

# TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES.....	iv
LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES.....	vii
NOMENCLATURES.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES TABLEAUX .....	x
INTRODUCTION.....	1
PARTIE I : CONTEXTE DE L'ETUDE.....	3
Chapitre 1 : CADRE DU STAGE .....	4
I.1.1. Présentation du Centre National de Recherche Industriel et Technologique (CNRIT).....	4
I.1.1.1. Historique et localisation.....	4
I.1.1.2. Objectif spécifique.....	4
I.1.1.3. Mission.....	4
I.1.1.4. Organigramme.....	5
I.1.2. L'Agence de Développement de l'Electrification Rurale (ADER).....	6
I.1.2.1. Objectifs .....	6
I.1.2.2. Progrès accompli.....	7
I.1.2.3. Stratégie.....	7
I.1.3. Contexte du Stage.....	8
Chapitre 2 : LE SECTEUR ELECTRIQUE A MADAGASCAR.....	9
I.2.1. Généralités sur l'électrification à Madagascar.....	9
I.2.2. Les énergies renouvelables à Madagascar.....	10
I.2.3. Objectif du travail.....	10
I.2.3.1. Objectif général.....	10
I.2.3.2. Objectifs spécifiques.....	10
I.2.4. Le Programme BOREALE.....	10
Chapitre 3 : MONOGRAPHIE DE LA COMMUNE D'IFOTAKA.....	12
I.3.1. Résumé de la monographie de la localité.....	12
I.3.1.1. Localisation.....	12
I.3.1.2. Population.....	12
I.3.1.3. Infrastructure sociale.....	13
I.3.1.4. Moyen de subsistance des ménages.....	14

I.3.1.5. Accessibilité.....	14
I.3.1.6. Source d'énergie utilisée.....	14
PARTIE II : MATERIELS ET METHODES.....	15
Chapitre 1 : DIAGNOSTIC DE L'INSTALLATION.....	16
II.1.1. Généralités sur l'énergie photovoltaïque.....	16
II.1.2. Aménagement du site.....	16
II.1.3. Principe de fonctionnement.....	18
II.1.4. Caractéristique du réseau de distribution.....	20
II.1.4.1. Spécificités de la centrale de production d'Ifotaka.....	20
II.1.4.2. Fiche signalétique.....	21
II.1.5. Types de services.....	22
II.1.5.1. Nombres d'équipements par type de service.....	23
II.1.5.2. De la production à la vente.....	24
I.1.5.2.1. Frais d'installation.....	24
II.1.5.2.2 Prix de l'électricité.....	24
Chapitre 2 : ANALYSES TECHNICO-ECONOMIQUE ET SOCIALE DE LA CENTRALE SOLAIRE D'IFOTAKA.....	25
II.2.1. Spécificité de l'investissement du budget fourniture/installation.....	25
II.2.1.1. Budget d'investissement pour la centrale de production.....	25
II.2.1.2. Budget d'investissement pour les raccordements.....	26
II.2.1.3. Budget d'investissement pour l'installation.....	26
II.2.2. Les charges de fonctionnement.....	26
II.2.3. Taxes du service de l'électricité.....	27
II.2.4. Méthode de calcul du coût total de l'investissement.....	27
II.2.4.1. Calcul de l'amortissement.....	28
II.2.4.1.1. Éléments de calcul de l'amortissement.....	28
II.2.4.1.2. Durée d'amortissements admises.....	28
II.2.4.1.3. Calcul de l'Annuité.....	29
Chapitre 3 : REALISATION D'UN LAMPADAIRE SOLAIRE AUTONOME.....	30
II.3.1. Définition.....	30
II.3.2. Résumé Descriptif du système photovoltaïque.....	30

II.3.3. Principe de fonctionnement d'un lampadaire solaire.....	30
II.3.4. Cas des lampadaires solaires autonomes à Ifotaka.....	31
II.3.5. Conception d'un régulateur de charge.....	32
II.3.5.1. Régulateur de charge par semi-conducteur.....	32
II.3.5.2. Régulateur de décharge profonde avec coupure électromagnétique.....	33
II.3.6. Conception d'un interrupteur crépusculaire.....	35
II.3.6.1. Définition.....	35
II.3.6.2. Photorésistance.....	35
II.3.6.3. Schéma de montage.....	36
PARTIE III : RESULTATS DES TRAVAUX.....	37
Chapitre 1 : RESULTATS DU STAGE.....	38
III.1.1. Résultats des calculs.....	38
III.1.2. Résultats de l'amortissement.....	38
III.1.3. Solution proposée.....	39
III.1.3.1. Augmentation du prix du kWh.....	39
III.1.3.2. La centrale utilisée comme point de recharge.....	41
Chapitre 2 : LES RESULTATS DU PROJET.....	43
III.2.1. Montage du lampadaire.....	43
III.2.1.1. L'interrupteur crépusculaire.....	43
III.2.1.2. Le régulateur de charge.....	44
III.2.2. Prototype du lampadaire solaire.....	45
III.2.3. Coût du projet.....	45
CONCLUSION.....	46
BIBLIOGRAPHIE.....	47
WEBOGRAPHIES.....	47
ANNEXE 1 : Production d'électricité journalière.....	48
ANNEXE 2 : Exemple de tableau d'amortissement.....	50
ANNEXE 3 : Comparateur.....	51
ANNEXE 4 : Transistor.....	52
ANNEXE 5 : Diviseur de tension.....	53

## **LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES**

ADER : Agence de Développement de l'Electrification Rurale  
All : Allemand  
An : Annuité  
Ar : Ariary  
CH<sub>4</sub> : Méthane  
CNRIT : Centre National de Recherches Industrielle et Technologique  
CO<sub>2</sub> : Gaz carbonique  
CTI : Coût Total de l'Investissement  
CSB II : Centre de Santé de Base Niveau II  
DS : Service Domestique  
EP : Eclairage Public  
EPP : Ecole Primaire Public  
CC : Capital Cost  
CEG : Collège d'Enseignement Général  
CTI : Coût Total d'Investissement  
DA : Délai d'Amortissement  
FNE : Fonds National de l'Energie  
FONDEM : Fondation Energies pour le Monde  
Fr : Français  
GES : Gaz à Effet de Serre  
JIRAMA : Jiro sy Rano Malagasy  
LDR: Light-Dependent Resistor  
LED: Light Emitting Diode  
MIER : Master d'Ingénierie en Energies renouvelables  
Mg : Malgache  
MPPT : Maximum Power Point Tracking  
ONG : Organisation Non Gouvernementale  
ONUDI : Organisation des Nations Unies pour le Développement Industriel  
ORE : Office de Régulation de l'Electricité  
PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement  
PV : Photovoltaïque  
RIP : Route d'Intérêt Provinciale  
SES : Service économique et Sociale  
TV : Télévision  
TVA : Taxe sur les valeurs ajoutées  
€ : Euro

## NOMENCLATURES

Nom de Variable	Désignation	Unité
$C_f$	Charge de fonctionnement	[Ar], [€]
CTI	Coût total de l'investissement.	[Ar], [€]
$E_j$	Consommation journalière.	[kWh/jour]
$n$	Durée en jours	[j]
$N$	Durée d'utilisation	[ans]
$P_c$	Puissance crête.	[Wc]
$P_{vu}$	Prix de vente unitaire.	[Ar], [€]
$P_u$	Puissance Unitaire.	[W]
$R$	Rendement.	[%]
SOC	Etat de charge de la batterie	[%]
$t$	Taux d'amortissement	[%]
$T_{pa}$	Puissance annuelle produite.	[MWh]
$T_{va}$	Total des ventes annuelles d'électricité.	[Ar], [€]
$V_e$	Tension d'entrée	[V]
VNC	Valeur Nette Comptable	[Ar], [€]
$V_o$	Valeur d'origine	[Ar], [€]
$V_s$	Tension de sortie	[V]
$V_{ref}$	Tension de référence	[V]
UBATT	Tension de la batterie	[V]

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Organigramme du CNRIT.....	5
Figure 2 : Panneau de représentation du Programme BOREALE.....	11
Figure 3 : Photo satellite de la Commune d’Ifotaka.....	12
Figure 4 : Habitants d’Ifotaka.....	13
Figure 5 : Quelques infrastructures existantes.....	13
Figure 6 : Transport public quotidien, au stationnement d’Amboasary Sud.....	14
Figure 7 : Centrale Photovoltaïque d’Ifotaka.....	17
Figure 8 : Salle de batteries.....	17
Figure 9 : Salle de matériels de régulation et de conversion.....	18
Figure 10 : Photos des Régulateurs vario string MPPT 120A-48V.....	18
Figure 11 : Batteries HOPPECKE montées en série.....	19
Figure 12 : Onduleur de marque « Studer » .....	20
Figure 13 : Production d’électricité journalière (Février-Mars 2017) .....	20
Figure 14 : Exemple de facture de l’électricité.....	24
Figure 15 : Maintenance du lampadaire solaire à Ifotaka.....	31
Figure 16 : Lampadaire solaire à Ifotaka.....	31
Figure 17 : Régulateur de charge par semi-conducteur .....	33
Figure 18 : Schéma comparateur.....	33
Figure 19 : Régulateur de décharge profonde.....	34
Figure 20 : Photorésistance.....	35
Figure 21 : Schéma de montage interrupteur crépusculaire.....	36
Figure 22 : Courbe d’amortissement sur un prix de revient unitaire de 0,27€.....	39
Figure 23 : Courbe d’amortissement sur un prix de revient unitaire de 1,67€.....	40
Figure 24 : Courbe d’amortissement sur un prix de revient unitaire de 0,75€.....	42
Figure 25 : Montage du panneau.....	43
Figure 26 : Montage de l’interrupteur crépusculaire.....	43
Figure 27 : Montage du régulateur.....	44
Figure 28 : Prototype du lampadaire solaire .....	45
Figure 29 : Transistor bipolaire.....	52
Figure 30 : Quadripôle à transistor NPN.....	52
Figure 31 : Exemple de pont diviseur.....	53

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristique du réseau de distribution.....	20
Tableau 2 : Spécificités de la centrale solaire d’Ifotaka.....	20
Tableau 3 : Fiche signalétique de la centrale.....	22
Tableau 4 : Types de services.....	23
Tableau 5 : Nombres d’équipements par type de service.....	23
Tableau 6 : Frais d’installations.....	24
Tableau 7 : Budget d’investissement pour la centrale solaire.....	25
Tableau 8 : Budget d’investissement pour les raccordements.....	26
Tableau 9 : Total budget.....	26
Tableau 10 : Charges de fonctionnement.....	26
Tableau 11 : Taxes sur l’électricité de la centrale d’Ifotaka.....	27
Tableau 12 : Eléments de calcul de l’amortissement.....	28
Tableau 13 : Durée d’amortissement.....	28
Tableau 14 : Résultats des calculs.....	38
Tableau 15 : Résultats de l’amortissement pour 0,27€ le kWh.....	38
Tableau 16 : Résultats de l’amortissement pour 1,67 € le kWh.....	40
Tableau 17 : Budget d’investissement pour un point de recharge.....	41
Tableau 18 : Résultats de l’amortissement pour 0,75 € le kWh.....	42
Tableau 19 : Liste des composantes du régulateur de charge par semi-conducteur.....	44
Tableau 20 : Liste des composantes du régulateur de décharge profonde.....	44
Tableau 21 : Coût du projet.....	45
Tableau 22 : Production d’électricité journalière (Février 2017) .....	48
Tableau 23 : Production d’électricité journalière (Mars2017) .....	49
Tableau 24 : Exemple de tableau d’amortissement.....	50
Tableau 25 : Différents comparateurs.....	51

# Introduction

L'énergie est l'un des moteurs de développement des sociétés, elle est aussi le pilier de l'économie moderne. Elle est l'étincelle qui permet l'accomplissement de toute activité humaine. Ses sources se sont diversifiées au cours du temps afin de satisfaire aux besoins toujours croissants de l'industrie et des autres consommateurs.

Depuis quelques années, on a constaté des changements notables sur les conditions climatiques ainsi que l'environnement. Plusieurs scientifiques de diverses disciplines se sont intéressés au sujet et ont révélé que ces changements sont liés aux gaz présents dans notre atmosphère. Plusieurs gaz contribuent à l'effet de serre dont le dioxyde de carbone ou CO<sub>2</sub>, le méthane ou CH<sub>4</sub>. La conséquence la plus palpable de l'effet de serre est le réchauffement climatique. Ce réchauffement sur terre et dans les océans s'accélère et devient très alarmant.

Pour éviter que notre climat ne s'emballe, beaucoup de scientifiques recommandent que la température moyenne n'augmente pas de plus de 2°C d'ici 2100 par rapport à 1850. Cela signifie que la quantité de gaz à effet de serre dans notre atmosphère doit immédiatement diminuer. Sans cela, les bouleversements risquent d'être irréversibles.

C'est la raison pour laquelle la COP21 a été mise en place, Il s'agit d'une grande conférence internationale qui a eu lieu au Bourget du 30 novembre au 11 décembre 2015. Les représentants de 196 pays se sont réunis pour négocier un accord dont l'objectif est justement de limiter le réchauffement planétaire à 2 °C d'ici 2100 par rapport à 1850 ; de poursuivre les efforts pour limiter ce réchauffement à 1,5°C. Une des principales résolutions de la COP21 est le développement des énergies renouvelables. C'est pourquoi, l'approvisionnement en électricité basé sur l'utilisation des énergies renouvelables, entre autres, se situe dans la droite ligne de la réforme du secteur énergie et s'inscrit dans la Nouvelle Politique Energétique de l'État Malgache. A Madagascar, les trois-quarts des 23 millions d'habitants résident en milieu rural et ne sont pas raccordés au réseau d'électricité de la compagnie nationale, confiné dans les grandes villes. Or, l'absence d'infrastructures énergétiques dans les campagnes péjore le développement des activités artisanales et industrielles, ainsi que la création d'emplois, ce qui favorise l'exode rural. Aujourd'hui, les besoins en éclairage sont généralement assurés par les bougies et occasionnellement par les lampes à pétrole. Moins de 5 % des villageois bénéficient d'une production d'électricité par des groupes électrogènes alimentés par un combustible coûteux ne permettant pas l'éclosion de petits réseaux de distribution en îlot. D'ailleurs les énergies fossiles produisent des gaz à effet de serre, GES.



Comme toutes les Communes Rurales de Madagascar, la Commune Rurale d'Ifotaka, District d'Amboasary, Région de l'Anosy, est assez difficile d'accès et isolée et éloignée de la zone interconnectée de la JIRAMA. C'est pourquoi, les villageois ont bénéficié d'une centrale solaire photovoltaïque du programme Boréale, dont l'objectif est de promouvoir le développement de l'accès à l'électricité renouvelable. Mais la question qui se pose est : « Une centrale solaire photovoltaïque peut-elle vraiment répondre aux attentes des ménages ? » et « à quel prix ? ». Aussi, existe-il une adéquation entre les réponses à ces deux questions ? Pour répondre à ces questions, nous sommes descendus à Ifotaka pour effectuer le Diagnostic et l'Analyse technico-économique de la Centrale Photovoltaïque d'Ifotaka.

Les résultats de ces études comportent trois parties : La première partie sera consacrée à l'étude de l'environnement de la centrale solaire. Ensuite la seconde partie concernera les matériels et méthodes qui permettront le diagnostic de l'installation ainsi que l'analyse technico-économique. Et enfin la troisième partie présentera les résultats de ces études, leurs interprétations et les solutions proposées.

