux pluviales en répartissant les points d'écoulement sur une parcelle enherbée.

### *XII.4.7 Ressources en eau*

Le projet n'a aucun effet sur le libre écoulement des eaux. Il n'y a aucune fuite de produits chimiques possible par casse de panneaux, de par la technologie retenue.

### *XII.4.8 Climatologie*

En phase d'exploitation il a possibilité de modifications de température, très localisées aux abords immédiats des modules :

- Légère baisse de la température sous les modules, en raison du recouvrement du sol engendré par l'ombre générée.
- Elévation des températures à proximité immédiate des surfaces de panneaux, sensibles à l'irradiation solaire.

### *XII.4.9 Risques naturels*

Il n'existe aucun effet susceptible d'entraîner une augmentation des risques naturels, ni leurs conséquences, et pas de sensibilité particulière vis-à-vis de ces risques. Il y a cependant risque d'incendie de par la nature des équipements, lié à :

- Un impact par la foudre
- Un défaut de conception entraînant la surchauffe d'un module
- Un incendie d'origine externe,
- Une défaillance ou un dysfonctionnement électrique

### *XII.4.10 Paysage*

En phase de chantier il y a intervention d'engins de chantier, ce qui engendre une nuisance visuelle. En phase d'exploitation il y a modification des perceptions visuelles depuis les espaces proches et une perception partielle des équipements techniques. Le projet n'implique pas de modification profonde du paysage et de son image mais une évolution visuelle minime à la portée géographique contenue.

### *XII.4.11 Faune*

En phase de chantier, il y a existence d'impact potentiel aux nuisances sonores. Il n'y a aucun effet négatif vis-à-vis de la faune en phase d'exploitation.

### *XII.5 Recommandations*

La compatibilité des différents composants n'est pas assurée pour le dimensionnement manuel. Mais celui avec Sunny Design assure la compatibilité entre tous les composants de l'installation. Par exemple, avec Sunny Design, trois types d'onduleurs au maximum peuvent être choisis pour l'installation, et leur compatibilité avec le champ photovoltaïque est assurée. De plus, nous avons constaté que l'investissement pour le dimensionnement avec Sunny Design revenait plus vite que celui du dimensionnement manuel. Mais du point de vue environnement, le dimensionnement avec Sunny Design nécessite l'utilisation d'un groupe électrogène qui est nocif pour l'environnement alors que le dimensionnement manuel ne produit aucun effet nocif pour l'environnement. Par conséquent, nous recommandons d'appliquer le dimensionnement avec le logiciel Sunny Design pour la réalisation du projet en limitant en minimum l'utilisation du groupe électrogène.

Concernant l'analyse financière, les résultats de l'analyse avec le logiciel RETScreen sont à titre indicatif pour la viabilité financière du projet. Pour le calcul de revenu sur la vente d'électricité, c'est une moyenne de consommation annuelle sur 25 ans qui a été utilisé. Par conséquent, les résultats sont estimés proches de la réalité mais des paramètres comme la fluctuation du coût du diesel n'y sont pas incluses, donc pour obtenir des résultats plus précis il faut compléter les paramètres non-incluses dans l'analyse du logiciel.

# CONCLUSION

L'exploitation des énergies renouvelables pour combler nos besoins énergétiques est en pleine expansion vue la diminution des ressources en énergies fossiles et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre. A Madagascar, l'électricité est majoritairement produite par des centrales thermiques alors que la grande île possède un grand potentiel en matière d'énergies renouvelables. Pour le cas de l'énergie solaire, Madagascar a un potentiel abondant très peu exploité. De plus, l'exploitation de l'énergie solaire s'avère rentable et intéressant pour les sites éloignés du réseau électrique. Un bon exemple d'un tel site est une centrale solaire photovoltaïque dans le chef-lieu de la Commune Rurale de Mahasolo.

Ce travail nous a permis en premier lieu d'obtenir des connaissances plus approfondies sur l'énergie solaire photovoltaïque comme son historique, ses principaux composants et les différents types d'installation.

Ensuite nous sommes passés par les méthodes de calcul de l'énergie photovoltaïque, le calcul des besoins énergétiques par l'intermédiaire de l'analyse socio-économique, le dimensionnement d'une centrale solaire photovoltaïque et l'analyse financière avec le logiciel RETScreen.

En appliquant les méthodologies avec les données du chef-lieu de la commune de Mahasolo nous avons pu déterminer la consommation énergétique journalière qui atteint les 798 kWh par jour à la cinquième année d'exploitation. Après obtention des données de rayonnement moyenne de Mahasolo à partir du logiciel pvGIS nous avons calculé la puissance crête des modules à installer, deux calculs ont été effectués, l'un utilisant la formule typique donnée en classe a donné 281 kWc et avec une autre formule pour un dimensionnement avec le logiciel Sunny Design on a obtenu 223 kWc. Nous avons effectué deux dimensionnements à partir de ces résultats, en premier, un dimensionnement manuel, et un autre avec le logiciel Sunny Design. La compatibilité des composants dimensionnés avec le logiciel Sunny Design est assurée contrairement à ceux dimensionnés manuellement.

Avec le logiciel RETScreen une analyse financière sur une durée de vie de 25 ans du projet a été effectuée. Le coût d'investissement total pour le dimensionnement manuel est de 6 731 736 851 Ariary, après l'entrée des données sur le système de production et les paramètres financiers, le retour sur les capitaux propres est de 7 ans avec une subvention de 20% et trois tarifs du kWh dépendant de l'heure de consommation : 1 200 Ariary de 06h à 18h, 1 500 Ariary de 18h à 21h et 1 800 Ariary de 21h à 06h. D'un autre côté, le coût d'investissement total pour le dimensionnement avec Sunny Design atteint les 5 941 217 435 Ariary, en appliquant les mêmes paramètres de subvention et de coût du kWh que pour le dimensionnement manuel, le retour sur les capitaux

propres du dimensionnement avec Sunny Design est de 6,9 ans. Les résultats d'analyse financière avec RETScreen sont à titre indicatif, ils sont proches de la réalité mais il faut considérer des paramètres comme la fluctuation du coût du diesel et l'augmentation annuelle de la consommation pour obtenir des résultats plus précis.

Pour l'émission de gaz à effet de serre, le dimensionnement manuel donne une réduction annuelle nette d'émissions de gaz à effet de serre de 912 tonnes de gaz carbonique tandis que pour le dimensionnement avec Sunny Design, la réduction annuelle nette d'émission de gaz à effet de serre est de 818 tonnes de gaz carbonique car l'hypothèse de consommation annuelle de Sunny Design nécessite l'utilisation d'un groupe électrogène de back up.

Par conséquent, pour la réalisation du projet, en connaissance de tous les paramètres technique, financier et environnementale nous recommandons l'utilisation des résultats de Sunny Design en réduisant au maximum l'utilisation du groupe électrogène pour diminuer l'émission de gaz à effet de serre.

Comme l'énergie photovoltaïque n'est pas limitée seulement aux applications autonomes et vue sa nature intermittente, son application on grid par des particuliers ou des industries afin d'augmenter la production électrique et de diminuer leur facture d'électricité en milieu déjà électrifié ainsi que sa combinaison avec d'autres sources d'énergies renouvelables pour l'électrification d'autres villages ruraux de Madagascar encore non-électrifiés serait intéressante.

