

Etude de l'Influence de l'inclinaison et des dépôts de poussière sur les performances des modules PV à Kamboinsé (site du ZiE).

Mémoire pour l'obtention du master d'ingénierie en Eau et Environnement – Ingénieur ZiE

Option : ENERGIE ET PROCEDES INDUSTRIELS

Présenté et soutenu publiquement le 13 Juin 2010 par :

DIALLO Amadou Sadio

Jury d'évaluation :

Président du Jury : Pr. Zacharie KOALAGA

Membres du Jury :

**Dr. AZOUMAH Yao
Ing. KOTTIN Henry**

Travaux dirigés par :

**Dr. AZOUMAH Yao
M. GAYE Madieumbe
M. KOTTIN Henry**

DEDICACES

A l'âme de mon cher père qui a été pour mon corps mieux qu'un cœur ;

A ma mère qui a sacrifié son temps pour nous ;

A ma Femme Aïssata Djouldé BARRY (Aïcha);

A mes enfants Boubacar et Mariam ;

A mes sœurs;

A tous ceux qui me sont chers ;

A toute ma grande famille Diallo, Barry, Sarr et Camara ;

A mes collègues de travail ;

A mes collègues des études ;

Et à tous mes amis.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Dr. AZOUMAH Yao, Ing. GAYE Madieumbe, Ing. KOTTIN Henri, cadres du Laboratoire « LESEE » pour avoir accepté de m'encadrer durant mon stage au sein du Labo « LESEE » et je leur exprime particulièrement toute ma reconnaissance pour m'avoir fait bénéficier de leur compétences scientifiques, leurs qualités humaines et leur constante disponibilité.

Mes remerciements à :

Mr YAMEGUEU Daniel

Mr BASSOLE Justin

Mr TAPSOBA Gildas

Mr SESHIE Yao Manu (L3D Energie)

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

LISTE DES ABREVIATIONS

2iE : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

LESEE : Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie

TiO₂ : Dioxyde de titane

Icc : Courant de court-circuit

Vco : Tension en circuit ouvert

C_n : Le cout du nettoyage d'un m²/mois

Q : la quantité d'eau nécessaire pour le nettoyage d'un mètre carré par mois

Pl : le prix d'un mètre cube d'eau

MO : la main d'œuvre pour le nettoyage d'un mètre carré par mois.

Gen : Gain économique net

Geb : Gain économique brute

RESUME/ABSTRACT

Résumé

Ce mémoire consiste à étudier les paramètres d'exploitation (inclinaison et dépôts de poussière) des modules PV en vue de leur amélioration. Après le choix du nettoyage par chiffon et les inclinaisons des modules à étudier, les expériences ont été faites pendant le mois de mai. Les études sur le dépôt de poussière ont montré que les modules PV perdent de **2** à **12%** de leur efficacité du fait de l'accumulation de saletés sur leur surface de captation. Cependant le nettoyage apportera donc une économie de **118 FCFA/m²/mois** par rapport aux modules non nettoyés. En comparant les productions des modules PV pour différentes inclinaisons il ressort qu'au Burkina Faso, situé à la latitude 12°, l'angle d'inclinaison optimal des modules est de **15°**.

Abstract

This master thesis deals with the study of the PV modules operating parameters (slope and deposits of dust) with the aim to improve their efficiency. After the choice of the cleaning by rag and the different slopes of the modules studied, the experiments were made during the month of May. Studies on the deposit of dust showed that PV modules lose between **2** and **12%** of their efficiency because of the accumulation of dirtinesses on their surface of collecting. However, the cleaning of PV modules will bring a saving of 118 FCFA/m²/month compared to the not cleaned modules. By comparing the productions of the modules for various slopes it emerges that in Burkina Faso, located at the latitude 12°, the optimal slope angle of PV modules is 15°.

SOMMAIRE

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS	ii
LISTE DES ABREVIATIONS	iii
RESUME/ABSTRACT	iv
SOMMAIRE	1
LISTE DES TABLEAUX	3
LISTE DES FIGURES	4
INTRODUCTION	5
I. CADRE D'ETUDE ET OBJECTIFS DU PROJET	5
I.1. Présentation du laboratoire d'accueil	5
I.2. Equipements.....	6
I.3. Objectifs visés par l'étude.....	7
I.4. Méthodologie et organisation du travail.....	8
II. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	8
II.1. Les problématiques du nettoyage des modules	8
II.2. Nettoyage avec un chiffon.....	9
II.3. Les technologies émergentes.....	9
II.4. Nettoyage photocatalyse avec tio2.....	10
II.5. Nettoyage électrostatique.....	12
II.6. Résumé Bibliographique SUR LE NETTOYAGE DES MODULES.....	15
II.7. Étude de l'inclinaison optimale des modules.....	15
III. ETUDE EXPERIMENTALE DES DEPOTS DE POUSSIERE ET DE L'INCLINAISON .	17
III.1. Équipements de mesure.....	17
III.2. Condition de mesure et méthodologie.....	17
a) Condition de mesure.....	17
b) Méthodologie.....	17
III.3. Étude expérimentale de dépôts de poussière sur les modules PV.....	19