# **PARTIE I : CONTEXTE DE L'ETUDE**

## **CHAPITRE 1 : CADRE DU STAGE**

### **I.1.1. Présentation du lieu de stage, le Centre National de Recherches Industrielle et Technologique (CNRIT)**

#### **I.1.1.1. Historique et localisation**

Le Centre National de Recherches Industrielle et Technologique (CNRIT), sise au 38, rue Rasamimanana, Fiadanana, Antananarivo 101 a été créé par le décret n° 87 – 288 du 28 juillet 1987 et réorganisé par le décret n°92-469 du 22 avril 1992, et est un établissement public à caractère industriel et commercial doté de la personnalité civile et d'autonomie de gestion administrative et financière. Le CNRIT est placé sous tutelle technique du Ministère de l'Education Supérieure et des Recherches Scientifiques, et sous tutelle financière du Ministère des finances et du budget.

#### **I.1.1.2. Objectif spécifique**

Il est appelé à contribuer au renforcement de l'ensemble du potentiel scientifique et technique locale :

- Contribution à la formation,
- Contribution à l'information et à la documentation scientifique et technique,
- Contribution au renforcement d'infrastructure et de l'équipement scientifique et technique

#### **I.1.1.3. Mission**

Compte tenu des objectifs précédents, le CNRIT a défini une méthode d'approche comprenant les lignes de conduite complémentaires suivantes :

- ✓ En amont de ses activités, le CNRIT doit développer une coopération étroite avec la formation et la recherche menée au niveau des universités et des autres institutions. Dans ce domaine, il vise à mobiliser, à renforcer éventuellement et orienter le potentiel scientifique et technique déjà existant vers une meilleure maîtrise de certaines techniques de base, la connaissance plus approfondie du contexte local pour l'application de ses techniques et leur adaptation ;
- ✓ En aval de ses activités, le CNRIT doit développer une coopération étroite avec les « acteurs de développement », utilisateurs normaux des résultats de son activité ;
- ✓ Enfin dans ses activités propres, le CNRIT doit donner la priorité à la mise en place de petites équipes au niveau des installations 'pilote' de Recherche/Développement dans un certain nombre de techniques de base compte tenu les priorités actuelles de développement et des activités déjà existantes dans divers secteurs.

#### I.1.1.4. Organigramme

La structure organisation du Centre National de Recherches Industrielle et Technologie peut être présentée par l'organigramme ci-après :

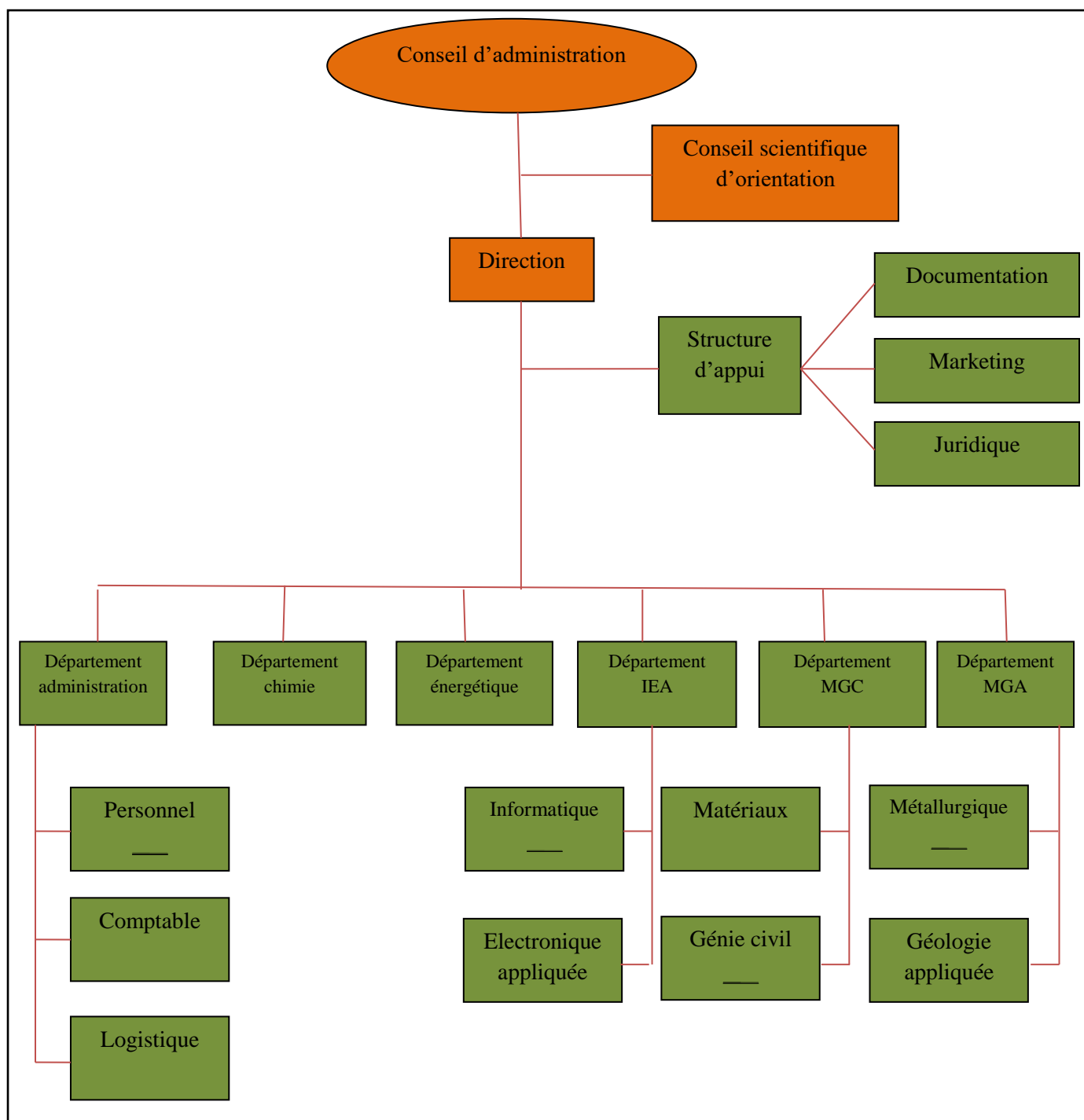


Figure 1 : Organigramme du CNRIT

Source : CNRIT

### **I.1.2. L'Agence de Développement de l'Electrification Rurale (ADER)**

Madagascar dispose d'un potentiel solaire relativement important. L'île bénéficie d'un gisement solaire de 2 000 kWh/m<sup>2</sup>.an et d'un ensoleillement supérieur à 2 800 heures par an sur toutes les régions du pays. Cette aubaine reste sous-exploitée malgré les projets et programmes lancés par l'Etat Malgache, entre autres le programme ONUDI MAG 88 025 intitulé Recherche/Développement des énergies renouvelables, lancé dans les années 90. Ce programme a été financé par l'ONUDI, soutenu par le PNUD, sous tutelle Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique, avec la collaboration du Ministère de l'Energie. Des installations pilotes utilisant les énergies renouvelables ont été réalisées. La plupart d'entre elles tombent en panne, car les Communes, auxquelles elles ont été confiées n'ont pas pu financer les charges de leur fonctionnement et/ou entretien. Conscient du défi à relever, le gouvernement malgache a créé en 2002 l'Ader (Agence pour le Développement de l'Électrification Rurale). Cette dernière a pour mission principale d'aider les « partenaires techniques et financiers dans leurs efforts pour améliorer l'accès des populations Rurales et périurbaines à des services énergétiques de base ». Dans sa stratégie, l'Ader donne la priorité aux énergies renouvelables et en particulier au développement d'installations photovoltaïques.

#### **I.1.2.1. Objectifs :**

L'ADER vise la réalisation des objectifs suivants :

- Promouvoir l'émergence et le développement rationnel d'installations électriques en milieu rural, notamment au travers de l'attribution de subventions d'équipements prélevées sur le Fonds National de l'Electricité prévu à l'article premier de la Loi N°2002-001 du 7 octobre 2002 portant création du Fonds National de l'Electricité pour atténuer le tarif appliqué aux consommateurs ;
- Assurer les conditions de viabilité technique, économique et financière des Exploitants en milieu rural, notamment par la promotion et l'émergence de nouveaux exploitants ainsi que d'en assurer une assistance technique ;
- Veiller, en coordination avec l'Organisme Régulateur, à la préservation des intérêts des clients finaux en milieu rural et renforcer la protection de leurs droits, notamment au travers d'une action tendant à promouvoir l'émergence de l'organisation de groupements représentant les clients des opérateurs en milieu rural, tant au niveau local que national ;
- Suivre les activités relatives à l'électrification Rurale dans tous ses aspects économiques, statistiques et techniques ;

- Appuyer et soutenir les initiatives de développement rural et le bon fonctionnement des services sociaux de base en milieu rural.

Dans ce cadre, l'ADER est notamment chargée de promouvoir et d'encourager la soumission de projets en matière d'Electrification Rurale. De plus, elle statue périodiquement sur les demandes d'octroi de financement et de subventions à la réalisation de tels projets.

#### **I.1.2.2. Progrès accompli :**

L'électrification Rurale a bénéficié de l'appui de nombreux partenaires techniques et financiers, et des progrès remarquables ont été enregistrés au niveau équipements durant ces 10 années d'existence de l'ADER, puisque le taux d'accès à l'électricité dans les zones Rurales est passé de 1% en 2000 à plus de 6% en 2013.

Les réalisations de l'ADER depuis son début en 2005 sont de presque 4,5 MW. 192 villages ont bénéficié de l'électricité solaire et/ou éolienne et le portefeuille de projets est de 140, dont 84 candidatures spontanées, le reste provenant d'appels d'offres. Parmi les 47 exploitants autorisés, 29 sont fonctionnels. Les projets qui ne marchent pas sont surtout les installations thermiques (55% en arrêt). Depuis 2013 l'ADER a cessé d'approuver des projets thermiques et est en voie de remplacement des stations existantes par l'hydraulique, l'éolienne, la biomasse ou le solaire.

#### **I.1.2.3. Stratégie :**

Pour l'avenir, l'ADER ambitionne d'atteindre un taux d'accès à l'électricité de 10% en 2020, avec plus de 75% de la production à partir de ressources renouvelables.

Les nouvelles orientations stratégiques prévoient de :

- Renforcer le partenariat avec d'autres entités, notamment les banques
- Augmenter la puissance des sites hydroélectriques à aménager pour alimenter plus de villages ruraux et de raccorder éventuellement des centres autonomes thermiques de la JIRAMA (des aménagements hydroélectriques développés par la JIRAMA pourront aussi alimenter des zones Rurales, comme l'aménagement de la Lokoho).

Pour motiver les investisseurs, des appels à candidatures ou des appels à projets, (où le partenaire effectue les activités de toute la gamme de l'étude à l'exploitation pour des lots regroupant plusieurs sites), vont être lancés.

### **I.1.3. Contexte du Stage**

Le stage de fin d'études est un passage obligatoire, dans le cursus de formation, pour les étudiants voulant obtenir le diplôme de Master d'Ingénierie en Energies Renouvelables à l'Université d'Antananarivo. Ainsi, en tant qu'étudiant dans ce domaine, nous avons eu l'opportunité de passer trois mois de stage au Département Energétique du CNRIT (Centre National de Recherches Industrielle et Technologique), dont trois semaines ont été passées dans la Commune Rurale d'Ifotaka dans le Sud de Madagascar.

Malgré l'existence des ressources énergétiques renouvelables abondantes sur tout le territoire de Madagascar, la consommation énergétique globale du pays demeure très faible. Le bois et ses dérivés occupent une grande partie de cette consommation, qui représente plus de 90% de la demande.

En ce qui concerne l'électrification, compte tenu de la dépendance de Madagascar en hydrocarbures au niveau de la production, le coût de ce produit reste très élevé. Le taux d'électrification national tourne de ce fait autour de 28% seulement. Le milieu urbain présente un taux de couverture de 65% tandis que celui du milieu rural est de 6% seulement [9].

Bien que Madagascar ne dispose pas encore de cadre juridique spécifique aux énergies renouvelables, des projets entrant dans le développement de ce sous-secteur, notamment en fourniture d'énergie électrique, ont quand même pu être menés grâce à la réforme du secteur de l'électricité.

C'est dans cette perspective que l'ADER a piloté des projets de promotion et de développement d'électrification Rurale. Et, c'est dans ce contexte que s'inspire le thème de ce mémoire.

## **CHAPITRE 2 : LE SECTEUR ELECTRIQUE A MADAGASCAR**

### **I.2.1. Généralités sur l'électrification à Madagascar**

Les ressources énergétiques de Madagascar sont le bois (92% en équivalence énergétique), les produits pétroliers (7%) et les énergies renouvelables (1%). Le bois est surtout utilisé principalement pour la cuisson domestique. En milieu rural, le pétrole lampant, la bougie et les panneaux solaires photovoltaïques assurent l'éclairage. En milieu urbain, à part son usage domestique, l'électricité est utilisée par le secteur industriel. Le transport et les centrales thermiques consomment la plus grande partie des produits pétroliers. L'électricité est peu répandue, car seulement 12% des ménages avaient accès à l'électricité en 2011 selon l'ADER. Depuis 2011, le taux d'électrification a augmenté quelque peu mais n'a probablement pas encore atteint 15% de la population. Un document récent de l'ADER indique un taux d'accès en milieu rural de 6,2% [1].

Les acteurs du secteur sont le Ministère de l'Energie, les autres Ministères avec une activité de production ou d'importation énergétique, la société nationale de l'électricité et de l'eau (JIRAMA), le régulateur de l'électricité (ORE), l'agence chargée de l'électrification Rurale (ADER), les producteurs privés de l'électricité, les consommateurs particuliers de l'électricité et de l'énergie, notamment pour la cuisson, et le secteur privé et public consommateur de l'énergie et l'électricité à grande échelle.

La compagnie d'électricité JIRAMA exploite au total 114 centres de production, couvrant les grands centres urbains et quelques grands centres ruraux. Deux réseaux interconnectés, Antananarivo et Fianarantsoa, comprennent au total 22 centres. Cinq sont des grands centres autonomes : Toamasina, Mahajanga, Antsiranana, Toliara et Nosy Be. Les 87 centres restants sont des moyens et petits centres autonomes dont environ 30 centres sont ruraux avec une puissance installée de moins de 250 KW [2].

En premier lieu, l'électrification rurale cible le remplacement des sources d'énergie pour l'éclairage, les services de communication et les activités productives et non la cuisson. Les initiatives de remplacement des combustibles ligneux de cuisson comprennent l'agro carburant, le gaz butane, les fours solaires, et le biogaz... Mais il n'y a aucun doute, que le pays restera dépendant des combustibles ligneux pour un horizon assez lointain.



### **I.2.2. Les énergies renouvelables à Madagascar**

Le développement du secteur de l'électricité à Madagascar accuse un retard significatif et les performances du secteur sont globalement médiocres, alors que le pays dispose d'un potentiel énorme en ressources d'énergies renouvelables, notamment l'hydraulique, le solaire et l'éolien. Plusieurs sites prometteurs, de différentes tailles, et localisés dans différents lieux du pays ont été identifiés et pouvant produire jusqu'à 7780MW mais la puissance installée sur tout le territoire national n'est que de 287MW. Près de deux tiers de l'électricité est d'origine hydraulique. 12 centrales hydroélectriques produisent 68% de l'énergie électrique et 95 centrales thermiques assurent le reste. Les centrales hydrauliques d'Andekaleka (58MW) et de Mandraka (24MW) sont les plus importantes [2].

L'île bénéficie d'un gisement solaire de 2 000 kWh/m<sup>2</sup>.an et d'un ensoleillement supérieur à 2 800 heures par an sur toutes les régions du pays. Enfin, le potentiel éolien est assez conséquent avec une vitesse de vent moyenne de 6 à 9 m/s à 50 mètres de hauteur. Il existe également quelques ressources d'énergie géothermique, et la biomasse issue des déchets forestiers et agricoles et agro-industriels [2].