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES

- [1] A.Zerga, F. Benyarou et B. Benyousef "Optimisation du rendement d'une cellule solaire N+P au Silicium Monocristallin" (consulté le 04 Août 2017)
- [2] Assistance pour le Développement d'une Nouvelle Politique de l'Energie et d'une Stratégie pour la République de Madagascar - Phases 2 et 3 Document d'Etude de la Politique et Stratégie de l'Energie, 04 Août 2015 (consulté le 11 Janvier 2018)
- [3] Bati-Actu (2013) Robot laveur (consulté le 04 Août 2017)
- [4] Belhadj Mohammed, "Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome", Mémoire de Magister, Université de Bechar, 2008 (consulté le 11 Septembre 2017)
- [5] Bulletin d'information trimestriel – N°01- Edition Juin 2017 (ADER) (consulté le 29 Janvier 2018)
- [6] Document d'application numero 10, Installations photovoltaïques ABB (consulté le 17 Janvier 2018)
- [7] Document de sensibilisation Accès à l'énergie Développement Energies renouvelables (Fondation énergies pour le monde, European Commission under the Intelligent Energy - Europe) (consulté le 11 Janvier 2018)
- [8] E. Karatepe, M. Boztepe and M. Colak "Neural Network Based Solar-Cell Model". Energy Conversion and Management, Vol. 47, N°9-10, pp. 1159-1178, 2006 (consulté le 04 Septembre 2017)
- [9] Edmond Becquerel - "Mémoire sur les effets électriques sous l'influence des rayons solaires", le 29 Juillet 1839 (consulté le 03 Août 2017)
- [10] Experimental results and simulation with TRNSYS of a 7.2 kWp grid-connected photovoltaic system. Applied Energy n°88, sur le site ScienceDirect.com (consulté le 04 Août 2017)
- [11] H. Kamelia "Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative", Mémoire de Magister en Electrotechnique, Faculté de Génie Electrique et d'Informatique, Département d'Electrotechnique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 25/06/2012 (consulté le 02 Septembre 2017)
- [12] <http://www.europe-solarstore.com> (consulté le 1er Août 2018)
- [13] <http://www.omh.mg/codes/importation%20annuelle.php> (consulté de 12 Janvier 2018)
- [14] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Albédo> (consulté le 15 Janvier 2018)
- [15] <https://www.ore.mg> (consulté le 23 Janvier 2018)
- [16] <https://www.planetoscope.com/natalite/5-croissance-de-la-population-mondiale-naissances---deces-.html> (consulté le 22 Janvier 2018)
- [17] I.Bendjamaa "Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque " Mémoire de Magister Université Abou-Baker Blkaid-Tlemcen 2011/2012 (consulté le 31 Août 2017)
- [18] Indice des prix à la consommation n°198, INSTAT (consulté le 03 Octobre 2017)
- [19] J.A. Gow and C.D. Manning "Development of a Photovoltaic Array Model for Use in Power Electronics Simulation Studies". IRR Proceedings on Electric Power Applications, Vol. 146, N°2, pp. 193-200, 1999 (consulté le 03 Septembre 2017)
- [20] Key world Energy Statistics 2015 - International Energy Agency - Chiffres de consommation 2013 (consulté le 21 Janvier 2018)

- [21] L.A. Hecktheuer, A. Krenzinger and C.W.M. Prieb "Methodology for Photovoltaic Modules Characterization and Shading Effects Analysis". Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, Vol. 24, N°1, pp. 26-32, 2002. (consulté le 04 Septembre 2017)
- [22] M.Amaud Deves "Energie photovoltaïque (Application au traitement de l'eau potable et des eaux usées en rurales)" document technique Rédition 2003 FNDAR (consulté le 31 Août 2017)
- [23] Nikhil J.Anthony "Thermal analysis of a solar water distillation and electricity generation system". A Thesis submitted to the Department of Mechanical Engineering in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science Degree Awarded : Fall Semester, 2008 (consulté le 04 Septembre 2017)
- [24] O. Gergaud, B. Multon, H. Ben Ahmed "Analysis and Experimental Validation of Various Photovoltaic System Models" 7th International ELECTRIMACS Congress Montréal, Août 2002 (consulté le 02 Septembre 2017)
- [25] O.BENSEDDIK et F.DJALLOUD "Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque " Mémoire de Master Université Kasdi Merbah-Ouargle 27/06/1012 (consulté le 31 Août 2017)
- [26] Patrick Houée, Ressources pour les STI2D, "Une installation photovoltaïque en site isolé", Forum des technologies (consulté le 17 Janvier 2018)
- [27] Photovoltaic Dreaming 1875-1905 : First Attempts At Commercializing PV (consulté le 24 Septembre 2017)
- [28] R. Merahi, R. Chenni, M. Houbes "Modélisation et Simulation d'un Module PV par Matlab" (consulté le 04 Septembre 2017)
- [29] R.Sridhar et al "Modeling of PV Array and Performance Enhancement by MPPT Algorithm". International Journal of Computer Applications, Volume 7-No.5, 0975-8887 September 2010 (consulté le 02 Septembre 2017)
- [30] Roshanak Radbeh "Réalisation et caractérisation des cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes du carbone". Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2008 (consulté le 31 Août 2017)
- [31] Ruiz JM., Martin N. "Solar Energy Material Solar Cells" (2001) (consulté le 04 Août 2017)
- [32] Salima. Kebaili. Achour. Betka "Efficiency Model Of DC/DC PWM Converter Photovoltaic Applications". GCREEDER, Amman-Jordan, March 31st - April 2nd, pp1-5, 2009 (consulté le 04 Septembre 2017)
- [33] Solar Cells, Chemistry Explained, 2017 (consulté le 03 Août 2017)
- [34] Sunny Island en installation Off Grid et Backup, SMA Solar Technology AG (consulté le 27 Janvier 2018)
- [35] Tarif des douanes, Edition 2015 (consulté le 01er Août 2018)
- [36] Une expertise à 360° révolutionnaire à Madagascar, EOSOL Madagascar (consulté le 27 Janvier 2018)
- [37] W. De Soto, S.A. Klein, W.A. Beckman "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance". Solar Energy 80, pp. 78-88, 2006 (consulté le 04 Septembre 2017)
- [38] www.jirama.mg (consulté le 02 Février 2018)
- [39] www.omh.mg (consulté le 25 Janvier 2018)
- [40] Zouache Foudil "Etude de la concentration solaire sur les performances des systèmes photovoltaïques". Mémoire de magister en Electronique, Université Mentouri de Constantine 2009 (consulté le 31 Août 2017)