III.4.	Résultat et interprétation de l'étude des dépôts de poussière sur les modules PV.....	20
III.5.	Estimation des gains d'énergies	24
III.6.	Conclusion Partielle	26
III.7.	Étude de l'inclinaison optimale des modules.....	26
	Résultat Et interpretation de l'étude d'inclinaison	26
IV.	RECOMMANDATIONS	33
V.	CONCLUSION GENERALE.....	34
VI.	BIBLIOGRAPHIE.....	35
VII.	ANNEXE	36
VII.1.	ANNEXE 1 : Mesures sur le dépôt de Poussière sur la surface des modules PV	36
VII.2.	ANNEXE 2 : Mesures sur les inclinaisons des modules PV	41

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: comparaison des 2 modules proprement nettoyé	19
Tableau 2: Puissance moyenne journalière	20
Tableau 3: Gain de puissance moyenne journalière.....	22
Tableau 4: Puissance moyenne journalière entre les inclinaisons de 15° et 0°	26
Tableau 5: Puissance moyenne journalière entre les inclinaisons de 15° et 5°	27
Tableau 6: Puissance moyenne journalière entre les inclinaisons de 15° et 10°	28
Tableau 7: Puissance moyenne journalière entre les inclinaisons de 15° et 15°	29
Tableau 8: Puissance moyenne journalière entre les inclinaisons de 15° et 20°	30
Tableau 9 : Puissance moyenne journalière entre les inclinaisons de 15° et 12°	31

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1: Equipe du LESEE</i>	7
<i>Figure 2: Dioxyde de Titane</i>	11
<i>Figure 3: Mode d'application de Photocal SC</i>	12
<i>Figure 4: Mars Rovers</i>	13
<i>Figure 5: Inclinaison des modules</i>	16
Figure 6: Schéma d'Expérimentation de dépôt de poussière	18
Figure 7: Schéma d'expérimentation de l'inclinaison optimale	18
Figure 8: Evolution de la puissance Moyenne ($U_{co} \times I_{cc}$) en fonction du jour	21
Figure 9 : Récapitulatif de l'Etude de dépôt de poussière	23
Figure 10 : Etude de l'inclinaison Optimale entre 15° et 0°	27
Figure 11 : Etude de l'inclinaison Optimale entre 15° et 5°	28
Figure 12 : Etude de l'inclinaison Optimale entre 15° et 10°	29
Figure 13 : Etude de l'inclinaison Optimale entre 15° et 15°	30
Figure 14 : Etude de l'inclinaison Optimale entre 15° et 20°	31
Figure 15 : Etude de l'inclinaison Optimale entre 15° et 12°	32

INTRODUCTION

Contexte :

Le développement du solaire photovoltaïque se heurte à un certain nombre de difficultés, parmi lesquelles le coût élevé du kWh produit et la longue durée de retour sur investissement. A cela s'ajoute certains aspects d'installation et d'exploitation des modules PV.

Sur le plan de l'installation, l'inclinaison joue un rôle prépondérant dans l'efficacité d'un champ photovoltaïque. En effet, les modules étant fixes, il est donc nécessaire de trouver la bonne inclinaison pour qu'ils puissent capter le plus d'énergie solaire journalière.

Sur le plan de l'exploitation, les modules photovoltaïques nécessitent d'être exposés à l'extérieur afin de fonctionner sous l'ensoleillement le plus direct possible. De tels équipements sont de ce fait soumis à un environnement occasionnant de multiples sources de pollution et d'encrassement. Parmi les plus courantes, nous pouvons citer : polluants industriels, pollutions automobiles, pluie acide, cheminées, pollens, poussières, sables, feuilles d'arbres, mousse, champignons, sels en ambiance marine, calcaire, résidus de produits de nettoyage... En plus de baisser leurs rendements, certains polluants peuvent entraîner une usure prématurée des modules en engendrant des phénomènes d'échauffement intense via l'effet « hot spot ».