### **I.2.3. Objectif du travail**

#### **I.2.3.1. Objectif général**

L'objectif général de ce travail est d'évaluer les avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques sur le développement technico-économique et social, et d'apporter des résolutions qui puissent les améliorer, dans le but de faciliter leur vulgarisation dans les milieux ruraux.

#### **I.2.3.2. Objectifs spécifiques**

Afin d'atteindre cet objectif général, des objectifs spécifiques devront être considérés, tels que :

- Identifier les activités génératrices de revenus pouvant être générées par la technologie photovoltaïque.
- Faire le suivi d'exploitation des services mis en place et étudier la rentabilité.

### **I.2.4. Le Programme BOREALE**

Le programme Boréale est un programme d'électrification rurale par les énergies renouvelables, cofinancé par l'Union Européenne et le Ministère de l'Energie de Madagascar, avec l'appui de partenaires privés et des fondations publiques, dans le cadre de la Facilité Energie (UE).

Le programme Boréale a été mise en œuvre entre 2013 et 2017, avec pour objectif le développement de l'accès à l'électricité renouvelable. A peu près 10.000 ménages dans les régions Anosy et Androy du Sud de Madagascar en ont bénéficié, dont la Commune Rurale d'Ifotaka. Desormais, la population de cette Commune a la possession avantageuse de l'électricité grâce à la centrale solaire photovoltaïque qui y est installée.

Le programme Boréale est piloté en délégation de maîtrise d'ouvrage par la Fondation Energies pour le Monde (FONDEM), appuyé par l'Agence De l'Electrification Rurale (ADER) et l'ONG Kiomba, partenaire du projet.

La conception technique des ouvrages, la maitrise d'œuvre et la réalisation ont été faites par les Entreprises Hacsé (Fr), Asantys (All) et SunEnergie (Mg).



Figure 2 : Panneau de représentation du Programme BOREALE

## CHAPITRE 3 : MONOGRAPHIE DE LA COMMUNE D'IFOTAKA

### I.3.1. Résumé de la monographie de la localité

#### I.3.1.1. Localisation :

La Commune d'Ifotaka est située à la latitude : 24,80° Sud et longitude : 46,13° Est, entre la zone sédimentaire du Sud (à vocation agricole) et cristalline au Nord (à vocation pastorale) de l'Anosy, elle se trouve à 45 km au Nord- Ouest d'Amboasary sud, bâtie sur la rive droite du fleuve Mandrare.

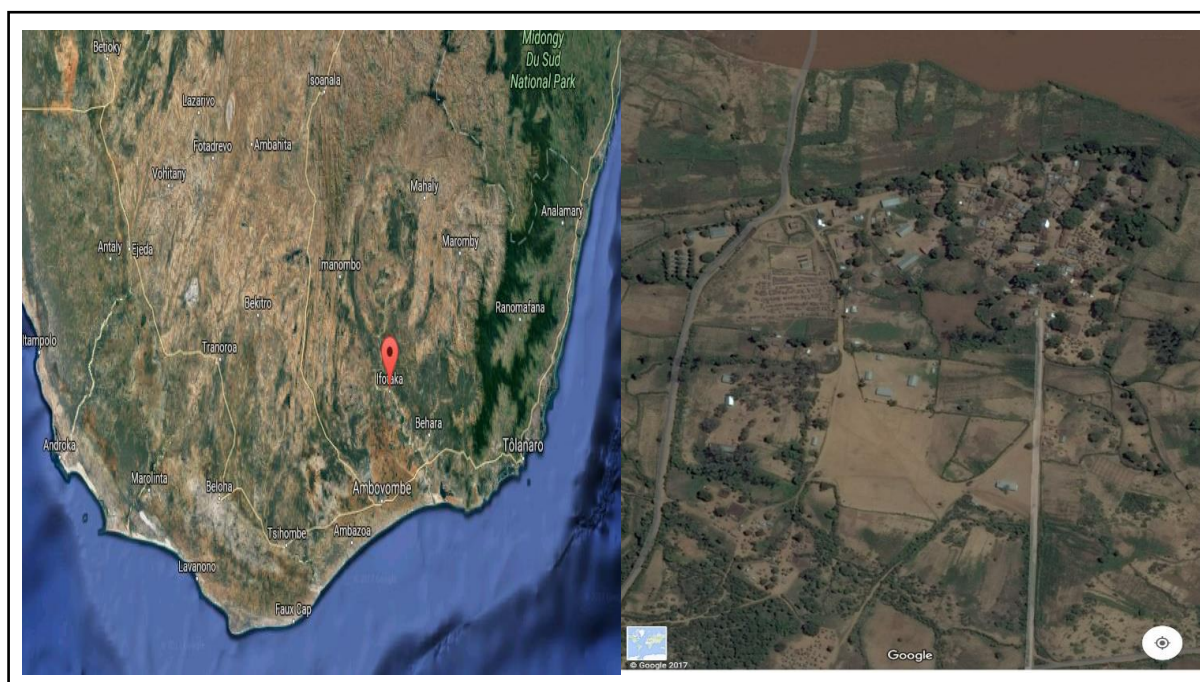


Figure 3 : Photo satellite de la Commune Ifotaka      Source : Google Map

#### I.3.1.2. Population :

La population est composée de 90 % d'Antandroy, avec une minorité d'Antanosy, de Betsileo, de Merina et de Tavaratra (Tesaka). Deux des quatre fokontany du chef-lieu de la Commune d'Ifotaka sont concernés par le projet Boréale, dont 150 ménages pour Ifotaka centre-ville et 102 ménages pour le fokontany d'Akilitombo. La figure 4 nous montre la vie quotidienne et le jour du marché des habitants de la Commune Rurale d'Ifotaka.





Figure 4 : Habitants d’Ifotaka

#### **I.3.1.3. Infrastructure sociale :**

On y trouve plusieurs infrastructures comme, une Ecole Primaire Public (EPP), un Collège d’Enseignement Général (CEG), un marché sous hangar, le Bureau de la Commune Rurale d’Ifotaka, un Centre de Santé de Base Niveau II (CSB II), un Poste de la gendarmerie, une Eglise Luthérienne, une Eglise Catholique, un Centre d’étude et une grande salle de fêtes ou d’évènements de la Commune ou « Tranompokonolona », illustrées par la figure 5 ci-après.



Figure 5 : Quelques infrastructures existantes.

#### **I.3.1.4. Moyen de subsistance des ménages :**

L'élevage de zébus, de chèvres, de moutons et de volailles, la culture de manioc, de canne à sucre, de patate douce et maïs, la culture maraichère, la pêche en eau douce, le commerce, la culture de sisal sont les principaux moyens de subsistance de la population d'Ifotaka. La Commune d'Ifotaka est classée en difficultés alimentaires chroniques, surtout pendant la période de soudure du mois de Septembre au mois de Mars.

#### **I.3.1.5. Accessibilité :**

En partant de Fort-Dauphin ou d'Amboasary, Ifotaka n'a qu'une seule voie d'accès : c'est la Route d'Intérêt Provinciale (RIP) reliant Amboasary à Ifotaka.

La distance qui sépare Fort-Dauphin et Ifotaka est de 120 km dont 75 km en route bitumée et 45 km en route secondaire. Pendant la saison des pluies, la RIP est difficilement praticable. Il faut des véhicules tout-terrain le moyen de locomotion des habitants de ce lieu.



Figure 6 : Transport public quotidien, au stationnement d'Amboasary Sud

#### **I.3.1.6. Source d'énergie utilisée :**

Avant l'installation de la centrale photovoltaïque, la source d'énergie pour toutes ses formes utilisées par les habitants d'Ifotaka n'était que des bougies et pétrole lampant pour l'éclairage, des piles pour les lampes et radios et des batteries rechargeables assurant les charges des téléphones portables.

Quelques ménages et commerçants utilisaient les groupes électrogènes pour l'éclairage et des applications spécifiques (notamment postes TV + lecteur). Avant le projet Boréale, des panneaux solaires étaient déjà fonctionnels pour le pompage d'eau et alimentant un centre informatique.

## **PARTIE II : MATERIELS ET METHODES**

## **CHAPITRE 1 : DIAGNOSTIC DE L'INSTALLATION**

### **II.1.1. Généralités sur l'énergie photovoltaïque**

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par l'ensemble de cellules dites photovoltaïques (PV), basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque, qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière (une énergie suffisante). La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un module photovoltaïque.

Bien que l'énergie photovoltaïque soit connue depuis plusieurs années comme source pouvant produire de l'énergie électrique allant de quelques milliwatts au mégawatt, elle reste encore à un stade peu connu et très peu développé, notamment à cause des coûts trop élevés des capteurs. De plus, plusieurs problèmes techniques doivent être résolus pour amener ces systèmes à un degré de maturité suffisant pour en faire des produits industriels à part entière. Les problèmes concernent autant le matériau de conversion photovoltaïque, qui reste cher à synthétiser, que la chaîne de conversion, qui présente beaucoup de pertes lors d'une utilisation mal adaptée. Il existe d'autres problèmes extérieurs comme la température, le site d'implantation et le problème d'ombrage. Plusieurs lois de commande spécifique ont été développées, permettant d'optimiser la production d'énergie photovoltaïque afin d'assurer un meilleur rendement de conversion. C'est dans ce cadre que se situe actuellement un marché pour une nouvelle forme de générateurs photovoltaïques raccordés au réseau, qui sont la préfiguration des centrales photovoltaïques de demain. En effet, les centrales PV raccordées au réseau permettent d'éviter le problème de stockage par batteries qui sont, de plus, très chères pour l'installation. Dans ce cas, les surplus de production sont injectés dans le réseau qui agit comme un réservoir d'énergie.

### **II.1.2. Aménagement du site :**

Depuis le début de l'année 2016, les villageois bénéficient de l'électricité grâce à l'installation de la première centrale solaire du programme Boréale. Depuis les cérémonies de pose de la première pierre, les travaux ont, partout, été bon train. Les locaux techniques ont été préparés et les équipements électriques et photovoltaïques réceptionnés. Partis d'Europe en bateau en Juin 2015, les 8 containers de 20 pieds sont en effet arrivés fin Août 2015 dans cette zone isolée du Sud malgache. La qualité et la conformité de l'ensemble ont été vérifiées par un expert français en présence de représentants du ministère de l'Énergie et de l'Agence de développement de l'électrification Rurale. Le consultant a également accompagné la société



malgache SunEnergy, chargée de réaliser l'installation de la centrale d'Ifotaka. Un appui qui lui a permis de monter correctement tous les équipements et matériels.



Figure 7 : La Centrale Photovoltaïque d'Ifotaka



Figure 8 : Salle de batteries





Figure 9 : Salle de matériels de régulation et de conversion

### II.1.3. Principe de fonctionnement :

Le générateur solaire, composé de modules photovoltaïques assemblés en série, délivre en journée une puissance électrique de tension et intensité variable, de type continu (courant CC), la tension varie de 280 à 350 V environ, l'intensité pour chaque champ PV de 10 modules, varie de 1 à 10 A. Cette puissance électrique est amenée aux régulateurs de charges (VS120), qui ont pour fonction principale de convertir la puissance électrique reçue des champs PV en puissance électrique compatible pour charger les batteries. La tension d'entrée des régulateurs peut accepter une plage de 200 à 600 V en provenance des champs PV, mais en sortie le régulateur abaissera cette tension à une plage de 45 à 65 V compatible avec la charge des batteries. Cette conversion se fait avec un rendement 95% environ, ce qui veut dire qu'il y a 5% de perte d'énergie, raison pour laquelle les régulateurs chauffent et activent parfois leurs ventilateurs internes.



Figure 10 : Photos des Régulateurs vario string MPPT 120A-48V

La puissance électrique convertie par les régulateurs est en partie stockée par les batteries sous forme d'énergie chimique, l'autre partie alimente directement le réseau. La charge des batteries est régulée par les algorithmes internes des régulateurs, qui adaptent en permanence le courant et la tension de charge en fonction de nombreux paramètres (niveau de décharge, température, puissance solaire disponible, nombre de cycle, etc...). La transformation de l'énergie électrique en énergie électrochimique se fait avec un rendement moyen de 85%, soit une nouvelle perte de 15%, ce qui explique pourquoi les batteries peuvent légèrement chauffer lorsqu'elles sont en charge. Les batteries de type plomb/acide sont des accumulateurs unitaires de tension nominale 2V. Les éléments de batterie sont donc raccordés en série pour atteindre un parc de 48V (24 éléments en série).



Figure 11 : Batteries HOPPECKE montées en série

En pratique, la tension d'un parc de batteries varie de 46V (batterie déchargée) à 50V (batterie complètement chargée, en état de repos). Pendant les journées ensoleillées, la tension de la batterie varie de 50 à 56V, voir 60V, correspondant à différents seuils de charge gérés par l'algorithme des régulateurs, et les paramétrages initiaux fixés par les concepteurs.

En sortie des batteries, le courant continu (CC ou DC) est converti par les onduleurs en courant alternatif (CA ou AC), sous le standard 230V/50Hz, alimentant l'ensemble du réseau de distribution.



Figure 12 : Photo des Onduleur de marque « Studer »

#### II.1.4. Caractéristique du réseau de distribution :

Ce tableau 1 montre l'étendue couverte par l'électrification grâce à l'installation de la centrale PV.

Ifotaka	
Superficie couverte par le réseau électrique	<b>17 ha</b>
Longueur estimée du réseau électrique	<b>3, 3 Km</b>

Tableau 1 : Caractéristique du réseau de distribution

##### II.1.4.1. Spécificités de la centrale de production d'Ifotaka

Puissance crête installée	10 kWc
Production utile d'électricité journalière par la centrale	Minimum : 20 kWh / jour
	Moyenne : 29 kWh / jour
	Maximum : 41 kWh / jour

Tableau 2 : Spécificités de la production de la centrale solaire d'Ifotaka

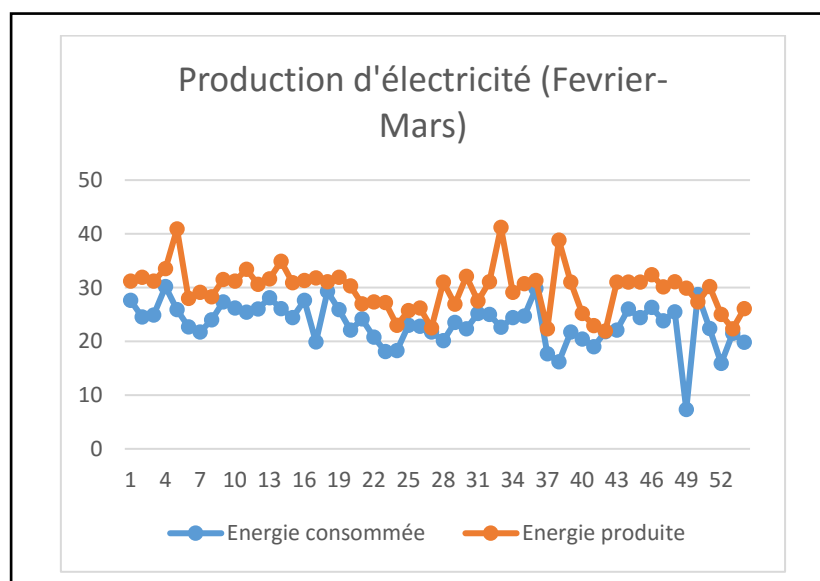


Figure 13 : Production d'électricité journalière (Février-Mars 2017)