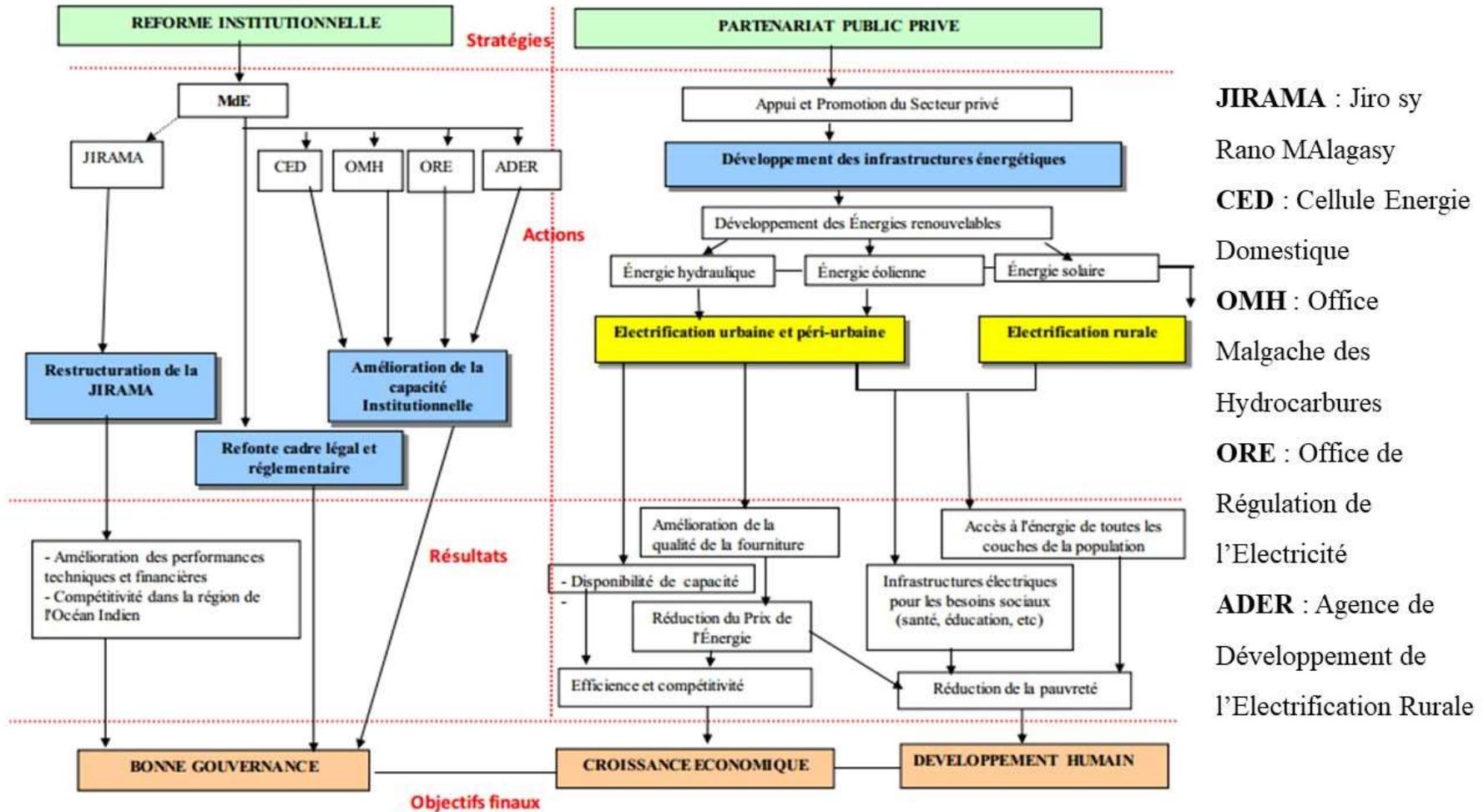
# ANNEXES

## *Annexe 1 : Types d'onduleurs avec leurs applications*

N°	Réf.	Puissance en watts	Tension en volts	Qualité du signal	Applications					
					A	B	C	D	E	F
1	466110	150	12	Pseudo-sinusoïdal	X					
2	466210	250	12	Pseudo-sinusoïdal	X	X				
3	466225	250	12	Pseudo-sinusoïdal	X	X				
	467225	250	24	Pseudo-sinusoïdal	X	X				
4	466211	200	12	Sinusoïdal	X	X	X			
5	466212	1 000	12	Pseudo-sinusoïdal	X	X		X		
6	466104	400	12	Sinusoïdal	X	X	X		X	X
7	466107	800	12	Sinusoïdal	X	X	X	X	X	X



## Annexe 2 : Réforme du secteur électricité à Madagascar (2015)



### *Annexe 3 : Hypothèses d'augmentation et de raccordement de chaque catégorie d'utilisateur*

Type de consommateur	Taux d'augmentation par année	Taux de raccordement année 1	Taux de raccordement année 2	Taux de raccordement année 3	Taux de raccordement année 4	Taux de raccordement année 5
Segment1	2,7%	5%	15%	20%	23%	25%
Segment2	2,7%	10%	20%	31%	36%	40%
Segment3	2,7%	30%	45%	57%	62%	85%
Bureau Mairie	0%	50%	100%	100%	100%	100%
Bureau Gendarmerie	0%	100%	100%	100%	100%	100%
Eclairage publique	0%	100%	100%	100%	100%	100%
Eglise	4%	45%	70%	80%	85%	90%
CSB	2%	100%	100%	100%	100%	100%
Centre de santé privé	2%	100%	100%	100%	100%	100%
ECOLE	3%	17%	67%	90%	100%	100%
IMF	4%	100%	100%	100%	100%	100%
ONG/Association	3%	13%	30%	52%	61%	74%
Restaurant/Bar	2%	56%	63%	75%	88%	100%
Hôtel	2%	100%	100%	100%	100%	100%
Projection vidéo	3%	20%	50%	70%	100%	100%
Multiservice	4%	100%	100%	100%	100%	100%
Décortiquerie	5%	20%	25%	50%	75%	90%
Soudure	5%	20%	25%	50%	75%	90%

## Annexe 4 : Caractéristiques techniques des composants du système de production

### PANNEAU SOLAIRE E20-327

Caractéristiques Électriques		
	<b>E20-327</b>	<b>E19-320</b>
Puissance nominale <sup>12</sup> (Pnom)	327 W	320 W
Tolérance (module)	+5/-0%	+5/-0%
Rendement moyen (module) <sup>13</sup>	20,4%	19,8%
Tension à puissance maximale (Vmpp)	54,7 V	54,7 V
Courant à puissance maximale (Impp)	5,98 A	5,86 A
Tension en circuit ouvert (Voc)	64,9 V	64,8 V
Courant de court-circuit (Isc)	6,46 A	6,24 A
Tension maximale du système	1000 V IEC & 600 V UL	
Calibre des fusibles série	20 A	
Coef. Temp. Puissance (Pmpp)	-0,38% / °C	
Coef. Temp. Tension (Voc)	-176,6 mV / °C	
Coef. Temp. Courant (Isc)	3,5 mA / °C	

### BATTERIE HOPPECKE 26 OPZS solar.power 4700

Type	C <sub>100</sub> /1.85 V Ah	C <sub>50</sub> /1.85 V Ah	C <sub>20</sub> /1.83 V Ah	C <sub>10</sub> /1.80 V Ah	C <sub>5</sub> /1.77 V Ah	max. Weight kg	Weight electrolyte kg (1.24 kg/l)	max.* Length L mm	max.* Width W mm	max.* Height H mm	Fig.
4 OPzS solar.power 280	280	265	245	213	182	17.1	4.5	105	208	420	A
5 OPzS solar.power 350	350	330	307	266	227	20.7	5.6	126	208	420	A
6 OPzS solar.power 420	420	395	370	320	273	24.6	6.7	147	208	420	A
5 OPzS solar.power 520	520	490	454	390	345	29.1	8.5	126	208	535	A
6 OPzS solar.power 620	620	585	542	468	414	34.1	10.1	147	208	535	A
7 OPzS solar.power 730	730	685	634	546	483	39.2	11.7	168	208	535	A
6 OPzS solar.power 910	910	860	797	686	590	46.1	13.3	147	208	710	A
7 OPzS solar.power 1070	1070	1002	930	801	691	59.1	16.7	215	193	710	B
8 OPzS solar.power 1220	1220	1145	1063	915	790	63.1	17.3	215	193	710	B
9 OPzS solar.power 1370	1370	1283	1192	1026	887	72.4	20.5	215	235	710	B
10 OPzS solar.power 1520	1520	1425	1325	1140	985	76.4	21.1	215	235	710	B
11 OPzS solar.power 1670	1670	1572	1459	1256	1086	86.6	25.2	215	277	710	B
12 OPzS solar.power 1820	1820	1715	1591	1370	1185	90.6	25.8	215	277	710	B
12 OPzS solar.power 2170	2170	2010	1843	1610	1400	110.4	32.7	215	277	855	B
14 OPzS solar.power 2540	2540	2349	2163	1881	1632	142.3	46.2	215	400	815	C
16 OPzS solar.power 2900	2900	2685	2472	2150	1865	150.9	45.9	215	400	815	C
18 OPzS solar.power 3250	3250	3015	2765	2412	2097	179.1	56.4	215	490	815	D
20 OPzS solar.power 3610	3610	3350	3072	2680	2330	187.3	55.7	215	490	815	D
22 OPzS solar.power 3980	3980	3685	3388	2952	2562	212.5	67.0	215	580	815	D
24 OPzS solar.power 4340	4340	4020	3696	3220	2795	221.2	66.4	215	580	815	D
26 OPzS solar.power 4700	4700	4355	4004	3488	3028	229.6	65.4	215	580	815	D