Les châssis en aluminium dont les modules sont équipés peuvent également être source de nuisance en termes de production électrique. Sous l'effet de la corrosion, les profilés en aluminium attaquent les surfaces vitrées de protection. Celles-ci deviennent alors rugueuses et s'opacifient, ce qui engendre donc un effet néfaste sur le rendement de production [1,2].

Sur le plan de l'installation, l'inclinaison joue un rôle prépondérant dans la performance d'un champ photovoltaïque. Dans ce sens le LESEE, qui œuvre pour la vulgarisation des technologies solaires en Afrique, mise entre autres sur l'amélioration des performances des modules PV. Dans cet ordre d'idée, deux aspects fondamentaux de l'exploitation des modules PV méritent d'être étudiés de façon plus précise : les dépôts de poussière (très importants en climat sahélien), et l'inclinaison des modules.

I. CADRE D'ETUDE ET OBJECTIFS DU PROJET

1.1. PRESENTATION DU LABORATOIRE D'ACCUEIL

Notre stage, s'est déroulé au Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (**LESEE**) de l'Unité Thématique de Recherche et d'Enseignement Génie Energétique et Industrielle (UTER

GEI) de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) de Ouagadougou.

L'objectif principal du **LESEE** est de contribuer à l'innovation industrielle dans le domaine du solaire pour une production et une utilisation rationnelle d'énergies électrique /thermique en Afrique.

Le projet scientifique du laboratoire se résume en trois principaux axes à savoir :

Axe 1 : Etude des centrales solaires à concentration. Pour répondre au manque de données d'ensoleillement fiables sur le continent, de mieux dimensionner les installations solaires et de répondre aux besoins des pays concernés, une part importante de nos activités porte sur l'évaluation précise de la ressource solaire et des besoins énergétiques en Afrique. Le contexte climatique et économique assez particulier du continent africain amène à envisager également dans cet axe à concevoir et étudier les cycles de nouveaux modèles de centrales solaires adaptés et moins coûteux : centrales hybrides solaire/biomasse, couplage des technologies existantes, centrales à cycles combinés...

Axe 2 : Habitat, architecture bioclimatique et systèmes solaires photovoltaïque (PV). Dans la perspective de la raréfaction des ressources énergétiques conventionnelles, il s'agit tout d'abord de développer des concepts pour la durabilité énergétique et environnementale dans les bâtis au sud du Sahara et de développer des outils pour une intégration optimale de l'énergie solaire PV dans l'architecture. Le second volet de nos travaux porte sur la production d'électricité à grande échelle via des centrales hybrides PV/groupe électrogène et l'étude des problèmes liés à la connexion des systèmes solaires aux réseaux électriques existants.

Axe 3 : Conception optimale et optimisation thermodynamique des systèmes énergétiques. Cet axe porte sur l'efficacité énergétique. Il s'agit ici de développer des outils pour une meilleure intégration des procédés énergétiques et/ou une conception optimale de ces procédés en s'appuyant sur des approches d'optimisation thermodynamique couplées à l'utilisation des méthodes d'optimisation géométrique multi-échelle.

1.2. EQUIPEMENTS

Une station météo entièrement équipée (pyranomètre, pyréliomètre, anémomètre, girouette, hygromètre)

Une station de pompage photovoltaïque (800Wc, HMT 45m)

Un prototype de centrale hybride solaire PV / groupe électrogène (2,8kWp, 11,5kVA)

Une plateforme solaire PV composée de : champ PV, bancs de test de modules PV, simulateur/analyseur de réseaux. (En cours d'acquisition)

Une plateforme solaire à concentration composée d'un héliostat de 25 m², d'une tour de 10 m et d'un bloc électrique de petite puissance (en cours d'acquisition).

Mon travail s'inscrit dans le troisième axe de ce laboratoire qui traite de l'efficacité énergétique car produire de l'énergie c'est bien mais savoir l'utiliser c'est encore mieux.

Dans le but d'atteindre de manière encore plus efficace ses objectifs, le LESEE dispose de plusieurs partenaires dont Kwame Nkrumah University of Science and Technology (Ghana), PROMES-CNRS/Université de Perpignan (France); INES/CEA (France), LOCIE/Université de Savoie (France), John Research Center- ISPRA (Italie); Duke University (USA), les Entreprises MicroSow (BF), PPI (BF) et bien d'autres

L'équipe dynamique du LESEE à ce jour est composée de plusieurs membres représentés dans la figure ci-dessous.