### II.1.4.2. Fiche signalétique :

Champ Photovoltaïque	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puissance crête : 10 000 Wc, en tolérance positive</li> <li>- Modules PV : 40 modules 250 Wc, si-poly, 60 cellules 6 pouces</li> <li>- Produit : SolarWorld SW250 Poly</li> <li>- Structure porteuse : Schletter anti cyclone – antivol par résine</li> <li>- Architecture électrique : 4 chaînes de 10 modules en série</li> <li>- Mise en œuvre : orientation nord / inclinaison 30° 240</li> </ul>
Parc de stockage électrochimique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Capacité totale : 2800 Ah sous régime C1 20 @ 48V</li> <li>- Type de stockage : batterie tubulaire pb/acide ouverte à électrolyte liquide</li> <li>- Produit : éléments de 2V Hoppecke OpzS</li> <li>- Architecture électrique : 2 parc de 24 éléments série, raccordés en parallèle</li> <li>- Option : système de brassage d'électrolyte automatisé</li> <li>- Mise en œuvre : sur chantier métallique 1 Hoppecke 979 20</li> </ul>
Ensemble régulation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puissance : 2 x 7 kW nominal (charge 360A @ 48V)</li> <li>- Régulation : MPPT avec séparation galvanique, Vdc max 600V</li> <li>- Produit : 3 régulateurs VarioString 120, Studer Innotec</li> <li>- Configuration : fonctionnement 2 MPPT, câblage parallèle 2289</li> </ul>
Ensemble onduleur	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puissance : 2 x 7 kVA nominal (30 kVA max @ 2sec)</li> <li>- Technologie : conversion DC/AC, séparation galvanique, technologie réversible</li> <li>- Produit : 2 onduleurs XTH 8000, Studer Innotec</li> <li>- Configuration : synchronisation en maître esclave parallèle 7400</li> </ul>
Coffrets et protections	<p>Protections DC côté PV : coupure d'urgence, parafoudre Type 2, equipotentialité des masses métalliques</p> <p>Protection DC côté Batterie : fusibles Gg et coffrets sécurisés</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Protection AC : TGBT général, dispositif de coupure et protection conforme NFC 15-100, parafoudre de type 2, coupure d'urgence</li> </ul>
Câblages et canalisations	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Câbles DC PV : câble unipolaire PV 6mm<sup>2</sup></li> <li>- Câbles DC BA1T : câble HPO7 RNF unipolaire</li> <li>- Câbles AC : câble 3GX HQ7 RNF</li> </ul>

Monitoring	<ul style="list-style-type: none"> <li>- BSP Studer pour mesure tension/courant/température batterie</li> <li>- RCC02 Studer pour pilotage et supervision de l'ensemble de l'installation</li> </ul>
Mini réseau	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Poteaux BT : poteaux bois, 47 poteaux installés / 6 restants</li> <li>- Réseau principal : 2x70 alu, 647 m installé</li> <li>- Réseau secondaire : 2x16 alu, 1250 m installé</li> <li>- Architecture électrique : régime TT avec reprises de MALT -N</li> </ul>
Distribution & raccordements usagers	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Usagers domestiques : via coffret départ client (CDC),</li> <li>- Protection individuelle 2A (disjoncteur), protection collective (10 clients max) par interrupteur différentiel 30mA,</li> <li>- Interrupteur horaire mécanique.</li> <li>- Usagers économiques : branchement direct sur réseau par câble alu 2x16</li> </ul>
Distribution intérieure	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Usagers domestiques : coffret client comportant un disjoncteur général 10A et un compteur électronique.</li> <li>- Usagers économiques : coffret client comportant un départ</li> <li>- Éclairage (protection 10A), un départ prise (protection 16A),</li> <li>- Une protection différentielle (30mA), un interrupteur horaire et</li> <li>- Un compteur électronique</li> </ul>
Eclairage public	- Eclairage public LED : 9 unités
Exploitant	- Toky Construction
Mise en service	- Mars 2016

Tableau 3 : Fiche signalétique de la centrale

### II.1.5. Types de services :

Il existe différents types de services offerts par la centrale photovoltaïque pour subvenir aux besoins des abonnés. Le tableau 4 de la page suivante représente, d'une part les types de services selon la puissance appelée des utilisateurs et selon les usages de l'électricité fournie, et d'autre part la consommation moyenne quotidienne et mensuelle, et le nombre de raccordements.

	Types de Services électriques	Puissance appelée (Watt)	Usages électriques possibles	Consommation Moyenne (*)		Nombres de raccordements
				kWh / jour	kWh/mois	
	Abonnés domestiques					
Services de Base	(DS1)	7,5	Une lampe portable	0,03	0,9	40
	(DS2)	30	Eclairage, recharge téléphone, radio	0,12	3,6	37
	(DS3)	80	Eclairage, recharge téléphone, radio, TV et lecteur vidéo	0,32	9,6	25
	Abonnés économiques					
	(SES1)	40	Eclairage, recharge téléphone, radio	0,16	4,8	2
Services Plus	(SES2)	40	Eclairage, recharge téléphone, radio	0,32	9,6	4
	(SES3)	100	Eclairage, recharge téléphone, radio, machine à coudre, ordinateur, TV/vidéo	0,8	24	8
	(SES4)	130	Eclairage, recharge téléphone, radio, Hifi/TV et froid	1,3	39	4
	Réserve (SES5)	1 700	Projet économique ou social spécifique	3,3	100	1
Total abonnés						121

Tableau 4 : Types de services offerts

#### II.1.5.1. Nombre d'équipements utilisés par type de service :

Niveau de service	Nombre d'équipements par type de service		
	Ampoules	Prises	Interrupteur
DS1	1	0	0
DS2	2	3	2
DS3	3	4	3
SES1	2	3	2
SES2	2	3	2
SES3	4	4	4
SES4	4	4	4
SES5	4	4	4
Eclairage Public	Raccordé au réseau (Y compris 1 pour la centrale)		EP Solaire Sunna Design pour les quartiers périphériques
IFOTAKA	9		3

Tableau 5 : Nombre d'équipements utilisés par type de service

## II.1.5.2. De la production à la vente :

### II.1.5.2.1. Frais d'installation :

Le prix de l'électricité et le coût de la réservation viennent d'une analyse approfondie de la consultation avec les clients et avec l'approbation préalable de l'ORE.

Catégories	Frais d'installation (Ar)
DS1	10 000
DS2	55 000
DS 3	85 000
SES 1	55 000
SES 2	95 000
SES 3	105 000
SES 4	115 000
Eclairage Public EP	95 000
Réserve d'électricité (SES 5)	130 000

Tableau 6 : Frais d'installation

### II.1.5.2.2. Prix de l'électricité :

Le coût de l'électricité par mois est la somme :

- des Taxes communales : 02% selon la règle du conseil communal
- des Taxes FNE : 1,25% du prix de l'électricité pour les clients qui dépensent plus que de 20kWh par mois, conformément à la loi (article 2 du décret n ° 369/2005 du 15 Février)
- du Coût de la consommation du client à raison de **950Ar** par kWh.

FACTURE  
VOLANA: FEVRIER 2017

Anaran'ny Mpitantana : Entreprise TOKY Construction  
Adiresy : Andaboly Ambovombe Androy  
NIF : 3000355615  
N° STATISTIKA : 45 212 52 1955 000004  
N° RCS : RCS/FD/2003/A/0021 (ex: 938)

TARATASIN-DAZAMBIDY LAHARANA FAHA : 009  
Daty nakana ny tohimarika tao amin'ny kaontera : 07 Mars 2017  
Daty namenoana ny taratin-dazambidy : 10 Mars 2017  
Daty nizarana ny taratin-dazambidy : 12 Mars 2017  
Daty farany andoavana ny saram-bidin-jiro : 17 Mars 2017  
Daty hanapahana ny herinaratra : 27 Mars 2017  
Daty hanesorana ny Kaontera : 01 Avril 2017

Kaominina :  
Distrika :  
Faritra :

Ifotaka  
Amboasary-sud  
Anosy

MPANIFA :  
Adiresy :  
Sokajina tolotra ampiasana :  
Laharana Kaontera :  
Laharana batokazo-herinaratra :

VONTSIRASOA Meline  
IFOTAKA  
SES3  
503.2276  
14

23 MAR 2017

**PAYE**

TIANDRAINY Romain Lebel  
Chef de Poste

Tohimarika	Daty nakana ny tarehimarika tao amin'ny kaontera :
Tohimarika farany (kWh)	0.00
Tohimarika vaovao (kWh)	6.90
Totalin'ny herinaratra lany (kWh)	6.90
Vidy amin'ny kWh (Ariary/kWh)	950
Haba alaina hoan'ny fikojakojana sy fampitaovana (Ariary)	14000

Fanondroana	Fahabetsahana herinaratra lany (kWh)	Vidin'ny tsirairay (Ariary)	Fitambaram-bidy (Ariary)
Totalin'ny herinaratra lany	6.90		6,555
Haba alaina hoan'ny fikojakojana sy fampitaovana (Ariary)			14,000
Haba alaina ny ADER/FNE amin'ny herinaratra lany mihooatan'ny 20 kWh (1,25%)	0.00		0
Haba alaina ny Kaominina (2%)			131
Totalin'ny vola aloa			20,686

ity taratasin-dazambidy ity dia fararana amin'ny vola : Enina amby valompolo sy enin-jato sy roa

20686

TIANDRAINY Romain Lebel

Figure 14 : Exemple de facture de l'électricité



## CHAPITRE 2 : ANALYSES TECHNICO-ECONOMIQUE ET SOCIALE DE LA CENTRALE SOLAIRE D'IFOTAKA

La viabilité de n'importe quel projet de grande envergure et en particulier celle d'une filière de production d'électricité solaire ainsi que la sélection de la technologie appropriée est en grande partie déterminée par l'étude technico-économique et même sociale. Dans ce contexte, plusieurs indicateurs significatifs doivent être évalués comme le coût ou le capital total (CC : Capital Cost) de l'investissement pour l'unité de puissance, le délai d'amortissement (DA), l'annuité (An), le coût des opérations de maintenance, la puissance totale du champ kW et enfin le prix de revient unitaire du kWh.

### II.2.1. Spécificité de l'investissement du budget fourniture/installation :

Les différents composants de la centrale PV connectée au réseau ont été estimés financièrement pour déterminer le budget total de l'investissement. Le devis estimatif est représenté dans le tableau du paragraphe ci-dessous.

#### II.2.1.1. Budget d'investissement pour la centrale de production [10] :

Désignation	Montant en euros	Coût estimé en en Ariary
Ensemble champ PV et structure au sol	13 500	47 250 000
Régulateur – onduleur- monitoring	13 000	45 500 000
Parc batteries	25 000	87 500 000
Divers matériels informatiques, coffrets et accessoires, imprévus, outillage maintenance	14 000	31 500 000
Installation et génie civil	6 500	22 750 000
Local technique	19 000	66 500 000
<b>Total Centrale PV de Production</b>	<b>91 000</b>	<b>318 500 000</b>

Tableau 7 : Budget d'investissement de la centrale solaire

Taux de change : 1 € = 3 500 Ar



### II.2.1.2. Budget d'investissement pour les raccordements :

Désignation	Montant en euros	Coût estimé en Ariary
Fourniture matérielle pour service DS 1	1 150	4 025 000
Fourniture matérielle de raccordement pour Abonnés des Services de base= DS2, DS3, SES1 (distribution intérieure et coffrets de raccordement)	11050	38 675 000
Fourniture matérielle de raccordement pour Abonnés des Services Plus = SES2, SES3, SES4, SES5 (distribution intérieure et coffrets de raccordement) et éclairage public	8 300	29 050 000
<b>Total Raccordements</b>	<b>20 500</b>	<b>71 750 000</b>

Tableau 8 : Budget d'investissement pour les raccordements

Taux de change : 1 € = 3 500 Ar

### II.2.1.3. Budget d'investissement pour l'installation :

Désignation	Montant en Euro €	Montant en Ariary Ar
Composants du réseau de distribution	50000	180 000 000
Installation et formation du réseau de distribution	13500	48 600 000
<b>Total budget</b>	<b>175000</b>	<b>630 000 000</b>

Tableau 9 : Total budget

Taux de change : 1 € = 3 500 Ar

### II.2.2. Les charges de fonctionnement :

Les charges de fonctionnement ou dépenses dans la maintenance de la centrale sont calculées pour une année comme il figure dans le tableau 10 ci-dessous :

Charges de fonctionnement	Montant (Ar) /an
Frais du personnel	6 469 560
Frais de maintenance	545 500
Frais de transport	470 000
Frais de carburants	192 500
Frais de services bureautiques	840 000
Frais d'assurance, imprévus	290 836
<b>Total</b>	<b>8 808 396</b>

Tableau 10 : Charges de fonctionnement

### II.2.3. Taxes du service de l'électricité :

Poste de dépenses	Année 1	
	Coût estimé(Ariary)	Justification
Redevance à la Commune	167 774	1% du chiffre d'affaire
Redevance à l'ORE	201 328	1,2% du chiffre d'affaire
Redevance à l'ADER	18 112	1,25 % sur prix de vente pour conso supérieure à 20 kWh/mois/abonné
TVA	0	Non assujetti
<b>TOTAL TAXES</b>	<b>387 214</b>	

Tableau 11 : Taxes sur l'électricité de la centrale d'Ifotaka

### II.2.4. Méthodes de calcul du coût total de l'investissement

Par ailleurs, le Coût Total d'Investissement (CTI) est le montant financier total nécessaire pour mettre en œuvre le projet. Il englobe les charges supplémentaires de l'installation et du transport, ainsi que le prix total d'acquisition des N unités exprimé par l'expression suivante :

$$\text{CTI} = \text{Prix total de l'acquisition des équipements des N unités} + \text{Prix des charges supplémentaires} \quad (1)$$

Un autre paramètre économique et pas des moindres qu'il faut calculer est bien l'annuité (An). Elle représente le revenu de l'investissement en capital versé en une série de paiements réguliers.

Autrement dit, les annuités définissent une suite de versements identiques ou non effectués à intervalles de temps égaux.

#### II.2.4.1. Calcul de l'amortissement :

Pour calculer le coût de l'énergie en tenant compte de l'amortissement dans le temps, on prend en compte dans nos calculs, la durée de vie des composants ainsi que les profits réalisés sur toute la durée active du système.

##### II.2.4.1.1. Éléments de calcul de l'amortissement :

PARAMÈTRES	COMMENTAIRE
An = annuité	C'est l'amortissement annuel
Vo = valeur d'origine	Valeur du bien figurant en immobilisation = coût d'achat + TVA non
N = durée d'utilisation	Durée normale d'utilisation du bien (années)
t = taux d'amortissement	Permet de calculer l'annuité
VNC = Valeur Nette Comptable	Valeur comptable du bien à une date donnée = valeur d'origine - cumul des amortissements

Tableau 12 : Éléments de calcul de l'amortissement

On note que les hypothèses retenues, relatives à la durée de vie de chaque élément du système, sont données dans le tableau 13 ci-après :

##### II.2.4.1.2. Durée d'amortissements admise :

Biens amortissables	Durée	Taux
Panneaux photovoltaïque	20 ans	5 %
Batterie	20 ans	5 %
Régulateurs	12 ans	8,3 %
Onduleurs	12 ans	8,3 %
Coffrets et protections	8 ans	12,5 %
Monitoring	12 ans	8,3 %
Composants du réseau de distribution	10 ans	10 %
Matériels informatique	3 ans	33,3 %
Local technique	50 ans	2 %
Raccordements des abonnées	15 ans	6,66 %

Tableau 13 : Durée d'amortissement

Le taux d'amortissement se calcule par la formule :

$$\text{Taux} = \frac{100}{\text{Durée (N)}} \quad (2)$$

L'amortissement de chaque composant se calcule par :

$$A = C / N \quad (3)$$

Avec :

C : le coût de l'investissement initial de chaque composant.

N : Durée de vie active du composant.

#### II.2.4.1.3. Calcul de l'Annuité :

L'amortissement se calcule à partir de la date de mise en service (et non d'acquisition). La première annuité, en cas d'acquisition en cours d'exercice, se calcule proportionnellement au nombre de jours écoulés entre la mise en service et la clôture de l'exercice : on retient habituellement des mois de 30 jours.