## ONDULEUR : Dimensionnement manuel

Technical Data	Sunny Tripower CORE1
<b>Input (DC)</b>	
Max. generator power	75000 W <sub>p</sub> STC
Max. input voltage	1000 V
MPP voltage range / rated input voltage	500 V to 800 V / 670 V
Min. input voltage / start input voltage	150 V / 188 V
Max. operating input current / per MPPT	120 A / 20 A
Max. short circuit current per MPPT / per string input	30A / 30A
Number of independent MPPT inputs / strings per MPP input	6 / 2
<b>Output (AC)</b>	
Rated power (at 230 V, 50 Hz)	50000 W
Max. apparent AC power	50000 VA
AC nominal voltage	220 V / 380 V 230 V / 400 V 240 V / 415 V
AC voltage range	202 V to 305 V
AC grid frequency / range	50 Hz / 44 Hz to 55 Hz 60 Hz / 54 Hz to 65 Hz
Rated power frequency / rated grid voltage	50 Hz / 230 V
Max. output current / Rated output current	72.5 A / 72.5 A
Output phases / AC connection	3 / 3-(N)-PE
Power factor at rated power / Adjustable displacement power factor	1 / 0.0 leading to 0.0 lagging
THD	< 3%
<b>Protective devices</b>	
Input-side disconnection device	●
Ground fault monitoring / grid monitoring	● / ●
DC reverse polarity protection / AC short-circuit current capability / galvanically isolated	● / ● / -
All-pole sensitive residual-current monitoring unit	●
Protection class (according to IEC 62109-1) / overvoltage category (according to IEC 62109-1)	I / AC: III; DC: II
AC/DC surge arrester (Type II)	○ / ○

## ONDULEUR CHARGEUR

Données techniques	Sunny Island 6.0H	Sunny Island 8.0H
<b>Sortie AC (appareil / site isolé)</b>		
Tension de réseau assignée / plage de tension AC	230 V / 202 V ... 253 V	230 V / 202 V ... 253 V
Fréquence assignée / plage de fréquence (réglable)	50 Hz / 45 Hz ... 65 Hz	50 Hz / 45 Hz ... 65 Hz
Puissance assignée (pour $U_{nom}$ , $I_{nom}$ / 25 °C / $\cos \varphi = 1$ )	4 600 W	6 000 W
Puissance AC à 25 °C pendant 30 min / 5 min / 3 s	6 000 W / 6 800 W / 11 000 W	8 000 W / 9 100 W / 11 000 W
Courant assigné / courant de sortie maximal (crête)	20 A / 120 A	26 A / 120 A
Taux d'harmoniques de la tension de sortie / facteur de puissance à la puissance assignée	< 4 % / -1 ... +1	< 4 % / -1 ... +1
<b>Entrée AC (générateur, réseau ou MC-Box)</b>		
Tension d'entrée assignée / plage de tension d'entrée AC	230 V / 172,5 V ... 264,5 V	230 V / 172,5 V ... 264,5 V
Fréquence d'entrée assignée / plage de fréquence d'entrée admissible	50 Hz / 40 Hz ... 70 Hz	50 Hz / 40 Hz ... 70 Hz
Courant d'entrée AC maximum	50 A	50 A
Puissance d'entrée AC maximum	11 500 W	11 500 W
<b>Entrée DC batterie</b>		
Tension d'entrée assignée / plage de tension DC	48 V / 41 V ... 63 V	48 V / 41 V ... 63 V
Courant de charge maximal de la batterie / courant de charge assigné DC	110 A / 100 A	140 A / 115 A
Type de batterie / capacité de la batterie (plage)	FLA, VRLA / 100 Ah ... 10 000 Ah	FLA, VRLA / 100 Ah ... 10 000 Ah
Régulation de charge	Procédé de charge IUoU avec pleine charge et charge d'égalisation automatiques	Procédé de charge IUoU avec pleine charge et charge d'égalisation automatiques
<b>Rendement / autoconsommation</b>		
Rendement maximal	95 %	95 %
Autoconsommation sans charge / mode veille	< 26 W / < 4 W	< 26 W / < 4 W
<b>Dispositif de protection (appareil)</b>		
Court-circuit AC / surcharge AC	● / ●	● / ●
Protection contre l'inversion de polarité DC / fusible DC	- / -	- / -
Surtempérature / décharge profonde de la batterie	● / ●	● / ●
Classe de surtension selon IEC 60664-1	III	III
<b>Données générales</b>		
Largeur / Hauteur / Profondeur	467 mm x 612 mm x 242 mm	467 mm x 612 mm x 242 mm
Poids	63 kg	63 kg
Plage de température de fonctionnement	-25 °C ... +60 °C	-25 °C ... +60 °C
Classe de protection selon IEC 62103	I	I
Catégorie climatique selon IEC 60721	3K6	3K6
Indice de protection selon IEC 60529	IP54	IP54
<b>Équipement / fonctions</b>		
Commande et affichage / relais multifonction	externe via SRC-20 / 2	externe via SRC-20 / 2
Systèmes triphasés / montage en parallèle	● / ●	● / ●
By-pass intégré / fonctionnement en multicluster	- / ●	- / ●
Calcul de l'état de charge / pleine charge / charge d'égalisation	● / ● / ●	● / ● / ●
Démarrage progressif intégré / support du générateur	● / ●	● / ●
Capteur de température de la batterie / câbles de communication	● / ●	● / ●
Certificats et homologations	www.SMA-Solar.com	www.SMA-Solar.com
Garantie (5 / 10 / 15 / 20 / 25 ans)	● / ○ / ○ / ○ / ○	● / ○ / ○ / ○ / ○

## ARMOIRE DE DISTRIBUTION AC

Technical data	Multicuster Box 6	Multicuster Box 12	Multicuster Box 36
<b>Load Connection</b>			
Rated voltage	230 V (LN), 400 V (L1, L2)	230 V (LN), 400 V (L1, L2)	230 V (LN), 400 V (L1, L2)
AC voltage range	172.5 V - 265 V, 300 V - 433 V	172.5 V - 265 V, 300 V - 433 V	172.5 V - 250 V, 300 V - 433 V
Rated frequency / frequency range	50 Hz/40 Hz ... 70 Hz	50 Hz/40 Hz ... 70 Hz	50 Hz/40 Hz ... 70 Hz
Number	1 (three-phase)	1 (three-phase)	1 (three-phase)
Rated power	55 kW	110 kW	300 kW
AC current at rated values	3 x 80 A	3 x 160 A	3 x 435 A (AC1)
Fuses	LV/HRC size 00	LV/HRC size 00	LV/HRC size 3
<b>Connections for Sunny Island</b>			
Maximum number of devices	6	12	36
AC rated power / AC current at rated values	36 kW / 3 x 52 A	72 kW / 3 x 104 A	216 kW / 3 x 313 A
AC power at 45 °C / AC current at 45 °C	24 kW / 3 x 35 A	48 kW / 3 x 70 A	195 kW / 3 x 283 A
AC power [25 °C, 30 min]	48 kW	96 kW	288 kW
AC power [25 °C, 5 min]	55 kW	110 kW	328 kW
Fuses	Miniature circuit-breaker C32A	Miniature circuit-breaker C32A	Miniature circuit-breaker C40A
<b>Turbine connection</b>			
Number	1 (three-phase)	1 (three-phase)	1 (three-phase)
Rated grid input power	55 kW	110 kW	300 kW
AC input current	3 x 80 A	3 x 160 A	3 x 435 A (AC1)
Fuses	LV/HRC size 00	LV/HRC size 00	LV/HRC size 3
<b>PV plant connection</b>			
Number	1 (three-phase)	1 (three-phase)	1 (three-phase)
PV rated power	55 kW	110 kW	360 kW
AC current at rated values	3 x 80 A	3 x 160 A	3 x 522 A (AC1)
Fuses	-	-	-
<b>General data</b>			
Number of phases	three-phase	three-phase	three-phase
Permitted grounding system	Participants	Participants	Participants
Dimensions [W / H / D]	760/760/210 mm	1000/1400/300 mm	1200/2000/800 mm
Mounting type	suspended	Standing on a base	Standing on a base
Priority	60 kg	140 kg	400 kg
Ambient temperature	-25 °C to +50 °C	-25 °C to +50 °C	-25 °C to +60 °C
Degree of protection (according to IEC 60529)	IP65	IP65	IP54
Maximum permissible value for relative humidity (non-condensing)	0 % ... 100 %	0 % ... 100 %	0 % ... 100 %