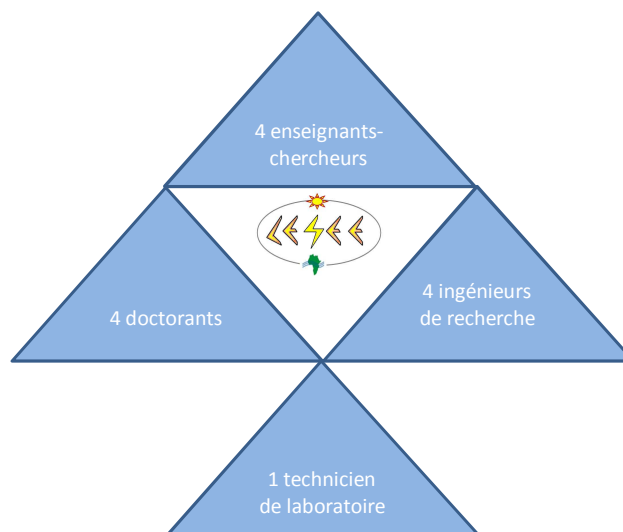


Figure 1: Equipe du LESEE

1.3. OBJECTIFS VISES PAR L'ETUDE

L'objectif de cette étude c'est la détermination précise :

- des pertes d'énergie engendrées par les dépôts de poussière sur la surface des modules PV ;
- de l'inclinaison optimale permettant de maximiser la production d'énergie des modules.

I.4. METHODOLOGIE ET ORGANISATION DU TRAVAIL

Pour atteindre les objectifs fixés, quatre étapes seront suivies successivement:

- Etude Bibliographique sur l'Etude de l'Influence de l'inclinaison et des dépôts de poussière sur les performances des modules PV à Kamboinsé.
- Etude Expérimentale sur le dépôt de poussière sur la surface des modules PV ;
- Etude Economique sur le nettoyage des modules photovoltaïques.
- Etude Expérimentale de l'inclinaison optimale permettant de maximiser la production d'énergie des modules.

II. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

II.1. LES PROBLEMATIQUES DU NETTOYAGE DES MODULES

L'encrassement des modules photovoltaïques constitue un réel obstacle au maintien des performances de production, il est au contraire un acteur majeur de la baisse de leurs rendements. Une solution courante à ce problème consiste en un nettoyage manuel et périodique des installations par application d'eau. Cette méthode usuelle est certes efficace, mais plusieurs inconvénients peuvent toutefois s'en dégager.

Premièrement, un premier problème concerne le « gaspillage » de l'eau. En effet, des centrales photovoltaïques de très grande surface (plusieurs centaines de milliers de modules repartis sur quelques centaines d'hectares) sont régulièrement implantées dans des zones désertiques, favorisant ainsi un ensoleillement optimal. De telles zones d'implantation présentent malheureusement l'inconvénient d'accélérer les phénomènes d'encrassement par le sable et la poussière. Les opérations de maintenance sont donc régulières et requièrent des quantités d'eau conséquentes pour le refroidissement et le nettoyage intégral de la centrale...quantités d'eau qui se révèlent être en contradiction avec l'état des ressources dans les régions sèches ou désertiques.

Deuxièmement, il a été constaté que le nettoyage manuel des panneaux (ceci concerne principalement les installations photovoltaïques de petite et moyenne taille) peut aussi avoir un effet nocif. Des micro-rayures apparaissent au fil du temps sur les surfaces suite à des frottements sur des grains de sable, par exemple. Les conséquences de ces micro-rayures sont radicales puisqu'elles changent les propriétés optiques du matériau, en modifiant les propriétés de réflexion et de transmission, notamment.

Troisièmement, les opérations régulières de nettoyage requises pour le maintien du rendement des

modules PV peuvent être coûteuses. En effet, il faut l'intervention d'une équipe technique pour le suivi des équipements techniques permettant le nettoyage des modules PV. Ceci peut impacter significativement la durée d'amortissement économique des générateurs photovoltaïques. [1,2]

II.2. NETTOYAGE AVEC UN CHIFFON

❖ Principe de base de cette méthode :

Le nettoyage des panneaux solaires avec un chiffon est similaire au nettoyage des vitres et des miroirs. Pour nettoyer les panneaux solaires nous avons besoin d'un seau rempli d'eau savonneuse tiède, un chiffon sec et une raclette en caoutchouc. Lavez délicatement la surface du panneau avec de l'eau à savon et un chiffon, pour enlever la poussière, les débris et les taches d'eau. Ensuite on utilise une raclette pour enlever l'excès d'eau. Lors du nettoyage, une inspection est faite sur la surface des panneaux en vue de détecter les fissures ou les pièces à risque de se détacher. Cette inspection nous permettra de faire appel au fabricant ou un technicien en cas de dommage du panneau.