Dans le cas de l'amortissement linéaire, l'Annuité est constante sur la durée de vie du bien :

$$An = Vo / N ; An = Vo * t \text{ où } t = 100 / N \quad (4)$$

$$\text{Annuité 1} = Vo * t * n / 360j \text{ (n : durée en jours)} \quad (5)$$

La durée totale de l'amortissement ou du retour total de l'investissement est déterminée quand la fonction d'amortissement déterminée comme étant la déférence entre d'une part, la différence entre le produit de la durée de l'échéance et le total des ventes annuelles d'électricité, et les charges de fonctionnement et d'autre part le cout total de l'investissement (CTI) soit nul. Autrement dit, lorsque l'emprunt soit totalement remboursé avec tous les intérêts qui en découlent, c'est-à-dire :

$$Am = [(n \times T_{Va}) - C_f] - CTI = 0 \quad (6)$$

Dans cette dernière expression :

CTI est le cout total de l'investissement à la date de l'échéance n.

C<sub>f</sub> : Charge de fonctionnement

T<sub>Va</sub> est le total des ventes annuelles d'électricité déterminé par l'expression ci-après :

$$T_{Va} = T_{pa} \times P_{vu} \quad (7)$$

Où T<sub>pa</sub> est la puissance annuelle produite et P<sub>vu</sub> : Prix de vente unitaire

Par ailleurs, la puissance totale du champ P<sub>c</sub> est égale au produit du nombre d'unités N par leur puissance unitaire P<sub>u</sub> :

$$P_c = N \times P_u \quad (8)$$

## **CHAPITRE 3 : REALISATION D'UN LAMPADAIRE SOLAIRE AUTONOME A INTERRUPTEUR CREPUSCULAIRE**

### **II.3.1. Définition :**

Un lampadaire autonome est un système d'éclairage alimenté par une ou plusieurs sources d'énergie renouvelable et qui ne nécessite aucune connexion au réseau de distribution d'électricité. Un lampadaire solaire est un lampadaire autonome alimenté par des panneaux photovoltaïques.

### **II.3.2. Résumé descriptif du système photovoltaïque :**

Le système comprend généralement les composants de base suivants :

- **Le panneau photovoltaïque** est composé d'un ou des modules photovoltaïques (PV) raccordés les uns aux autres et fixés sur une structure servant de support, il produit la quantité d'électricité requise ;
- **La batterie** assure le stockage de l'énergie électrique issue de la conversion de l'énergie solaire ;
- **Le régulateur de charge** protège la batterie contre la surcharge de l'énergie produite par les modules PV et inclut habituellement une protection contre les décharges profondes de la batterie.
- **Les câbles** assurent le raccordement des composants électriques du système (incluant la mise à la terre et les accessoires de fixation) ;
- **Le luminaire** est un appareil qui assure l'éclairage des lieux cibles ;
- **Le poteau ou le mât** est une longue pièce rigide plantée verticalement et servant de support de l'ensemble des composants énumérés ci- dessus.

### **II.3.3. Principe de fonctionnement d'un lampadaire solaire :**

L'énergie solaire accumulée tout le long de la journée sera utilisée en période d'obscurité par les lampadaires solaires pour l'éclairage.

En effet, les lampadaires solaires, au moyen des panneaux photovoltaïques, reçoivent les rayonnements solaires, puis les convertissent en énergie électrique qui est ensuite stockée dans des batteries. Au coucher du soleil ou en période d'obscurité, le système d'éclairage se met en marche automatiquement avec l'interrupteur crépusculaire.

Ce fonctionnement est contrôlé au moyen d'un dispositif électronique permettant de choisir le temps d'allumage du luminaire et de modifier ce temps selon l'énergie disponible dans les accumulateurs de charges.

#### II.3.4. Cas des lampadaires solaires autonomes à Ifotaka :

Il existe trois (3) lampadaires solaires à Ifotaka, offerts au Maire de la Commune par une association. Par contre, il n'y avait aucune maintenance assurée pour les garder en bon fonctionnement, durant notre descente sur le lieu de stage, on a constaté que l'un de ces derniers ne marchait pas. Par conséquent, on a donc fait un diagnostic et essayé de résoudre le problème de non fonctionnement. Heureusement le problème était minime parce qu'il y a juste le fusible qui n'était plus bien en place.



Figure 15 : Maintenance du lampadaire solaire à Ifotaka

Pour le cas d'Ifotaka, le remplacement des éclairages publics par des lampadaires solaires serait une bonne solution pour économiser de l'énergie afin de pouvoir produire plus d'électricité dans les ménages.

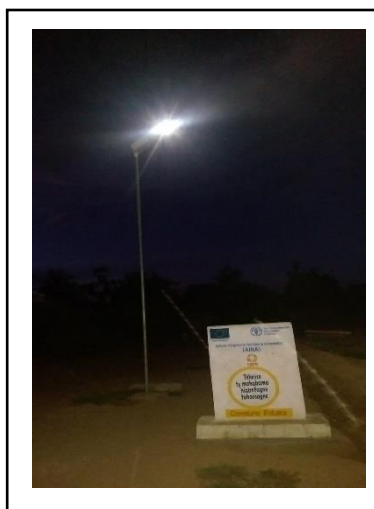


Figure 16 : Lampadaire solaire à Ifotaka

### II.3.5. Conception d'un régulateur de charge :

Le régulateur de charge a pour rôle principal d'améliorer la durée de vie de la batterie en surveillant sa tension.

Il est un des éléments indispensables dans une installation car il se trouve au cœur du système.

Les autres fonctions du régulateur sont d'assurer :

- L'égalisation (Charge de la batterie)
- Le *floating* (qui n'est actif qu'au moment où la batterie atteint sa charge maximale)

Il existe trois types de régulateur :

- Régulateur shunt ou parallèle
- Régulateur série par semi-conducteur
- Régulateur électromécanique

Le régulateur de charge utilisé dans notre réalisation sera le régulateur série par semi-conducteur, le régulateur approprié pour une petite installation, aussi du fait du choix des composantes que l'on peut trouver sur le marché.

Dans la réalisation, le montage du régulateur peut être divisé en deux (02) parties : le régulateur de charge en série par semi-conducteur et le régulateur de décharge utilisé avec la disjonction électromagnétique.

Tous deux disposent d'une intensité maximale de 15 ampères.

#### II.3.5.1. Régulateur de charge par semi-conducteur :

-Fonctionnement :

- **En absence de régulation** : la tension de la batterie est inférieure à la tension limite, le transistor Q1 est saturé et le transistor Q2 conduit. Dans ce cas, la batterie reçoit le courant délivré par le panneau solaire PV et elle se charge.
- **En régulation** : la tension batterie est supérieure à la tension limite, les deux transistors sont bloqués. Par conséquent, la tension batterie va diminuer et un équilibre va s'établir par régulation. Alors le transistor se comporte comme une résistance dont la valeur devient de plus en plus élevée lorsque la batterie se charge

-Schéma du circuit du régulateur de charge par semi-conducteur :

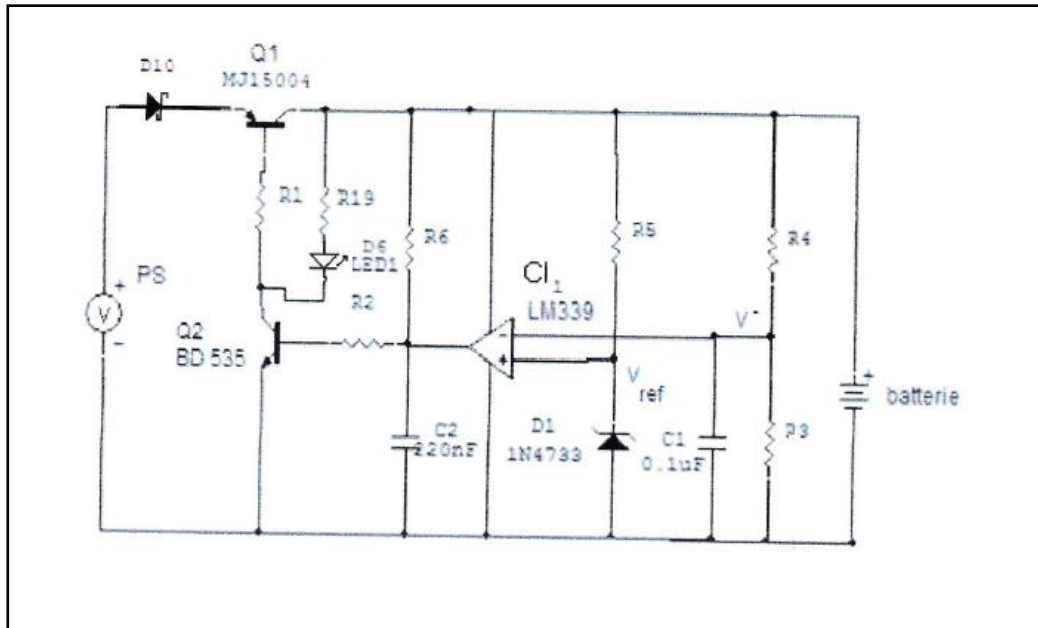


Figure 17 : Régulateur de charge par semi-conducteur

Source : Référence [1]

### II.3.5.2. Régulateur de décharge profonde avec coupure électromagnétique :

-Fonctionnement :

Cette réalisation de régulateur de décharge profonde a une particularité : la coupure de tension vers l'utilisateur sera déclenchée à la tension critique de la batterie (11,4V), mais le retour à la fermeture du relais sera retardé afin que la batterie retourne à l'état de fonctionnement normal (12,6V).

Le circuit de commande du relais est composé de comparateur inverseur à double seuil. Cette technique nous a permis de réaliser cette particularité.

Le comparateur inverseur à hystérésis :

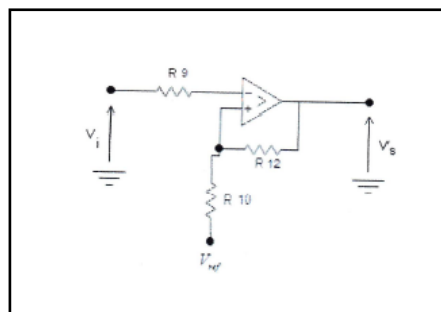


Figure 18 : Schéma comparateur



La sortie du comparateur passe par un niveau haut lorsque la tension d'entrée négative est inférieure à la tension seuil haut et reste dans cet état quand cette dernière ne dépasse pas la tension seuil bas.

En absence de régulation, la tension batterie est supérieure à la tension limite, le transistor Q3 est bloqué ; alors le relais reste à l'état initial (contact fermé).

En régulation, on suppose que la tension batterie soit inférieure à la tension limite, le transistor Q3 est saturé ; alors le relais est alimenté et coupe le courant vers l'utilisateur.

-Schéma du circuit du régulateur à décharge profonde :

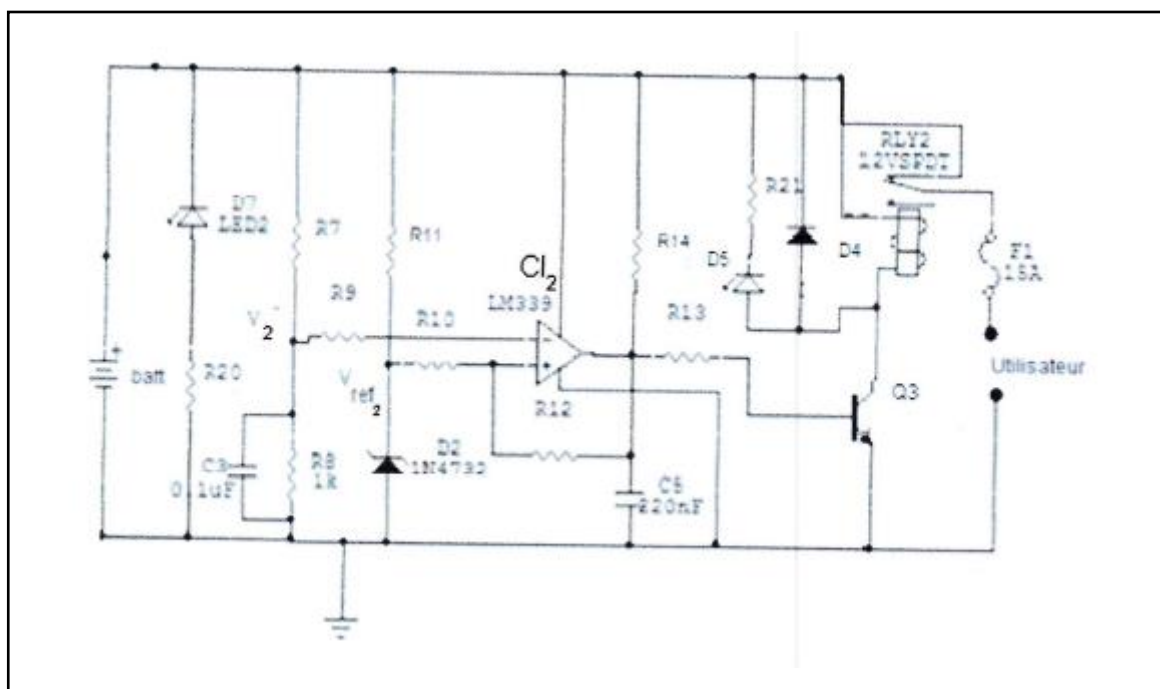


Figure 19 : Régulateur de décharge profonde

Le montage du régulateur s'est fait sur circuit imprimé, il fallait tracer sur une plaquette cuivrée avec un marqueur permanent. Puis le plonger dans une solution de perchlorure pour pouvoir enlever les parties cuivrées inutiles. Vient ensuite les perçages de la plaquette et la soudure des composants.

### **II.3.6. Conception d'un interrupteur crépusculaire :**

#### **II.3.6.1. Définition :**

Un interrupteur crépusculaire est un dispositif de commande électrique qui agit (change d'état) en fonction de la luminosité ambiante.

En schématisant à l'extrême, on peut le considérer comme un interrupteur qui se ferme quand il fait nuit et s'ouvre quand il fait jour. Le fonctionnement inverse est également possible.

L'application la plus courante est la commande d'éclairage extérieur une fois la nuit tombée comme le cas du lampadaire solaire.

#### **II.3.6.2. Photorésistance :**

Une photorésistance est un composant électronique composé d'un capteur photosensible, dont la résistance varie en fonction de l'intensité du rayonnement lumineux capté. On peut également la nommer résistance photo-dépendante (Light-Dependent Resistor (LDR)) ou cellule photoconductrice.



Figure 20 : Photorésistance      Source : Référence [2]

La photorésistance est chargée de renseigner l'interrupteur crépusculaire sur la luminosité ambiante. Techniquement la photorésistance est constituée d'un matériau semi-conducteur dont la résistance (exprimée en ohms) varie selon l'éclairement (en Lux). Plus il fait sombre et plus la résistance de la cellule est importante.

Elle peut être intégrée ou extérieure au boîtier, donc à raccorder sur ce dernier.

On va intégrer un potentiomètre servant à déterminer, donc régler, le seuil de luminosité, l'augmenter ou le diminuer comme en cas de brouillard par exemple.