## *Annexe 5 : Catalogue de section des câbles*

**Câbles DC : Guide pour le choix de la section du conducteur en fonction de l'intensité transitée et des pertes pour une température maximale de l'âme de 90 °C et 120 °C (Source : Guide pratique, Norme UTE C 15-712-1)**

$I_n$	90 °C		120 °C	
	Section	Pertes	Section	Pertes
A	mm <sup>2</sup>	W/m	mm <sup>2</sup>	W/m
17	1,5	4,9	1,5	5,4
24	2,5	5,9		10,7
27	4	4,6		13,5
32		6,5	2,5	11,4
37	6	5,8		15,2
41		7,1	4	11,6
50	10	6,1		17,2
57		7,9	6	14,9
64	16	6,3		18,8
77		9,1	10	15,8
89	25	7,9		21,1
102		10,3	16	17,5
120	35	10,2		24,3
126		11,2	25	17,2
160	50	12,6		27,8
198	50	19,5	35	30,3

**Câbles AC : Schneider électrique, catalogue distribution électrique**

<b>cos φ = 1</b>																
<b>câble</b>	<b>cuivre</b>															
<b>S (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>1,5</b>	<b>2,5</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>16</b>	<b>25</b>	<b>35</b>	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>95</b>	<b>120</b>	<b>150</b>	<b>185</b>	<b>240</b>	<b>300</b>
<b>In (A)</b>																
1	0,6	0,4														
2	1,3	0,7	0,5													
3	1,9	1,1	0,7	0,5												
5	3,1	1,9	1,2	0,8	0,5											
10	6,1	3,7	2,3	1,5	0,9	0,5										
16	10,7	5,9	3,7	2,4	1,4	0,9	0,6									
20		7,4	4,6	3,1	1,9	1,2	0,7									
25		9,3	5,8	3,9	2,3	1,4	0,9	0,6								
32			7,4	5	3	1,9	1,2	0,8	0,6							
40			9,3	6,1	3,7	2,3	1,4	1,1	0,7	0,5						
50				7,7	4,6	2,9	1,9	1,4	0,9	0,6	0,5					
63				9,7	5,9	3,6	2,3	1,6	1,2	0,8	0,6					
70					6,5	4,1	2,6	1,9	1,3	0,9	0,7	0,5				
80					7,4	4,6	3	2,1	1,4	1,1	0,8	0,6	0,5			
100					9,3	5,8	3,7	2,6	1,9	1,4	1	0,8	0,7	0,6		
125						7,2	4,6	3,3	2,3	1,6	1,2	1	0,9	0,7	0,6	
160							5,9	4,2	3	2,1	1,5	1,3	1,2	1	0,8	0,6
200							7,4	5,3	3,7	2,6	2	1,5	1,4	1,3	1	0,8
250								6,7	4,6	3,3	2,4	1,9	1,7	1,4	1,2	0,9
320									5,9	4,2	3,2	2,4	2,3	1,9	1,5	1,2
400									7,4	5,3	3,9	3,1	2,8	2,3	1,9	1,4
500										6,7	4,9	3,9	3,5	3	2,5	1,9

*Annexe 6 : Energie totale vendue annuelle sur la durée de vie du projet (hypothèses pour le dimensionnement manuel et celui effectué avec Sunny Design)*

**HYPOTHESE DE CONSOMMATION POUR LE DIMENSIONNEMENT MANUEL (Source : Auteur, d'après les données de baisse de rendement du constructeur du panneau solaire et l'hypothèse de consommation des usagers)**

	EVOLUTION DU RENDEMENT ENERGETIQUE [%]	ENERGIE PRODUITE [kWh/an]	TAUX DE CONSOMMATION DE L'ENERGIE PRODUITE [%]	CONSOMMATION [kWh/an]
ANNEE1	-2,5	473 489,09	30%	142 046,73
ANNEE2	-0,4	471 595,14	35%	165 058,30
ANNEE3	-0,4	469 708,75	40%	187 883,50
ANNEE4	-0,4	467 829,92	45%	210 523,46
ANNEE5	-0,4	465 958,60	50%	232 979,30
ANNEE6	-0,4	464 094,77	55%	255 252,12
ANNEE7	-0,4	462 238,39	60%	277 343,03
ANNEE8	-0,4	460 389,43	65%	299 253,13
ANNEE9	-0,4	458 547,88	70%	320 983,51
ANNEE10	-0,4	456 713,68	75%	342 535,26
ANNEE11	-0,4	454 886,83	80%	363 909,46
ANNEE12	-0,4	453 067,28	85%	385 107,19
ANNEE13	-0,4	451 255,01	86%	387 058,50
ANNEE14	-0,4	449 449,99	86%	388 612,95
ANNEE15	-0,4	447 652,19	87%	390 173,65
ANNEE16	-0,4	445 861,58	88%	391 740,61
ANNEE17	-0,4	444 078,14	89%	393 313,87
ANNEE18	-0,4	442 301,82	89%	394 893,44
ANNEE19	-0,4	440 532,62	90%	396 479,36
ANNEE20	-0,4	438 770,49	91%	397 104,41
ANNEE21	-0,4	437 015,41	91%	398 071,64
ANNEE22	-0,4	435 267,34	92%	399 670,32
ANNEE23	-0,4	433 526,27	93%	401 275,43
ANNEE24	-0,4	431 792,17	93%	402 886,97
ANNEE25	-0,4	430 065,00	94%	404 504,99
<b>TOTAL [kWh]</b>				<b>8 328 661,14</b>
<b>MOYENNE ANNUELLE [kWh/an]</b>				<b>333 146,45</b>

## HYPOTHESE DE CONSOMMATION POUR LE DIMENSIONNEMENT AVEC SUNNY DESIGN

Rendement énergétique spécifique*:	1746 kWh/kWp
Pertes dans les lignes (en % de l'énergie photovoltaïque):	---
Charge déséquilibrée:	0,00 VA
Énergie PV utilisée:	313,67 MWh
Part consommée d'énergie photovoltaïque:	80,5 %
Part d'énergie photovoltaïque dans l'approvisionnement énergétique (journée):	130,7 %
Degré de couverture solaire d'énergie annuelle moyenne:	97,3 %

## PROPORTION DE CONSOMMATION SELON LA COURBE DE CHARGE DE LA COMMUNE

	Dimensionnement manuel	Dimensionnement avec Sunny Design
<b>Consommation moyenne annuelle moyenne sur 25 ans [kWh/an]</b>	333 146,45	313 670
<b>Proportion de consommation en tarif productif (06h à 18h) [%]</b>	83	83
<b>Proportion de consommation en tarif de base (18h à 21h) [%]</b>	12	12
<b>Proportion de consommation en tarif nuit (21h à 06h) [%]</b>	5	5

# Annexe 7 : Feuilles de calcul de RETScreen

## Feuille de calcul : « Modèle énergétique », dimensionnement manuel

### Modèle énergétique RETScreen - Projet de production d'électricité

#### Projet de production d'électricité

##### Système de production d'électricité du cas de référence

Type de réseau	Hors réseau	
Technologie	Moteur à pistons	
Type de combustible	Diesel (mazout #2) - L	
Prix du combustible	MGF/L	3400,000
Capacité	kW	300,00
Consommation spécifique	kJ/kWh	1 600
Coûts annuels d'exploitation et entretien	MGF	200 000 000
Prix de l'électricité - cas de référence	MGF/kWh	787,063
Coût total de l'électricité	MGF	247 059 079

##### Caractéristiques de la charge

- Méthode 1  
 Méthode 2

Unité	Cas de référence	Cas proposé
Électricité - quotidienne - CC	kWh	
Électricité - quotidienne - CA	kWh	860,000
Corrélation ressource intermittente-charge		Zéro

##### Portion d'utilisation dans le mois

		Cas de référence	Cas proposé	Énergie économisée
Électricité - annuelle - CC	MWh	0,000	0,000	
Électricité - annuelle - CA	MWh	313,900	313,900	0%
Charge de pointe - annuelle	kW		105,00	