❖ Avantage et Inconvénient :

L'avantage de cette méthode est que c'est Simple, moins couteux et l'inconvénient est que c'est Pénible pour des grandes surfaces, utilisation importante des ressources en eau (notamment dans les zones désertiques), dégradation indirecte de la surface des modules (apparition de micro-rayures sous les effets des frottements), Impact directement sur le temps d'amortissement de l'installation etc....

II.3. LES TECHNOLOGIES EMERGENTES

Deux alternatives au nettoyage « classique » ont récemment émergé, dans le but non seulement d'apporter des solutions aux problèmes précédemment exposés, mais aussi d'offrir des gains de performance.

Une première technologie, utilisant le principe connu de la photocatalyse, a été développée par des laboratoires Suisse et Français et la deuxième technologie sera ensuite consacrée à la méthode de nettoyage par champ électrostatique, méthode initialement mise au point par la NASA pour ses appareils d'exploration spatiale [4,9].

II.4. NETTOYAGE PHOTOCATALYSE AVEC TiO_2

Généralité

Avant toute chose, il convient de définir l'acteur principal du phénomène de la photocatalyse : le **photocatalyseur**.

En chimie, un catalyseur est une substance permettant l'augmentation ou la réduction de la vitesse d'une réaction chimique. Durant cette réaction, le catalyseur n'est pas consommé, il est ainsi retrouvé inchangé en fin de réaction et peut être recyclé. On appelle « photocatalyseur » un catalyseur qui est actif sous l'action des rayons lumineux [4].

❖ Origine

Le TiO_2 est une substance composée d'oxygène et de titane, qui est extraite du neuvième minéral le plus répandu au monde : l'ilménite ($FeTiO_3$).

La photocatalyse fut découverte il y a plus de cinquante ans ; et trouva sa première application en 1967 au Japon. Mais ce n'est qu'à partir de 1990 que la photocatalyse fut utilisée à l'échelle industrielle, dans une multitude de secteurs.

❖ Propriétés

Propriétés structurales

Trois phases cristallines composent le dioxyde de titane, appelées respectivement *le rutile*, *l'anatase* et *la brookite*.

Propriétés optiques

Le rutile présente un fort indice de réfraction pouvant aller de 2,61 à 2,89 (contre 2,45 pour le diamant, et 2,2 pour le ZnO) et possède un fort pouvoir couvrant. Il trouve ainsi son utilité dans l'industrie des peintures.

Propriétés électroniques

Sous sa forme anatase, le dioxyde de titane s'avère être un semi-conducteur qui allie des vertus photocatalytiques. Le TiO_2 appartient à la catégorie des semi-conducteurs par rapport à sa largeur de bande interdite (le « gap »), qui est de 3,23 eV.

Toxicité ?

Cependant, des doutes subsistent quant à la toxicité du TiO_2 pour l'homme. Des récentes expériences menées sur des souris par plusieurs laboratoires de santé ont mis en évidence les effets

genotoxiques et cancérogènes des nanoparticules de TiO_2 . Du fait de leur petite taille, les particules peuvent pénétrer dans les cellules et donc interférer dans le mécanisme intracellulaire. Des inflammations pulmonaires sont ainsi provoquées, de même que des modifications dans la chaîne d'ADN du sujet [5,8].



Figure 2: Dioxyde de Titane

❖ Principe de la photocatalyse

Lorsqu'il est exposé sous une source lumineuse, le photocatalyseur va générer des molécules très oxydantes qui vont réagir directement avec les composés organiques (polluants, alcanes, alcènes, alcools, pesticides etc.) ou gaz polluants (NO_x) présents à sa surface. Un phénomène d'oxydoréduction se produit alors, ce qui aura pour effet de décomposer entièrement les entités polluantes et de les transformer entièrement en dioxyde de carbone (en très faible quantité), en eau, et en nitrates (seulement pour les gaz NO_x) [4,5].

Revêtement autonettoyant pour modules PV : exemple de Photocal SC

Cette section se basera essentiellement sur les performances et le retour sur expérience du produit « Photocal SC ».