### II.3.6.3. Schéma de montage :

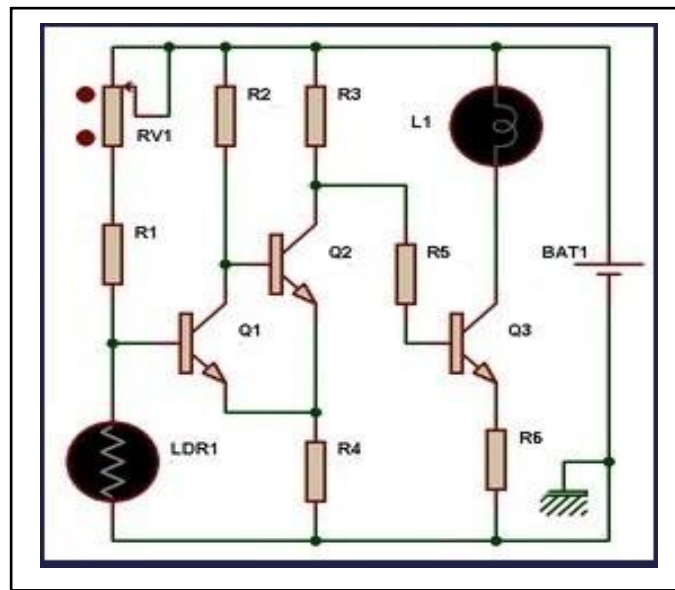


Figure 21 : Schéma de montage interrupteur crépusculaire

Source : référence [3]

## LDR le jour

La cellule photorésistante présente dans ce cas une résistivité ohmique faible, de quelques centaines d'ohms à quelques milliers d'ohms. On peut donc dire que la tension présente au point nodal R1 / LDR1 est faible, et ce quelle que soit la position du potentiomètre RV1, puisque la valeur totale R1 + RV1 est dans tous les cas d'au moins 5 KOhms. Disons que la tension en ce point peut être de quelques mV. Dans ces conditions, il circule dans la base de Q1 un courant très faible, bien trop faible pour rendre conducteur sa jonction émetteur-collecteur. Le transistor Q1 étant bloqué, Q2 voit sur sa base une tension positive ramenée par la résistance R2, et se met à conduire. Ce faisant, il bloque le transistor Q3. La lampe L1 est éteinte.

## LDR la nuit

La cellule photorésistante présente dans ce cas une résistivité ohmique très élevée supérieure à 1 Méga Ohms. Cette fois, la tension présente au point nodal R1 / LDR1 est suffisamment élevée pour provoquer un courant de base dans Q1, courant suffisant pour provoquer sa saturation. Q1 étant saturé, le transistor Q2 ne reçoit plus sur sa base une tension suffisante, puisque cette jonction de base se retrouve plus reliée à la masse que vers le pôle positif de l'alimentation (la valeur de R4 est bien plus faible que celle de R2) : Q2 se bloque. Q2 étant bloqué, la base de Q3 reçoit une tension suffisante, au travers des résistances R3 et R5, pour le rendre conducteur. La résistance R6 sert de stabilisateur pour le transistor Q3. La lampe L1 s'allume

## **PARTIE III : RESULTATS DES TRAVAUX**

## CHAPITRE 1 : RESULTATS DU STAGE

### III.1.1. Résultats des calculs : (Les résultats sont interprétés en Euro (€) pour simplifier les chiffres)

Le tableau 14 ci-dessous représente le cout total de l'investissement, les recettes et les dépenses chaque année ainsi que la production annuelle d'électricité.

Puissance totale du champ ( $P_c$ )	kWc	10
Cout total de l'investissement (CTI)	€	175 000
Tarif d'achat de l'électricité issue du réseau ( $P_{vu}$ )	€	0,27
Charge de fonctionnement par an Cf (+10% tous les 2 ans)	€	2544,22
Total des ventes annuelles d'électricité (Tva)	€	2833,7
Energie annuelle produite ( $T_{pa}$ )	MWh	10,585
Coûts liés au renouvellement	€	118 060
Impôts et taxes par an	€	110,63

Tableau 14 : Résultats des calculs

Taux de change : 1 € = 3 500 Ar

### III.1.2. Résultats de l'amortissement :

L'amortissement a été calculé sur une période de vingt (20) ans, équivalent à la durée de vie des panneaux solaires.

Exercices	Charge de fonctionnement (+10% / 2 ans)	Recette	Cumul des Annuités
N	530,04 €	60,31 €	6927 €
N+1	3074,26 €	349,79 €	15677 €
N+2	5618,48 €	639,27 €	24427 €
N+3	8677,12 €	414,33 €	33177 €
N+4	11475,76 €	449,39 €	41927 €
N+5	14528,82 €	230,03 €	50677 €
N+6	17581,88 €	10,67 €	59427 €
N+7	21149,36 €	-723,11 €	68177 €
N+8	35756,84 €	-12496,89 €	76927 €
N+9	39318,74 €	-13225,09 €	85677 €
N+10	92880,64 €	-12496,89 €	94427 €
N+11	96956,96 €	-65195,91 €	103177 €
N+12	113773,28 €	-79178,53 €	111927 €
N+13	117844,02 €	-80415,57 €	120677 €
N+14	121914,76 €	-81652,61 €	129427 €
N+15	146999,92 €	-103904,07 €	138177 €
N+16	162625,08 €	-116695,53 €	146927 €
N+17	167204,66 €	-118441,66 €	155677 €
N+18	171784,24 €	-120187,29 €	164427 €
N+19	176618,24 €	-122187,59 €	173177 €
N+20	181452,24 €	-124187,89 €	175000 €

Tableau 15 : Résultats de l'amortissement pour 0,27€ le kWh

Taux de change : 1 € = 3 500 Ar

### Courbe représentative :

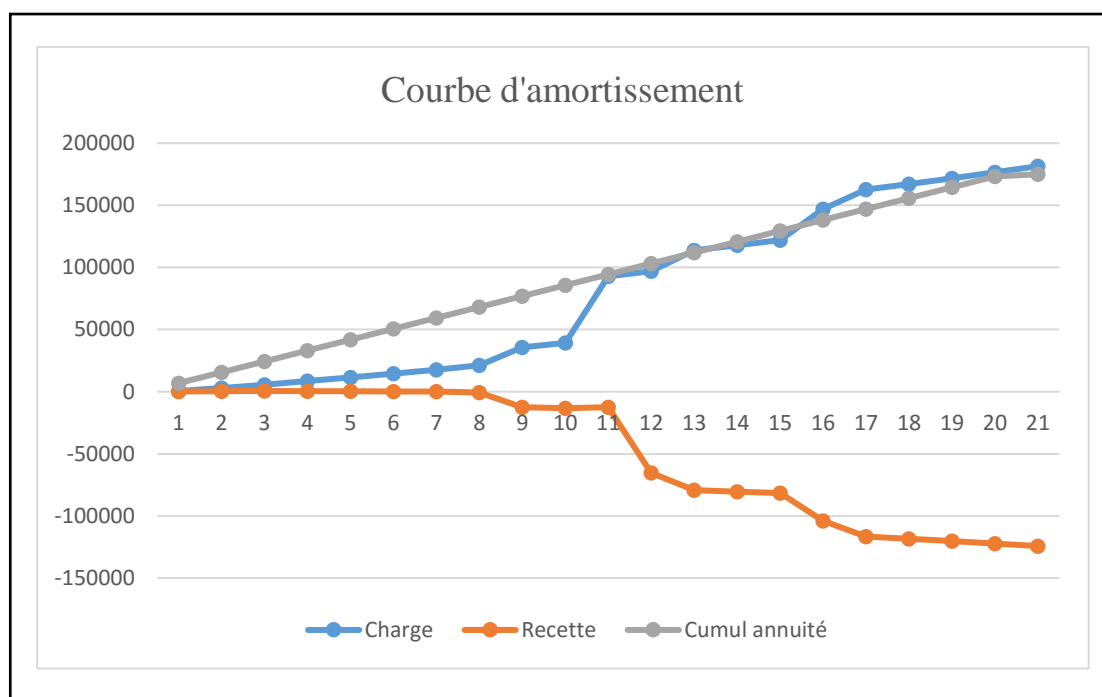


Figure 22 : Courbe d'amortissement sur un prix de revient unitaire de 0,27€

On constate que sur une période de vingt (20) ans, il y a une baisse considérable de la recette c'est-à-dire qu'il y a plus de dépenses que de revenus. Ce qui veut dire que l'installation ne serait jamais amortie pour un prix de revient unitaire du kWh égal à 0,27€ (950Ar).

Du fait que l'installation ne soit pas rentable, on peut donc considérer que celle-ci est juste un don offert pour subvenir aux besoins des villageois.

### III.1.3. Solution proposée :

#### III.1.3.1. Augmentation du prix du kWh :

On a vu que pour un prix de revient unitaire de 0,27€ soit 950 Ariary, l'installation ne sera jamais rentable.

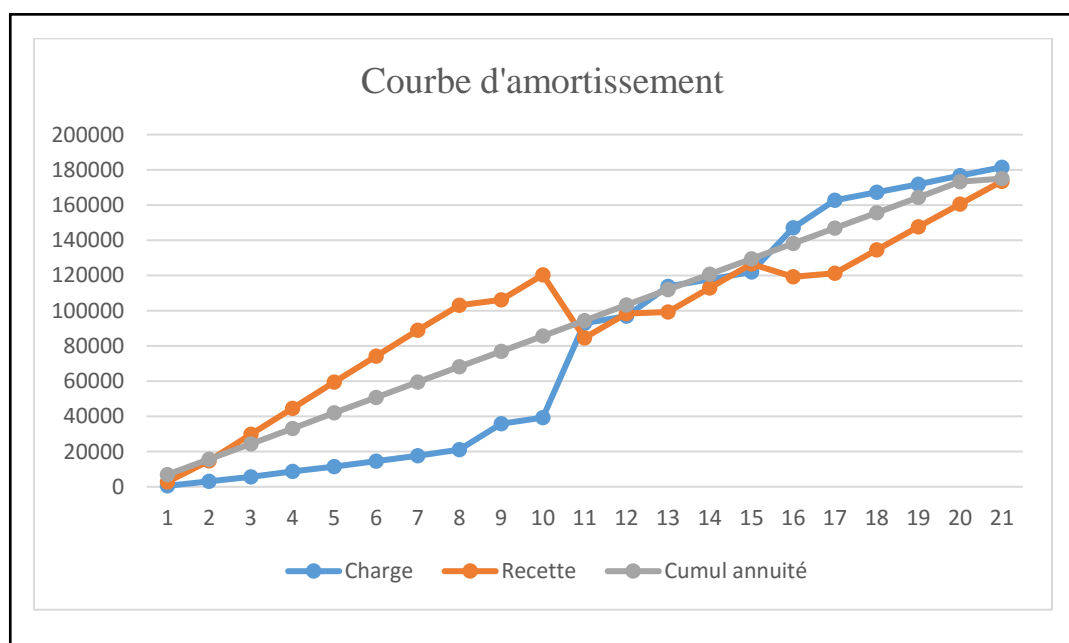
De ce fait, on a donc augmenté peu à peu ce prix de revient unitaire du kWh jusqu'à trouver le prix exact pour que la centrale soit rentable. Donc après les calculs, ce prix serait de 1,67€, soit 5870 Ariary, le délai d'amortissement serait égal à 20 ans, comme l'indique la courbe ci-dessous, ce qui implique la rentabilité du projet à long terme.

Exercices	Charge de fonctionnement (+10%/2 ans)	Recette	Cumul des Annuités
N	530,04 €	2772,96 €	6927 €
N+1	3074,26 €	14673,74 €	15677 €
N+2	5618,48 €	29877,52 €	24427 €
N+3	8677,12 €	44566,88 €	33177 €
N+4	11475,76 €	59516,24 €	41927 €
N+5	14528,82 €	74211,18 €	50677 €
N+6	17581,88 €	88906,12 €	59427 €
N+7	21149,36 €	103086,64 €	68177 €
N+8	35756,84 €	106227,16 €	76927 €
N+9	39318,74 €	120413,26 €	85677 €
N+10	92880,64 €	84599,36 €	94427 €
N+11	96956,96 €	98271,04 €	103177 €
N+12	113773,28 €	99202,72 €	111927 €
N+13	117844,02 €	112879,98 €	120677 €
N+14	121914,76 €	126557,24 €	129427 €
N+15	146999,92 €	119220,08 €	138177 €
N+16	162625,08 €	121342,92 €	146927 €
N+17	167204,66 €	134511,34 €	155677 €
N+18	171784,24 €	147679,76 €	164427 €
N+19	176618,24 €	160593,76 €	173177 €
N+20	181452,24 €	173507,76 €	175000 €

Tableau 16 : Résultats de l'amortissement pour 1,67 € le kWh

Taux de change : 1 € = 3 500 Ar

### Courbe représentative :



### III.1.3.2. La centrale utilisée comme point de recharge :

-Compte tenu du prix du kWh qui est très élevé pour être rentable dans la première solution, envisager d'utiliser la centrale comme point de recharge est une solution idéale. Cela permet de réduire le cout d'investissement mais aussi de subvenir aux besoins de plus de ménages par rapport au raccordée au réseau.

-Il est aussi important d'envisager de remplacer les 9 éclairages publics par des lampadaires solaires autonomes. D'après quelques enquêtes effectuées auprès de différentes sociétés, un lampadaire solaire coûterait dans les environs de **785.000 Ar**. Le choix d'un lampadaire solaire peut être très judicieux et surtout durable grâce à ses avantages intéressants contrairement de celles qui sont liées au réseau électrique et qui sont difficiles à installer et qui nécessitent la maintenance à chaque fois.

-Chaque ménage n'aura juste qu'à se munir de batteries et de convertisseur pour alimenter ses appareils domestiques, de lampes rechargeables pour l'éclairage.

Le budget d'investissement sera limité de la façon suivante :

Désignation	Montant en euros	Coût estimé en en Ariary
Ensemble champ PV et structure au sol	13 500	47 250 000
Régulateur	4800	16 800 000
Parc batteries	25 000	87 500 000
Lampadaires solaires autonomes	2018	7.065.000
Installation et génie civil	6 500	22 750 000
Local technique	19 000	66 500 000
<b>Total Centrale PV de Production</b>	<b>70 818</b>	<b>247 865 000</b>

Tableau 17 : Budget d'investissement pour un point de recharge      Taux de change : 1 € = 3 500 Ar

Si, pour un ménage, l'abonnement pour la recharge des batteries et lampes rechargeables se fixe à 19.000 Ariary /mois, soit 650 Ariary/jour (à peu près la moyenne des factures des villageois) alors le revenu annuel pour 121 abonnés sera de 27.588.000 Ariary (7882,3€). Ce qui équivaut à un prix du kWh à 2600Ar (0,75€).

Voyons maintenant l'amortissement de ce prix du kWh sur une durée de vingt (20) ans avec le budget d'investissement pour un point de recharge.