#### Système de production d'électricité du cas proposé

<b>Onduleur</b>			
Capacité	kW	286,0	Charge de pointe - annuelle - CA
Rendement	%	98%	
Pertes diverses	%	10%	
<b>Accumulateurs</b>			
Nombre de jours d'autonomie	j	2,0	
Tension	V	2,0	
Rendement	%	98%	
Niveau maximal de décharge	%	80%	
Rendement du régulateur de charge	%	98%	
Méthode de contrôle de la température		Ambiant	
Réduction moyenne de la capacité due à la température	%	1,6%	
Capacité	Ah	1 300 000	1 261 817
Accumulateurs	kWh	2 600	

##### Technologie

Photovoltaïque

##### Évaluation des ressources

Système de positionnement solaire		Fixe
Inclinaison		19,0
Azimut		180,0

##### Afficher information

Mois	Rayonnement solaire quotidien - horizontal	Rayonnement solaire quotidien - incliné	Électricité fournie à la charge
	kWh/m <sup>2</sup> /j	kWh/m <sup>2</sup> /j	
Janvier	6,02	5,60	30,23
Février	6,02	5,81	27,30
Mars	5,98	6,10	30,23
Avril	5,68	6,27	29,25
Mai	5,01	5,97	30,23
Juin	4,74	5,81	29,24
Juillet	4,99	6,04	30,23
Août	5,73	6,58	30,23
Septembre	6,47	6,83	29,25
Octobre	6,74	6,61	30,23
Novembre	6,73	6,29	29,25
Décembre	6,47	5,93	30,23
<b>Annuel</b>	<b>5,88</b>	<b>6,16</b>	<b>355,88</b>

Rayonnement solaire annuel - horizontal	MWh/m <sup>2</sup>	2,15
Rayonnement solaire annuel - incliné	MWh/m <sup>2</sup>	2,25

##### Photovoltaïque

Type	a-Si	
Capacité électrique	kW	281,00
Fabricant		
Modèle		
Rendement	%	20,0%
Température nominale des cellules en opération	°C	45
Coefficient de température	% / °C	0,11%
Surface du capteur solaire	m <sup>2</sup>	1 405,0
Méthode de contrôle	Optimiseur de puissance fournie	
Pertes diverses	%	15,0%

[Voir la Base de données de produits](#)

##### Sommaire

Facteur d'utilisation	%	21,4%
Électricité fournie à la charge	MWh	355,88
		113,4%

##### Système de production d'électricité de pointe

Technologie	Non nécessaire	
-------------	----------------	--

## Feuille de calcul : « Analyse des coûts », dimensionnement manuel

Choix d'options		
<input type="radio"/> Méthode 1	<input type="radio"/> Notes/Plages	Notes/Plages
<input type="radio"/> Méthode 2	<input type="radio"/> Deuxième devise	Aucun
	<input type="radio"/> Répartition des coûts	

Coûts d'investissement (crédits)	Unité	Quantité	Coût unitaire	Montant	Coûts relatifs
<b>Étude de faisabilité</b>					
Étude de faisabilité	coût			MGF -	
Sous-total:				MGF -	0,0%
<b>Développement</b>					
Développement	coût			MGF -	
Sous-total:				MGF -	0,0%
<b>Ingénierie</b>					
Ingénierie	coût			MGF -	
Sous-total:				MGF -	0,0%
<b>Système de production d'électricité</b>					
Photovoltaïque	kW	281,00	MGF 21 728 544	MGF6 105 720 774	
Chemin d'accès	km			MGF -	
Ligne électrique	km			MGF -	
Poste de raccordement	projet			MGF -	
Mesures d'efficacité énergétique	projet			MGF -	
	coût			MGF -	
	coût			MGF -	
Sous-total:				MGF6 105 720 774	90,7%
<b>Infrastructures connexes et divers</b>					
Pièces de rechange	%			MGF -	
Transport	projet	1	MGF 14 040 000	MGF 14 040 000	
Mise en service et formation	i-p			MGF -	
Défini par l'utilisateur	coût			MGF -	
Frais imprévus	%	10,0%	MGF6 119 760 774	MGF 611 976 077	
Intérêts durant les travaux		6 mois	MGF6 731 736 851	MGF -	
Sous-total:				MGF 626 016 077	9,3%
<b>Total des coûts d'investissement</b>				<b>MGF 731 736 851</b>	<b>100,0%</b>

Frais annuels (crédits)	Unité	Quantité	Coût unitaire	Montant
<b>Exploitation et entretien</b>				
Pièces et main-d'œuvre	projet	1	MGF 27 600 000	MGF 27 600 000
Prix du kWh	crédit	333 146	MGF 1 266	MGF (421 716 196)
Frais imprévus	%	15,0%	MGF (394 116 196)	MGF (59 117 429)
Sous-total:				<b>MGF (453 233 625)</b>

Économies annuelles	Unité	Quantité	Coût unitaire	Montant
<b>Coût en combustible - cas de référence</b>				
Diesel (mazout #2)	L	13 841	MGF 17 849,922	MGF 247 059 079
Sous-total:				<b>MGF 247 059 079</b>

Coûts périodiques (crédits)	Unité	An	Coût unitaire	Montant
Changement onduleur	coût	10	MGF 36 038 520	MGF 36 038 520
Changement batterie	coût	5	MGF 455 920 000	MGF 455 920 000
Valeur résiduelle du projet	coût			MGF -

## Feuille de calcul : « Analyse des émissions », dimensionnement manuel

### Analyse des réductions d'émissions RETScreen - Projet de production d'électricité

☑ Analyse des émissions		Potentiel de réchauffement planétaire des GES	
<input type="radio"/> Méthode 1		25	tonnes CO2 = 1 tonne CH4
<input type="radio"/> Méthode 2		298	tonnes CO2 = 1 tonne N2O
<input checked="" type="radio"/> Méthode 3			

Sommaire des GES du cas de référence (Niveau de référence)							
Type de combustible	Proportion de combustible %	Facteur d'émissions CO2 kg/GJ	Facteur d'émissions CH4 kg/GJ	Facteur d'émissions N2O kg/GJ	Consommation de combustible MWh	Facteur d'émissions GES tCO2/MWh	Émissions de GES tCO2
Diesel (mazout #2)	100,0%	75,0	10,0000	5,0000	140	6,534	911,6
Total	100,0%	75,0	10,0000	5,0000	140	6,534	911,6

Sommaire des GES du cas proposé (Projet de production d'électricité)							
Type de combustible	Proportion de combustible %	Facteur d'émissions CO2 kg/GJ	Facteur d'émissions CH4 kg/GJ	Facteur d'émissions N2O kg/GJ	Consommation de combustible MWh	Facteur d'émissions GES tCO2/MWh	Émissions de GES tCO2
Solaire	100,0%	0,0	0,0000	0,0000	356	0,000	0,0
Total	100,0%	0,0	0,0000	0,0000	356	0,000	0,0

Sommaire des réductions d'émissions de GES						
Projet de production d'électricité	Émissions de GES cas de référence tCO2	Émissions de GES cas proposé tCO2	Réduction annuelle brute d'émissions de GES tCO2	Frais de transaction pour les crédits de GES %	Réduction annuelle nette d'émissions de GES tCO2	
Projet de production d'électricité	911,6	0,0	911,6	%	911,6	
Réduction annuelle nette d'émissions de GES	912	tCO2	est équivalente à	167	Automobiles et camions légers non utilisés	