Photocal SC est un revêtement autonettoyant adapté pour les surfaces vitrées des panneaux photovoltaïques. Ce produit a été développé par la société *Nanofrance technologies*, en utilisant le processus de photocatalyse par le biais du TiO_2 [6,7].

❖ Performances

- hydrophilie,
- refroidissement photocatalytique par brumisation : gain de rendement de 8% sur l'année
- gain en transmission et perte en réflexion,
- résistance à l'abrasion (dureté 7H),
- gain en rendement de 5% après 3 mois de fonctionnement [6,7].

❖ Mode d'application du produit Photocal SC sur les surfaces

L'application de ce revêtement peut, selon les fabricants, se faire manuellement via l'utilisation d'un pulvérisateur HVLP (High Volume Low Pressure, dispositif permettant une application uniforme du produit), en respectant une distance de travail de 30 à 50 cm. Deux couches sont généralement nécessaires, et il convient de respecter un temps de séchage d'une heure environ entre les deux couches. 24h de séchage sont ensuite requises au revêtement pour atteindre sa dureté maximale. La pulvérisation doit se faire dans un environnement relativement sec, avec un taux d'humidité inférieur à 20% [6,7].



Figure 3: Mode d'application de Photocal SC

II.5. NETTOYAGE ELECTROSTATIQUE

Projet NASA

Comme pour le nettoyage photocatalytique, le procédé de nettoyage par champ électrostatique intervient dans le but de réduire les pertes de rendement des modules photovoltaïques dues à un encrassement de leurs surfaces (par les poussières de l'air environnant ou sables présent à l'endroit de leurs implantations).

Il s'agit d'un facteur majeur pour maintenir un fonctionnement correct de l'installation photovoltaïque, en particulier dans les lieux retranchés, loin des habitations où une maintenance est plus difficile et surtout où le manque d'eau est important : exemple des milieux désertiques, ou comme nous allons le voir avec le procédé étudié, pour des applications spatiales requérant une

indépendance énergétique totale.

« Une couche de poussière de 4 mm (d'épaisseur) par mètre carré diminue la conversion d'énergie solaire de 40 %" a déclaré le responsable de l'étude Malay K. Mazumder. "En Arizona, la poussière se déposant chaque mois atteint environ 4 fois cette épaisseur. Les taux de dépôt sont encore plus élevés au Moyen-Orient, en Australie et en Inde » [12].

Fonctionnement du nettoyage par champ électrostatique

Les équipes de recherche ont mis au point un matériau transparent constitué d'oxyde d'indium et d'étain, et qui est placé en surface des panneaux (sur une feuille plastique ou sur du verre). Ce même matériau est associé à une série de capteurs disposés à la surface des modules et chargés de détecter la présence de poussières et d'impuretés. Après franchissement d'une concentration limite d'encrassement en surface (dont la valeur est pré établie), ces capteurs vont ainsi permettre le déclenchement d'un signal électrique qui va, comme « une vague », soulever les particules de poussière et les expulser de sa surface [13].

Boucliers autonettoyants des robots d'exploration spatiale (NASA)

Cette section a pour objet la description détaillée du dispositif de bouclier auto nettoyant conçu à l'origine pour les appareils déployés (rovers) à la surface de Mars.



Figure 4: Mars Rovers

Origine des composants

Le « bouclier » électrodynamique est composé de feuilles plastiques transparentes à base de polyéthylène téréphtalate (PET), sélectionnée pour sa bonne résistance aux radiations UV. Les électrodes conductrices sont quant à elles faites d'oxyde d'indium et d'étain transparent ; et sont encastrées sous un fin film invisible.

Montage électrique et champ électrostatique

Les électrodes sont ensuite connectées en parallèle à une alimentation en courant alternatif monophasé ou triphasé qui va produire une onde électromagnétique. Cette alimentation est fournie par le panneau lui-même.

Le champ électromagnétique produit par les électrodes repousse ainsi les particules de poussières qui se trouvent en surface et empêche par la même occasion, le dépôt de nouvelles particules (chargées positivement ou négativement).

Les particules non électriquement chargées vont se poser momentanément sur le panneau, puis vont être soumises à un champ électrique homogène : elles vont alors se déplacer en surface. Ce mouvement des particules va les faire devenir **triboélectriquement chargées**. Puis, le champ électromagnétique va agir et conduire à l'expulsion des particules présentes sur le matériau.

Influence du type d'alimentation électrique : monophasé ou triphasé

L'excitation due à l'alimentation en monophasé va provoquer une onde stationnaire alors qu'en triphasé une onde progressive sera formée.