Exercices	Charge de fonctionnement (+10% / 2 ans)	Recette	Cumul des Annuités
N	530,04 €	1101,21 €	2803,2 €
N+1	3074,26 €	6495,74 €	6344,1 €
N+2	5618,48 €	11890,27 €	9885 €
N+3	8417,12 €	17030,38 €	13425,9 €
N+4	11215,76 €	22170,49 €	16966,8 €
N+5	14268,82 €	27056,18 €	20507,7 €
N+6	17321,88 €	31941,87 €	24048,6 €
N+7	20629,36 €	36573,14 €	27589,5 €
N+8	23936,84 €	41204,41 €	31130,4 €
N+9	27498,74 €	45581,26 €	34671,3 €
N+10	31060,64 €	49958,11 €	38212,2 €
N+11	34876,96 €	54080,54 €	41753,1 €
N+12	43493,28 €	53402,97 €	45294 €
N+13	47564,02 €	57270,98 €	48834,9 €
N+14	51634,76 €	61138,99 €	52375,8 €
N+15	55959,92 €	64752,58 €	55916,7 €
N+16	60285,08 €	68366,17 €	59457,6 €
N+17	64874,66 €	71715,34 €	62998,5 €
N+18	69444,24 €	75084,51 €	66539,4 €
N+19	74278,24 €	78189,26 €	70080,3 €
N+20	79112,24 €	81294,01 €	70818 €

Tableau 18 : Résultats de l'amortissement pour 0,75 € le kWh Taux de change : 1 € = 3 500 Ar

**Courbe représentative :**

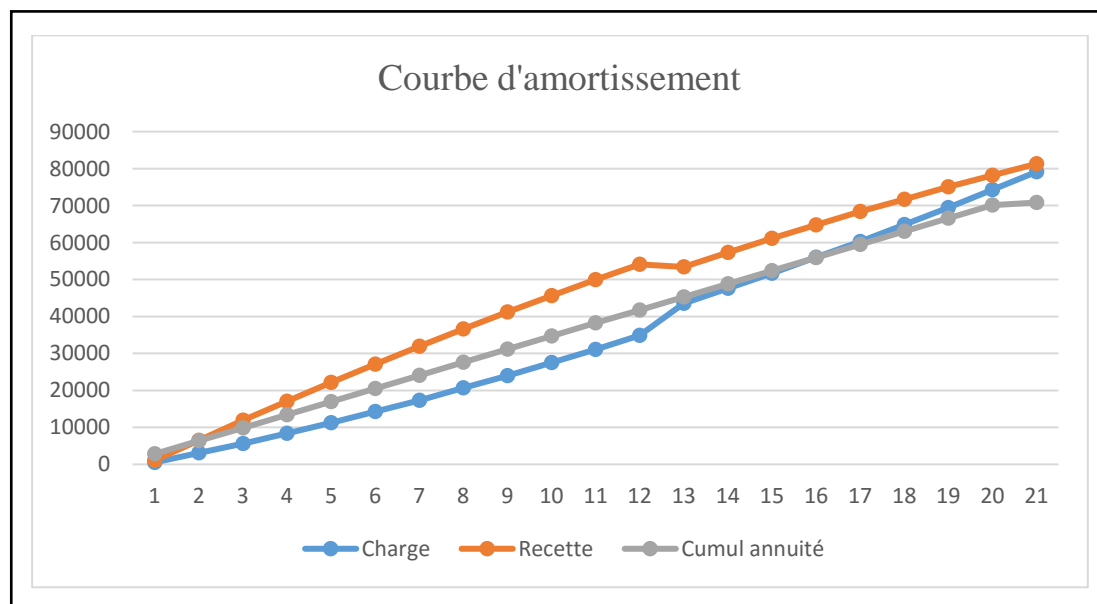


Figure 24 : Courbe d'amortissement sur un prix de revient unitaire de 0,75€

Si on veut donc que l'installation soit rentable, il est envisageable de l'utiliser comme point de recharge, le délai d'amortissement sera égal à vingt (20) ans avec le minimum d'investissement.

## CHAPITRE 2 : LES RESULTATS DU PROJET

### III.2.1. Montage du lampadaire :

Pour cette petite installation, on a choisi un panneau photovoltaïque de 10Wc avec une batterie de 12V 7A. Puis vient ensuite la construction d'une boîte en contre-plaqué. Le panneau est fixé au-dessus et est incliné sur un angle de 30° (angle d'inclinaison favorable dans le Sud de Madagascar), la batterie sera fixée à l'intérieure. Au-dessous est fixée une ampoule de 5W 12V qui sera branchée avec le circuit de l'interrupteur crépusculaire.



Figure 25 : Montage du panneau

#### III.2.1.1. L'interrupteur crépusculaire :

La photorésistance est placée à l'extérieur, au-dessus du panneau pour bien capter la lumière. Le circuit qui est relié en même temps à la photorésistance, au régulateur et à l'ampoule qui est fixé dans la boîte.

Liste des composantes :

R1 : 5K6	R4 : 100	Q1 : BC 108	LDR05
R2 : 4K7	R5 : 12K	Q2 : BC 108	L1 : 12V
R3 : 10K	R6 : 0,5	Q3 : TIP 122	RV1 : 470K

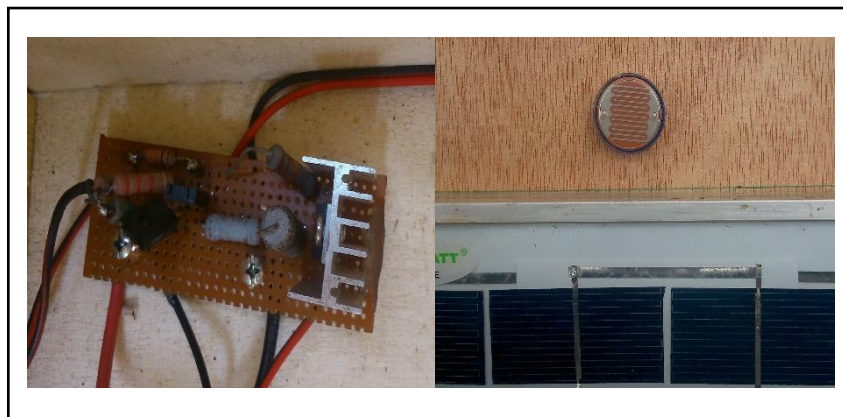


Figure 26 : Montage de l'interrupteur crépusculaire

### III.2.1.2. Le régulateur de charge :

-Les composantes du régulateur de charge par semi-conducteur

Transistor	Comparateur	Diode Zener	Résistances
$Q_1$ : MJ 15004 de type PNP (200W)  $Q_2$ : BD 535 de type NPN (50W)	$CI_1$ : LM 339N	$D_1$ : 1N4733 (1W)	$R_1$ : 1 $\Omega$  $R_2$ : 65 $\Omega$  $R_3$ : 1,5k $\Omega$  $R_4$ : 2,7k $\Omega$

Tableau 19 : Liste des composantes du régulateur de charge par semi-conducteur

- Les composantes du régulateur de décharge profonde

Transistor	Comparateur	Diode Zener	Résistances	Relais
$Q_3$ : BD 235 (30W)	$CI_2$ : LM 339	$D_2$ : 1N4732 (1W)	$R_7$ : 1,5k $\Omega$ $R_8$ : 1k $\Omega$ $R_9$ : 1k $\Omega$ $R_{10}$ : 1k $\Omega$ $R_{11}$ : 1k $\Omega$ $R_{12}$ : 22k $\Omega$ $R_{13}$ : 100 $\Omega$	$U_{ref}$ : 12VDC  $R_{ref}$ : 145 $\Omega$

Tableau 20 : Liste des composantes du régulateur de décharge profonde



Figure 27 : Montage du régulateur

### III.2.2. Prototype du lampadaire solaire :

Tous les composants ont été fixés dans la boîte. Le panneau solaire est directement relié au régulateur qui est relié à son tour à la batterie. L'interrupteur crépusculaire est également connecté au régulateur afin de pouvoir allumer ou éteindre l'ampoule à l'aide de la cellule photorésistante qui, elle, se trouve à l'extérieure de la boîte, au-dessus du panneau solaire.

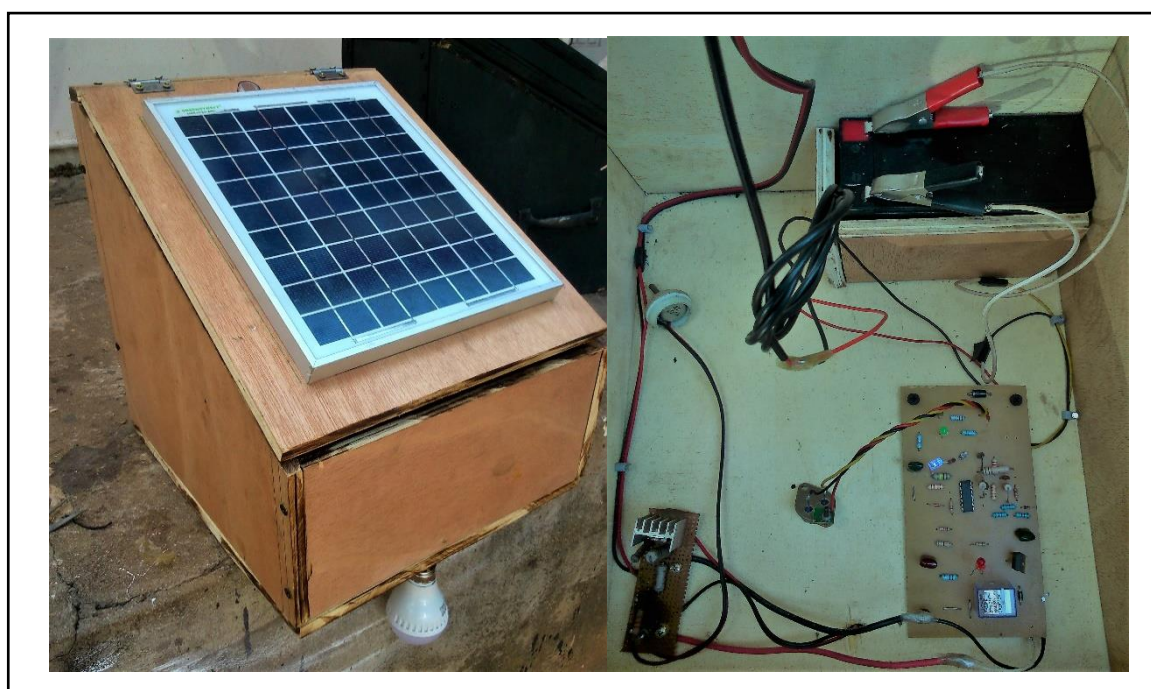


Figure 28 : Prototype du lampadaire solaire

### III.2.3. Cout du projet :

Désignation	Prix (Ar)
Panneau solaire	45.000
Contre-plaqué	30.000
Batterie	20000
Photorésistance	5000
Ampoule	6000
Ensemble régulateur- interrupteur	55.000
<b>Total</b>	<b>161.000</b>

Tableau 21 : Cout du projet

## Conclusions

Madagascar est un pays contrasté, constitué d'étendues très peu habitées et de territoires densément peuplés. La densité nationale, estimée à 34,5 hab/km<sup>2</sup> en 2011, ne reflète pas l'occupation spatiale du pays. Les distances entre les poches de population, et notamment les grandes agglomérations, plaident en faveur de solutions décentralisées pour alimenter les zones rurales en électricité.

Par ailleurs, le potentiel solaire est globalement élevé sur l'ensemble de l'île avec 2800 heures d'ensoleillement annuel. Les régions sud de Madagascar bénéficient d'une irradiation journalière moyenne de plus de 4000 Wh/m<sup>2</sup>, ce qui place Madagascar parmi les pays riches en gisement solaire (de l'ordre de 2000kWh/m<sup>2</sup>.an).

La centrale solaire basée dans la Commune Rurale d'Ifotaka dans le sud de Madagascar bénéficie pleinement de cet ensoleillement. Ce qui a permis d'améliorer les conditions de vie de la population locale. Des impacts sociaux comme sur l'éducation avec de meilleures conditions de travail, sur la sécurité avec l'éclairage public, le vol de bétail, particulièrement fréquent à Madagascar, est fortement réduit par la présence de la lumière électrique. Des impacts économiques comme l'allègement et l'amélioration des travaux domestiques grâce à l'éclairage la nuit ainsi que des développements de nouvelles activités y afférentes. Mais il y a aussi les impacts environnementaux comme la réduction de la pollution. En effet, dans des écosystèmes fragiles, le recours à des sources locales d'énergies renouvelables comme solutions alternatives aux énergies fossiles permet de réduire les pollutions dues aux piles ainsi qu'aux transports et à l'utilisation de pétrole lampant. L'émission de 65 000 tonnes de CO<sub>2</sub> est évitée durant les 20 premières années de fonctionnement des systèmes électriques.

Mais l'étude technico-économique menée a révélé que l'installation n'était pas du tout rentable à cause du prix des équipements très élevé pour un prix de revient unitaire du kWh à 950 Ar. Des solutions sont alors proposées, telles que l'augmentation du prix du kWh et l'utilisation d'une centrale solaire de recharge.

En perspective pour la réalisation du lampadaire solaire autonome, son utilisation à l'échelle réelle est indispensable pour l'économie d'énergie. Notre prototype n'est pas cher, mais il est efficace et durable.

Cependant cette réalisation fut à l'encontre de certaines complications. Celles-ci remontaient surtout au niveau de la cellule photorésistance qui fut difficilement trouvable sur le marché. Toutefois à l'issue des résolutions, le dispositif d'éclairage réalisé se trouve dans la capacité de servir de matériel pratique dans les lieux publics ou privés.



## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Magazine : ENERGIE DURABLE POUR TOUS-ADER-2014 (15/05/17)
- [2] Magazine : Electrification rurale a Madagascar-CEAS-VSElectrosuisse-2013 (15/05/17)
- [5] Magazine : ELECTRONIQUE PRATIQUE- Avril/Mai 2008 (10/07/17)
- [10] Projet BOREALE : Centrale solaire et mini réseau de Ifotaka-Novembre 2015 (23/03/17)

## WEBOGRAPHIES

- [3] <http://www.branche-technologie.com/electronique/regulateur-de-tension-12v.html> (03/07/17)
- [4] [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Light-dependent\\_resistor\\_schematic.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Light-dependent_resistor_schematic.svg) (10/07/17)
- [6] [http://electronique.aop.free.fr/AOP\\_sature/1\\_comparateur\\_simple.html](http://electronique.aop.free.fr/AOP_sature/1_comparateur_simple.html) (03/07/17)
- [7] [https://www.sonelec-musique.com/electronique\\_bases\\_transistor.html](https://www.sonelec-musique.com/electronique_bases_transistor.html) (03/07/17)
- [8] [http://www.electronique-3d.fr/Interrupteur\\_crepusculaire.html](http://www.electronique-3d.fr/Interrupteur_crepusculaire.html) (10/07/17)
- [9] <http://www.madagascar-public-report.html> (30/04/17)

# ANNEXES

## ANNEXE 1- PRODUCTION D'ELECTRICITE JOURNALIERE (Matin et soir) (FEVRIER 2017)

DATE	EJ		UBATT		SOC		CONSOMMATION (Kwh/j)
	05H 00mn	17H 30mn	05H 00mn	17H 30mn	05H 00mn	17H 30mn	
01/02/2017	0	31,2	49,69	50	81,00%	97,80%	27,6
02/02/2017	0	31,9	49,84	50	81,00%	97,80%	24,5
03/02/2017	0	31,2	49,72	49,81	82,40%	97,80%	24,9
04/02/2017	0,04	33,5	49,81	49,88	81,40%	96,10%	30,2
05/02/2017	3,26	40,9	49,84	52,29	82,80%	95,90%	25,9
06/02/2017	0	28	50,03	52,44	84,70%	96,50%	22,7
07/02/2017	0,39	29,1	49,91	50,16	85,90%	95,90%	21,7
08/02/2017	0	28,3	49,88	50	82,40%	96,20%	24
09/02/2017	0	31,5	49,72	49,95	84,10%	97,80%	27,3
10/02/2017	0	31,2	49,69	50,03	83,60%	96,80%	26,2
11/02/2017	0	33,4	49,75	49,97	82,90%	98,60%	25,4
12/02/2017	0	30,6	49,78	50,09	83,30%	97,80%	26
13/02/2017	0	31,6	49,75	50	85,00%	98,00%	28,1
14/02/2017	0	34,9	49,62	50	84,10%	96,50%	26,1
15/02/2017	0	30,9	49,81	50,09	80,90%	97,40%	24,4
16/02/2017	0	31,3	49,81	49,91	83,60%	97,20%	27,6
17/02/2017	0	31,8	49,66	50	83,90%	95,20%	19,9
18/02/2017	0	31,1	49,75	49,94	81,60%	97,90%	29,3
19/02/2017	0	31,9	49,69	50,06	84,00%	97,60%	25,9
20/02/2017	0	30,3	49,79	50,03	83,20%	98,60%	22,1
21/02/2017	0	27	49,79	50,16	85,10%	98,60%	24,2
22/02/2017	0	27,3	49,81	50,06	87,90%	98,80%	20,8
23/02/2017	0	27,2	49,91	50,09	86,20%	98,40%	18,1
24/02/2017	0	23	50,06	50,31	86,40%	98,10%	18,3
25/02/2017	0	25,7	50,03	50,12	89,10%	99,10%	23
26/02/2017	0	26,2	49,94	50,03	88,50%	98,60%	22,8
27/02/2017	0	22,5	49,91	50,22	87,70%	96,90%	21,7
28/02/2017	0	31	49,84	50,38	87,20%	97,10%	20,1