# Feuille de calcul : « Analyse financière », dimensionnement manuel

## Analyse financière RETScreen - Projet de production d'électricité

Paramètres financiers			Sommaire des coûts, économies et revenus du projet				Flux monétaires annuels			
Général			Coûts d'investissement				An	Av. impôt	Apr. impôt	Cumulatif
							#	MGF	MGF	MGF
Taux d'indexation des combustibles	%	2,0%	Système de production d'électricité	90,7%	MGF	6 105 720 774	0	-5 385 389 481	-5 385 389 481	-5 385 389 481
Taux d'inflation	%	7,0%	Infrastructures connexes et divers	9,3%	MGF	626 016 077	1	736 960 239	736 960 239	-4 648 429 242
Taux d'actualisation	%	15,0%	<b>Total des coûts d'investissement</b>	<b>100,0%</b>	<b>MGF</b>	<b>6 731 736 851</b>	2	775 947 443	775 947 443	-3 872 481 800
Durée de vie du projet	an	25	Encouragements et subventions		MGF	1 346 347 370	3	817 411 750	817 411 750	-3 055 070 049
<b>Financement</b>			<b>Frais annuels et paiements de la dette</b>				4	861 521 519	861 521 519	-2 193 548 530
Encouragements et subventions	MGF	1 346 347 370	Exploitation et entretien		MGF	-453 233 625	5	269 005 406	269 005 406	-1 924 543 124
Ratio d'endettement	%		Coût en combustible - cas proposé		MGF	0	6	958 410 107	958 410 107	-966 133 016
<b>Analyse d'impôt sur le revenu</b>			<b>Coûts périodiques (crédits)</b>				7	1 011 587 382	930 691 316	-35 441 701
Taux d'imposition sur le revenu	%	20,0%	Changement onduleur - 10 ans		MGF	36 038 520	8	1 068 208 838	863 542 719	828 101 019
Report des pertes?		Oui	Changement batterie - 5 ans		MGF	455 920 000	9	1 128 510 002	911 783 651	1 739 884 670
Méthode d'amortissement		Linéaire	<b>Total des frais annuels</b>		<b>MGF</b>	<b>-453 233 625</b>	10	224 985 908	188 964 376	1 928 849 046
Allocation du coût en capital	%	10,0%	<b>Économies et revenus annuels</b>				11	1 261 176 591	1 017 916 922	2 946 765 968
Période d'amortissement	an	15	Coût en combustible - cas de référence		MGF	247 059 079	12	1 334 099 607	1 076 255 335	4 023 021 303
Congé fiscal disponible?	oui/non	Non	<b>Total des économies et des revenus annuels</b>		<b>MGF</b>	<b>247 059 079</b>	13	1 411 820 047	1 138 431 687	5 161 452 990
<b>Revenus annuels</b>			<b>Viabilité financière</b>				14	1 494 667 587	1 204 709 719	6 366 162 709
<b>Revenu d'exportation d'électricité</b>			TRI avant impôt - capitaux propres	%		16,5%	15	325 097 198	269 053 408	6 635 216 116
<b>Revenu pour réduction de GES</b>			TRI avant impôt - actifs	%		16,5%	16	1 677 179 049	1 341 743 239	7 976 959 355
Réduction nette de GES	tCO2/an	912	TRI après impôt - capitaux propres	%		15,1%	17	1 777 623 624	1 422 098 899	9 399 058 254
Réduction nette de GES - 25 ans	tCO2	22 789	TRI après impôt - actifs	%		15,1%	18	1 884 760 159	1 507 808 128	10 906 866 382
<b>Prime (ou rabais) sur les ventes à l'utilisateur</b>			Retour simple	an		7,7	19	1 999 050 310	1 599 240 248	12 506 106 630
<b>Autre revenu (coût)</b>			Retour sur les capitaux propres	an		7,0	20	217 263 670	173 810 936	12 679 917 566
<b>Revenu pour production d'Énergie Propre (ÉP)</b>			Valeur Actualisée Nette (VAN)	MGF		37 486 532	21	2 251 101 225	1 800 880 980	14 480 798 546
			Économies annuelles sur la durée de vie	MGF/an		5 799 144	22	2 389 955 354	1 911 964 283	16 392 762 829
			Ratio avantages-coûts			1,01	23	2 538 154 813	2 030 523 851	18 423 286 680
			Coût de réduction de GES	MGF/tCO2		(6 362)	24	2 696 346 286	2 157 077 029	20 580 363 709
							25	390 746 486	312 597 189	20 892 960 897

**Graphique des flux monétaires cumulatifs**

# Feuille de calcul : « Modèle énergétique », dimensionnement avec Sunny Design

Modèle énergétique RETScreen - Projet de production d'électricité

## Projet de production d'électricité

### Système de production d'électricité du cas de référence

Type de réseau	Hors réseau	
Technologie	Moteur à pistons	
Type de combustible	Diesel (mazout #2) - L	
Prix du combustible	MGF/L	3800,000
Capacité	kW	250,00
Consommation spécifique	kJ/kWh	1 600
Coûts annuels d'exploitation et entretien	MGF	300 000 000
Prix de l'électricité - cas de référence	MGF/kWh	1123,273
Coût total de l'électricité	MGF	352 595 441

### Caractéristiques de la charge

- Méthode 1  
 Méthode 2

Unité	Cas de référence	Cas proposé
Électricité - quotidienne - CC	kWh	
Électricité - quotidienne - CA	kWh	860,000
Corrélation ressource intermittente-charge		Zéro

### Portion d'utilisation dans le mois

		Cas de référence	Cas proposé	Énergie économisée
Électricité - annuelle - CC	MWh	0,000	0,000	
Électricité - annuelle - CA	MWh	313,900	313,900	0%
Charge de pointe - annuelle	kW		105,00	

## Système de production d'électricité du cas proposé

<b>Onduleur</b>			
Capacité	kW	200,0	Charge de pointe - annuelle - CA
Rendement	%	98%	
Pertes diverses	%	10%	

<b>Accumulateurs</b>			
Nombre de jours d'autonomie	j	1,0	
Tension	V	2,0	
Rendement	%	98%	
Niveau maximal de décharge	%	80%	
Rendement du régulateur de charge	%	98%	
Méthode de contrôle de la température		Ambiant	
Réduction moyenne de la capacité due à la température	%	1,9%	
Capacité	Ah	700 000	633 975
Accumulateurs	kWh	1 400	

<b>Technologie</b>		Photovoltaïque
--------------------	--	----------------

<b>Évaluation des ressources</b>		
Système de positionnement solaire		Fixe
Inclinaison	°	19,0
Azimut	°	180,0

### Afficher information

Mois	Rayonnement solaire quotidien - horizontal	Rayonnement solaire quotidien - incliné	Électricité fournie à la charge
	kWh/m <sup>2</sup> /j	kWh/m <sup>2</sup> /j	
Janvier	6,02	5,60	29,77
Février	6,02	5,81	27,01
Mars	5,98	6,10	30,01
Avril	5,68	6,27	29,08
Mai	5,01	5,97	29,89
Juin	4,74	5,81	28,82
Juillet	4,99	6,04	29,92
Août	5,73	6,58	30,13
Septembre	6,47	6,83	29,20
Octobre	6,74	6,61	30,17
Novembre	6,73	6,29	29,15
Décembre	6,47	5,93	30,00
<b>Annuel</b>	<b>5,88</b>	<b>6,16</b>	<b>353,16</b>

Rayonnement solaire annuel - horizontal	MWh/m <sup>2</sup>	2,15
Rayonnement solaire annuel - incliné	MWh/m <sup>2</sup>	2,25

<b>Photovoltaïque</b>		
Type		a-Si
Capacité électrique	kW	223,02
Fabricant		
Modèle		
Rendement	%	20,0%
Température nominale des cellules en opération	°C	45
Coefficient de température	% / °C	0,11%
Surface du capteur solaire	m <sup>2</sup>	1 115,1
Méthode de contrôle		Optimiseur de puissance fournie
Pertes diverses	%	15,0%

[Voir la Base de données de produits](#)

<b>Sommaire</b>		
Facteur d'utilisation	%	21,4%
Électricité fournie à la charge	MWh	353,16

### Système de production d'électricité de pointe

Technologie	Moteur à pistons	
Type de combustible	Gaz naturel - m <sup>3</sup>	
Prix du combustible	MGF/m <sup>3</sup>	3800,000
Rendement du chargeur	%	
Capacité suggérée	kW	105,0
Capacité	kW	88
Électricité fournie à la charge	MWh	0,0
Fabricant		
Modèle		
Consommation spécifique	kJ/kWh	

[Voir la Base de données de produits](#)