Une onde stationnaire peut être considérée comme une superposition de deux ondes progressives circulant dans des directions opposées.

Ainsi toute asymétrie ou perturbation dans le champ électrique alternatif (incluant notamment la présence d'harmoniques dans le champ), ou tout courant d'air en surface supérieure de l'écran aura tendance à produire une vitesse de dérive qui transportera alors les particules de poussière lévitant en surface pour, à terme, les chasser de l'écran.

Quant à elle, l'onde progressive formée par l'alimentation triphasée bénéficiera d'une forte énergie de translation. C'est cette même énergie qui conduira au mouvement des particules de poussière « triboélectriques », allant d'un bord à un autre du substrat, et permettant aussi de nettoyer la surface.

Les expériences ont montré que les écrans alimentés en triphasé étaient de loin les plus efficaces pour enlever les particules de poussière.

II.6. RESUME BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE NETTOYAGE DES MODULES

Procédés	Description	Avantages	Inconvénients
Nettoyage des modules PV avec un chiffon	Le nettoyage des panneaux solaires avec un chiffon est similaire au nettoyage des vitres et des miroirs.	Simple et moins couteux	<ul style="list-style-type: none"> - Pénible pour des grandes surfaces - utilisation importante des ressources en eau (notamment dans les zones désertiques) - dégradation indirecte de la surface des modules (apparition de micro-rayures sous les effets des frottements) - Impact directement sur le temps d'amortissement de l'installation,
Nettoyage par Photocatalyse avec TiO_2 , en se basant notamment sur les caractéristiques du produit « Photocal SC »	PHOTOCAL SC, contrairement aux méthodes de traitements de protection traditionnels multicouches, s'applique facilement en une seule pulvérisation et augmente la transmission de la lumière de 5%.	<ul style="list-style-type: none"> - Rend les panneaux solaires intégralement autonettoyants - Evite les pertes de rendement de 5 à 15% par an dues à l'encrassement des PV - Diminue significativement les coûts de maintenance - Empêche l'adhérence des poussières, fientes d'oiseaux et feuilles d'arbres - Empêche l'encrassement par les taches « blanches » apparaissant lors du séchage des gouttes d'eau de pluies 	le recours aux nanoparticules de TiO_2 pour la mise en œuvre de la photocatalyse peut présenter des risques sur la santé, du fait de la probable toxicité du dioxyde de titane

II.7. ÉTUDE DE L'INCLINAISON OPTIMALE DES MODULES

L'orientation optimale de l'angle d'inclinaison des modules photovoltaïques, s'avère la méthode idéale pour optimiser le générateur PV, et dans ce cas de figure, on distingue deux méthodes:

a- Première méthode: Le système de poursuite est commandé par une électronique. En pratique, ce genre de réalisation revient très cher pour une augmentation du rendement. Ces systèmes qui sont, en général installés en milieu saharien fonctionnent souvent sous des conditions climatiques très hostiles, des vents de sable très fréquents avec des niveaux et du gradient de température très important pouvant facilement endommager les commandes électroniques;

b- Deuxième méthode: C'est la variation de l'angle d'inclinaison, mensuellement, en concevant et en réalisant une structure porteuse avec plusieurs positions, chaque position correspondant à une inclinaison mensuelle optimisée. C'est la méthode la moins chère et la plus pratique.

Au Burkina Faso et plus généralement dans tout l'hémisphère nord, l'orientation plein sud est la meilleure orientation possible pour un module photovoltaïque. C'est avec cette orientation qu'il produira le maximum d'électricité.

L'inclinaison des modules est fonction de la latitude du lieu considéré. Le Burkina a une latitude de 12° . Cette latitude explique les 14° d'inclinaison de nos modules.

En effet au cours de l'année la course du soleil est pratiquement orientée vers le sud par rapport à un point de la terre.

Pour produire un maximum d'électricité, un module photovoltaïque doit être incliné de façon perpendiculaire aux rayons du soleil. Ceci est généralement impossible à obtenir car la position du soleil varie en fonction de l'heure de la journée et aussi en fonction des saisons.

Le soleil est bas le 21 décembre par rapport à l'horizon, le module produira d'autant plus que son inclinaison est plus grande.