Tableau 22 : Production d'électricité journalière (Février 2017)

**(MARS 2017)**

DATE	EJ		UBATT		SOC		CONSOMMATION (Kwh/j)
	05H 00mn	17H 30mn	05H 00mn	17H 30mn	05H 00mn	17H 30mn	
01/03/2017	0	26,9	50,03	50,12	86,30%	99,90%	23,5
02/03/2017	0	32,1	49,94	50,09	90,20%	99,30%	22,3
03/03/2017	0	27,5	49,97	50	87,40%	98,20%	25,2
04/03/2017	0	31,1	49,88	50,06	87,20%	97,20%	25
05/03/2017	0	42,8	49,84	49,97	85,50%	98,10%	22,6
06/03/2017	0	29,1	49,81	49,81	86,80%	98,90%	24,4
07/03/2017	0	30,7	49,91	49,94	86,20%	96,40%	24,7
08/03/2017	0	31,3	49,84	50	84,40%	98,10%	29,8
09/03/2017	0	22,3	49,72	50,56	84,80%	96,20%	17,7
10/03/2017	0	38,8	49,88	50,03	81,10%	86,30%	16,2
11/03/2017	0	31	49,88	50,12	70,60%	98,90%	21,7
12/03/2017	0	25,2	49,91	50,03	86,20%	98,70%	20,4
13/03/2017	0	22,9	49,88	49,94	86,90%	96,10%	19
14/03/2017	0	21,9	49,88	50,12	85,60%	95,40%	21,8
15/03/2017	0	31	49,69	50,9	82,90%	95,80%	22,1
16/03/2017	0	31	49,75	49,97	81,20%	98,10%	26
17/03/2017	0	31	49,72	50,03	82,50%	96,30%	24,4
18/03/2017	0	32,4	49,69	49,88	82,60%	96,50%	26,3
19/03/2017	0	30,1	49,72	49,88	81,00%	95,50%	23,8
20/03/2017	0	31,1	49,72	49,72	82,10%	96,60%	25,5
21/03/2017	0	29,9	49,62	49,81	82,20%	94,60%	7,3
22/03/2017	0	27,3	49,72	49,78	89,50%	96,30%	28,7
23/03/2017	0	30,2	49,56	49,69	82,20%	98,90%	22,4
24/03/2017	0	25	49,69	49,78	78,10%	94,10%	15,9
25/03/2017	0	22,3	49,75	49,72	79,20%	94,10%	21,5
26/03/2017	0	26,1	49,59	49,84	81,90%	91,60%	19,8

Tableau 23 : Production d'électricité journalière (Mars2017)



## ANNEXE 2- EXEMPLE DE TABLEAU D'AMORTISSEMENT

Désignation : Panneaux photovoltaïques				
Valeur d'entrée brute :	9600 €	Amortissement :		
Valeur résiduelle :		Durée :	20 ans	
Base amortissable :	9600 €	Taux linéaire :	5 %	
Date d'acquisition :	30/08/2015	Prorata :	285 Jours	
Date de mise en service :	15/03/2016			
Début d'amortissement :	15/03/2016			
Exercices	Base Amortissable	Annuités	Cumul des annuités	Valeur Comptable Nette
N	9600 €	380 €	380 €	9220 €
N+1	9600 €	480 €	860 €	8740 €
N+2	9600 €	480 €	1340 €	8260 €
N+3	9600 €	480 €	1820 €	7780 €
N+4	9600 €	480 €	2300 €	7300 €
N+5	9600 €	480 €	2780 €	6820 €
N+6	9600 €	480 €	3260 €	6340 €
N+7	9600 €	480 €	3740 €	5860 €
N+8	9600 €	480 €	4220 €	5380 €
N+9	9600 €	480 €	4700 €	4900 €
N+10	9600 €	480 €	5180 €	4420 €
N+11	9600 €	480 €	5660 €	3940 €
N+12	9600 €	480 €	6140 €	3460 €
N+13	9600 €	480 €	6620 €	2980 €
N+14	9600 €	480 €	7100 €	2500 €
N+15	9600 €	480 €	7580 €	2020 €
N+16	9600 €	480 €	8060 €	1540 €
N+17	9600 €	480 €	8540 €	1060 €
N+18	9600 €	480 €	9020 €	580 €
N+19	9600 €	480 €	9500 €	100 €
N+20	9600 €	100 €	9600 €	
<b>Contrôles</b>		<b>9600 €</b>		

Tableau 24 : Exemple de tableau d'amortissement

## ANNEXE 3-COMPARATEUR

### Principe du comparateur :

Le comparateur est un dispositif permettant de comparer une tension par rapport à une référence donnée.

La tension de référence  $V_{ref}$  est en rapport avec la masse. Quand la tension d'entrée est supérieure de quelques milli Volt, le circuit se met en fonction et nous trouverons en sortie un niveau haut, la tension d'alimentation positive.

Si la tension d'entrée est inférieure de quelque milli Volt, le circuit se met en fonction et nous trouverons en sortie un niveau bas, la tension d'alimentation négative.

Il existe deux types de comparateurs :

- Comparateur inverseur
- Comparateur non inverseur

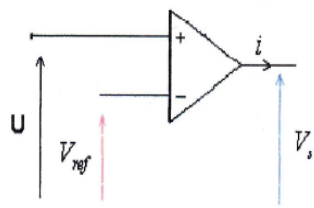
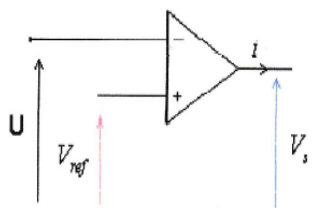
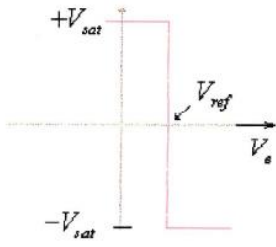
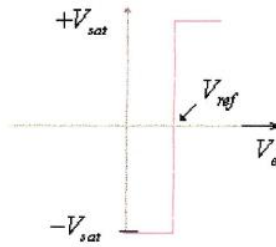
	Comparateur inverseur	Comparateur non inverseur
Schéma		
Caractéristique de transfert		

Tableau 25 : Différents comparateurs

Source : Référence [4]

## ANNEXE 4- TRANSISTOR

### Description du transistor bipolaire :

Un transistor bipolaire est un semi-conducteur comportant deux jonctions PN. Suivant l'orientation de ces jonctions, on obtient deux types de transistors : les transistors NPN et PNP.

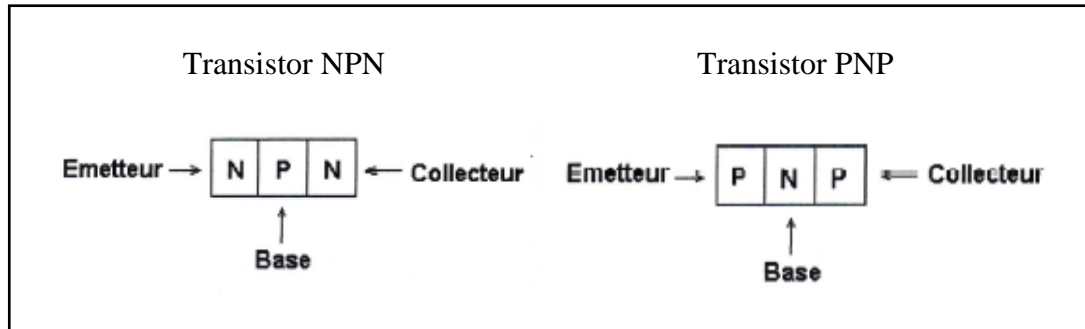


Figure 29 : Transistor bipolaire

La représentation conventionnelle :

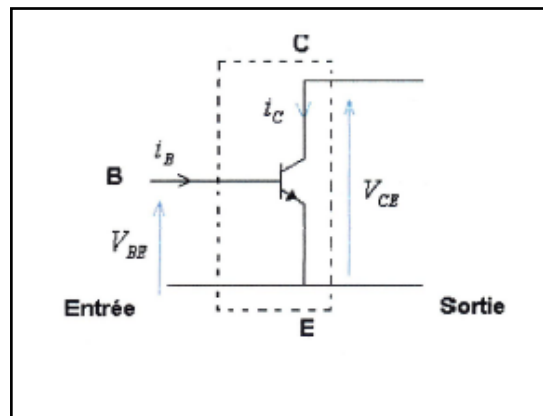


Figure 30 : Quadripôle à transistor NPN

Source : Référence [5]

Le transistor peut se mettre en deux états différents :

- Etat bloqué
- Etat saturé

On dit qu'il est bloqué quand le courant de base est nul. Dans cet état, le transistor est considéré comme un interrupteur ouvert entre le collecteur et l'émetteur. Il est dit saturé quand il prend la forme d'un interrupteur fermé.

## ANNEXE 5- DIVISEUR DE TENSION

### Les diviseurs de tension résistif :

Un diviseur de tension est un système qui permet de fournir une tension de sortie donnée (par exemple 5V) à partir d'une tension d'entrée donnée (par exemple 7V). La valeur de la tension de sortie est toujours plus faible que celle de la tension d'entrée, ça ne peut pas être autrement avec ce type de système. On parle de diviseur de tension parce que la tension de sortie est une fraction de la tension d'entrée, il existe un rapport simple entre les deux valeurs. Le présent article se réfère aux diviseurs de tension de type résistif. Ce type de diviseur de tension est largement utilisé :

- pour permettre à un voltmètre de disposer de plusieurs calibres (0.2V, 2V, 20V, 200V, 2000V, par exemple);
- pour la création d'une masse virtuelle dans un montage analogique audio;
- pour la définition de plusieurs seuils dans un circuit d'affichage ou de mesure, tel qu'un thermomètre ou un vumètre à LED, par exemple.

### Diviseur de tension simple :

Deux résistances suffisent pour constituer un diviseur de tension. La valeur à donner à ces résistances n'est pas forcément simple à déterminer, mais nous verrons cela le moment venu. Commençons donc par le principe de base, en analysant le schéma simple suivant, qui montre la mise en œuvre d'un diviseur de tension constitué de deux résistances R1 et R2, et où la tension de sortie Vs répond à la formule suivante :

$$V_s = V_e * (R_2 / (R_1 + R_2)) \quad (9)$$

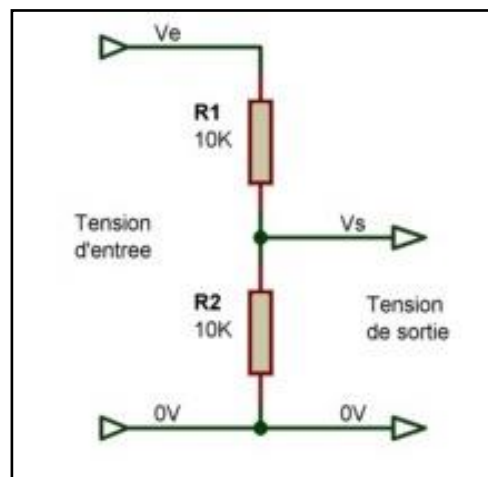


Figure 31 : Exemple de pont diviseur

Source : Référence [6]

Les deux résistances R1 et R2 sont reliées en série, et on applique sur celles-ci, une tension d'entrée  $V_e$ ,  $V_e$  étant la tension dont on dispose et avec laquelle on veut obtenir une autre tension. Si les résistances ont la même valeur ohmique, ce qui est le cas sur ce schéma, elles vont s'approprier chacune la même portion de tension. Puis on récupère la tension disponible sur la résistance R2, qui est connectée à la référence 0V. On obtient sur cette résistance une tension de sortie  $V_s$ , qui est la tension que l'on désire obtenir à partir de la tension d'entrée  $V_e$ . Comme les deux résistances ont ici la même valeur, on récupère en sortie, une tension  $V_s$  égale à la moitié de la tension d'entrée  $V_e$ .

-Calcul des résistances pour un diviseur de tension simple :

Nous connaissons la tension à diviser (c'est  $V_e$ ) et nous connaissons la tension à obtenir (c'est  $V_s$ ). La formule permettant de connaître la tension de sortie en fonction de la valeur des résistances, est pour rappel, la suivante :

$$V_s = V_e * (R_2 / (R_1 + R_2)) \quad (10)$$

Il suffit de retourner cette formule pour non plus calculer la tension de sortie, mais pour calculer la valeur des résistances :

$$R_2 = V_s * (R_1 + R_2) / V_e \quad (11)$$

$$R_1 = (R_1 + R_2) - R_2 \quad (12)$$

**TITRE : « DIAGNOSTIC ET ANALYSES TECHNICO-ECONOMIQUE DE LA CENTRALE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE D'IFOTAKA – CONCEPTION ET REALISATION D'UN LAMPADAIRE SOLAIRE AUTONOME A INTERRUPTEUR CREPUSCULAIRE »**

**RESUME :**

Le potentiel d'énergie solaire est globalement important à Madagascar, surtout dans les régions du Sud de l'Ile. La centrale solaire photovoltaïque qui a été mise en place par le programme Boréale dans la Commune Rurale isolée d'Ifotaka du Sud, District d'Amboasary, Région de l'Anosy, bénéficie pleinement de cet ensoleillement. La recherche menée consiste à analyser et à étudier la rentabilité économique et la retombée sociale de l'installation de cette centrale solaire.

L'interrupteur crépusculaire du lampadaire solaire autonome conçu permet de lui mettre en marche automatiquement en cas d'obscurité ou de coucher de soleil. Ce fonctionnement est contrôlé au moyen d'un dispositif électronique permettant de choisir le temps d'allumage du luminaire et de modifier ce temps selon l'énergie disponible dans les accumulateurs de charges.

De ce fait, le lampadaire solaire autonome pourrait servir dans des projets ou programmes d'électrification solaire pour l'éclairage public ou privé afin d'économiser plus d'énergie et de réduire le coût d'investissement.

**Mots-clés :** Centrale, solaire, isolée, rentabilité, lampadaire, autonome, photovoltaïque.

**ABSTRACT:**

*The solar energy potential is globally important in Madagascar, especially in the southern regions of the island. The solar photovoltaic power plant, which was set up by the Boréale program in the isolated rural town of Ifotaka in the South, Amboasary District, Anosy Region, fully benefits from this sunshine. The research consists in analyzing and studying the economic profitability and the social impact of the installation of this solar power plant.*

*The twilight switch of the autonomous solar street lamp designed to turn it on automatically in the event of darkness or sunset. This operation is controlled by an electronic device making it possible to choose the lighting time of the luminaire and to modify this time according to the energy available in the charge accumulators.*

*As a result, the stand-alone solar street lamp could be used in solar power projects or programs for public or private lighting in order to save more energy and reduce the investment cost*

**Keywords:** power plant, solar, isolated, profitability, street lamp, stand-alone, photovoltaic.

Encadreur Pédagogique :

Madame RAZANAMANAMPISOA Harimalala  
Maître de Conférences

Impétrant :

RAKOTOMALALA Sombiniaina Antonio

Lot III G 124 A Bis Ambatolampy  
Antehiroka – Tanà 101

Tel : +261 33 05 631 42

Mail : antonio39138@gmail.com