## Feuille de calcul : « Analyse des coûts », dimensionnement avec Sunny Design

Choix d'options		
<input type="radio"/> Méthode 1	<input type="radio"/> Notes/Plages	Notes/Plages
<input type="radio"/> Méthode 2	<input type="radio"/> Deuxième devise	Aucun
	<input type="radio"/> Répartition des coûts	

Coûts d'investissement (crédits)	Unité	Quantité	Coût unitaire	Montant	Coûts relatifs
<b>Étude de faisabilité</b>					
Étude de faisabilité	coût			MGF -	
Sous-total:				MGF -	0,0%
<b>Développement</b>					
Développement	coût			MGF -	
Sous-total:				MGF -	0,0%
<b>Ingénierie</b>					
Ingénierie	coût			MGF -	
Sous-total:				MGF -	0,0%
<b>Système de production d'électricité</b>					
Charge de base - Photovoltaïque	kW	223,02	MGF 24 029 796	MGF 5 359 124 999	
Charge de pointe - Moteur à pistons	kW	88,00	MGF 317 520	MGF 27 941 760	
Chemin d'accès	km			MGF -	
Ligne électrique	km			MGF -	
Poste de raccordement	projet			MGF -	
Mesures d'efficacité énergétique	projet			MGF -	
	coût			MGF -	
	coût			MGF -	
Sous-total:				MGF 5 387 066 759	90,7%
<b>Infrastructures connexes et divers</b>					
Pièces de rechange	%			MGF -	
Transport	projet	1	MGF 14 040 000	MGF 14 040 000	
Mise en service et formation	jp			MGF -	
Défini par l'utilisateur	coût			MGF -	
Frais imprévus	%	10,0%	MGF 5 401 106 759	MGF 540 110 676	
Intérêts durant les travaux	0,00%	6 mois	MGF 5 941 217 435	MGF -	
Sous-total:				MGF 554 150 676	9,3%
<b>Total des coûts d'investissement</b>				<b>MGF 5 941 217 435</b>	<b>100,0%</b>

Frais annuels (crédits)	Unité	Quantité	Coût unitaire	Montant
<b>Exploitation et entretien</b>				
Pièces et main-d'œuvre	projet	1	MGF 44 186 200	MGF 44 186 200
Prix du kWh	crédit	313 670	MGF 1 266	MGF (397 062 306)
Frais imprévus	%	15,0%	MGF (352 876 106)	MGF (52 931 416)
Sous-total:				MGF (405 807 522)

Economies annuelles	Unité	Quantité	Coût unitaire	Montant
<b>Coût en combustible - cas de référence</b>				
Diesel (mazout #2)	L	13 841	MGF 25 474,882	MGF 352 595 441
Sous-total:				MGF 352 595 441

Coûts périodiques (crédits)	Unité	An	Coût unitaire	Montant
Changement onduleur	coût	10	MGF 30 032 100	MGF 30 032 100
Changement batterie	coût	5	MGF 342 500 000	MGF 342 500 000
Valeur résiduelle du projet	coût			MGF -

## Feuille de calcul : « Analyse des émissions », dimensionnement avec Sunny Design

### Analyse des réductions d'émissions RETScreen - Projet de production d'électricité

☑ Analyse des émissions					
<input type="radio"/> Méthode 1	<b>Potentiel de réchauffement planétaire des GES</b> <table border="1"> <tr> <td>25</td> <td>tonnes CO2 = 1 tonne CH4</td> </tr> <tr> <td>298</td> <td>tonnes CO2 = 1 tonne N2O</td> </tr> </table>	25	tonnes CO2 = 1 tonne CH4	298	tonnes CO2 = 1 tonne N2O
25		tonnes CO2 = 1 tonne CH4			
298		tonnes CO2 = 1 tonne N2O			
<input type="radio"/> Méthode 2					
<input type="radio"/> Méthode 3					

Sommaire des GES du cas de référence (Niveau de référence)							
Type de combustible	Proportion de combustible %	Facteur d'émissions CO2 kg/GJ	Facteur d'émissions CH4 kg/GJ	Facteur d'émissions N2O kg/GJ	Consommation de combustible MWh	Facteur d'émissions GES tCO2/MWh	Émissions de GES tCO2
Diesel (mazout #2)	100,0%	75,0	10,0000	5,0000	140	6,534	911,6
Total	100,0%	75,0	10,0000	5,0000	140	6,534	911,6

Sommaire des GES du cas proposé (Projet de production d'électricité)							
Type de combustible	Proportion de combustible %	Facteur d'émissions CO2 kg/GJ	Facteur d'émissions CH4 kg/GJ	Facteur d'émissions N2O kg/GJ	Consommation de combustible MWh	Facteur d'émissions GES tCO2/MWh	Émissions de GES tCO2
Solaire	100,0%	50,0			353	0,180	63,6
Total	100,0%	50,0	0,0000	0,0000	353	0,180	63,6

Sommaire des réductions d'émissions de GES					
Projet de production d'électricité	Émissions de GES cas de référence tCO2	Émissions de GES cas proposé tCO2	Réduction annuelle brute d'émissions de GES tCO2	Frais de transaction pour les crédits de GES %	Réduction annuelle nette d'émissions de GES tCO2
Projet de production d'électricité	911,6	63,6	848,0		848,0
Réduction annuelle nette d'émissions de GES	848	tCO2	est équivalente à	155	Automobiles et camions légers non utilisés



**Titre :** Dimensionnement de l'électrification d'un village : Cas du chef-lieu de la Commune Rurale de Mahasolo par une centrale solaire photovoltaïque.

**Auteur :** Harisoa Diamondra Julpheli RAKOTONIRINA

**Tél :** +261 34 80 432 39

**E-mail :** [rdiamundr@gmail.com](mailto:rdiamundr@gmail.com)

**Nombre de pages :** 132

**Nombre de figures :** 58

**Nombre de tableaux :** 35

## **RESUME**

L'accès à l'électricité est un des facteurs du développement d'un pays, à Madagascar le taux d'électrification est encore très faible, surtout en milieu rural. Dans ce mémoire nous avons effectué l'étude d'un projet d'électrification du chef-lieu de la Commune Rurale de Mahasolo par une centrale solaire photovoltaïque. L'étude socio-économique et l'évaluation de la demande énergétique de la Commune a été faite grâce à une descente sur terrain et l'analyse des données. Ensuite la centrale solaire photovoltaïque qui correspond aux besoins de la Commune a été dimensionnée. Enfin, nous avons effectué une étude de faisabilité financière et des impacts environnementaux du projet. Dans cette étude nous avons effectué deux types de dimensionnement, l'un manuellement et l'autre avec un logiciel. Nous recommandons d'utiliser les résultats du logiciel pour la réalisation du projet car la compatibilité des éléments est assurée. D'après les résultats d'analyse financière, ce projet est viable financièrement et le temps de retour sur investissement avoisine les sept ans et il réduit la production de gaz à effet de serre.

**Mots-clés :** solaire photovoltaïque, électrification rurale, irradiation solaire, consommation énergétique, Commune Rurale de Mahasolo, viabilité financière, impacts environnementaux.

## **ABSTRACT**

Access to electricity is one of factors of a country's development, in Madagascar electrification rate is still very low, especially in rural areas. In this thesis we carried out study of electrification project of the Mahasolo Rural Municipality by a photovoltaic solar power plant. The socio-economic study and evaluation of energy needed of the Commune was made by a descent on the ground and data analysis. Then the solar photovoltaic power plant that corresponds to needs of the municipality has been dimensioned. Finally, we conducted a financial feasibility study and environmental impacts of the project. In this study we performed two types of sizing, one manually and the other with software. We recommend using the results of the software for the realization of the project because the compatibility of the elements is ensured. According to the results of the financial analysis, this project is financially viable and has a payback period of around seven years and reduces the production of greenhouse gases.

**Keywords:** solar photovoltaic, rural electrification, solar irradiation, energy consumption, Mahasolo Rural Municipality, financial viability, environmental impacts.

## **Directeurs de mémoire :**

Dr. Solofo Hery RAKOTONIAINA, Maître de Conférences à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo.

Mr. Jean Christophe MARA SOA HAJATO, Responsable Technique auprès d'EOSOL Madagascar.