Au contraire, en été, le 21 juin, le soleil est au plus haut niveau le produira d'autant plus que son inclinaison est faible (proche de 14°) [15]

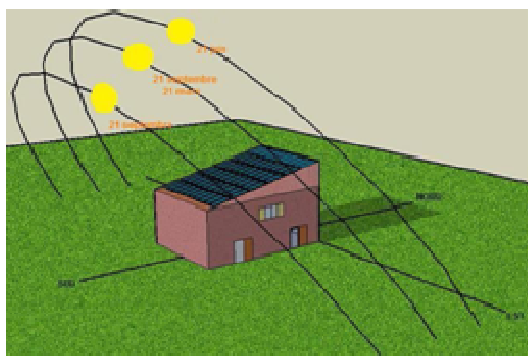


Figure 5: Inclinaison des modules

III. ETUDE EXPERIMENTALE DES DEPOTS DE POUSSIERE ET DE L'INCLINAISON

III.1. ÉQUIPEMENTS DE MESURE

- 1) Nous disposons pour ce travail quatre modules photovoltaïques identiques en paire. Pour le dépôt de poussière nous utilisons 2 modules de marque SHARP comportant chacun 36 cellules au silicium monocristallin rectangulaire (150 x65Cm) avec une puissance crête de 123.0 W par module. Pour l'inclinaison nous utilisons aussi 2 modules de marque SUNTECH comportant chacun 36 cellules au silicium polycristallin rectangulaire (155 x77mm) avec une puissance crête de 50 W par module.
- 2) Un multimètre FLUKE 73
- 3) Un solarimètre de marque 776E de DoDge
- 4) Une pissette
- 5) Une éprouvette de 1,5 litre
- 6) Un clinomètre de marque recta type Dp10

III.2. CONDITION DE MESURE ET METHODOLOGIE

- a) Condition de mesure

Les mesures ont été effectuées pendant la saison sèche (Mai-Juin) où le ciel est le plus souvent non couvert de nuages. La température ambiante variant entre 22 et 41°C les paramètres mesurés sont :

L'éclairement (is) sur le plan du module orienté plein sud à + 15° de latitude, le courant de court-circuit (Icc) et la tension en circuit ouvert (Vco).

- b) Méthodologie

- **Etude des dépôts de poussière**

Deux modules photovoltaïques identiques sont montés sur un support incliné à 15° et orienté plein sud. Le module A sera nettoyé chaque matin avec un volume d'eau 1,5 litres chaque jour. Le module B ne sera jamais nettoyé durant toute la durée de l'expérience qui durera 1 Mois. On relèvera à intervalle de 2 h l'éclairement, la tension en circuit ouvert, le courant de court-circuit.

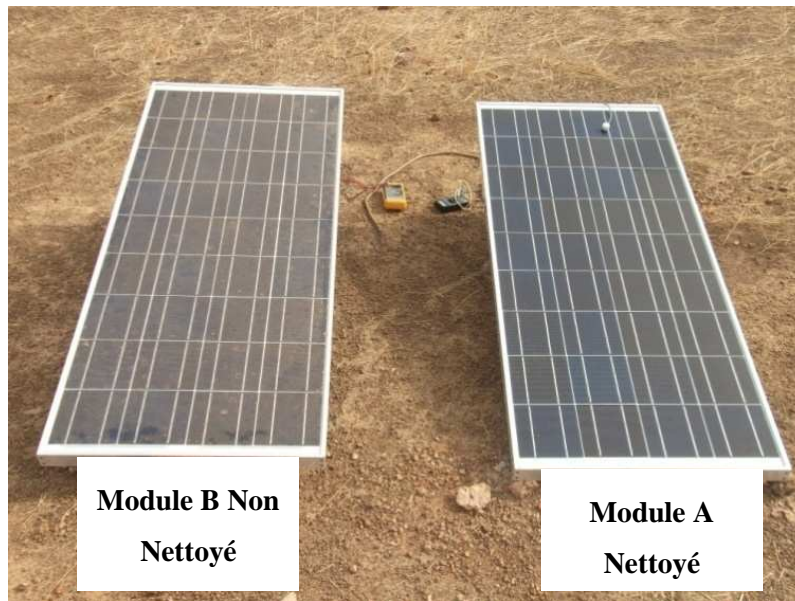


Figure 6: Schéma d'Expérimentation de dépôt de poussière

- **Etude de l'inclinaison optimale des modules**

Deux modules photovoltaïques identiques seront montés sur des supports différents orientés plein sud. Le module A sera chaque jour incliné à 15°. L'inclinaison du module B sera variable.

Le module B sera incliné à 0°, 5°, 10°, 15°, 20° et à l'inclinaison théorique optimale déterminée à l'aide du diagramme solaire, soit 6 inclinaisons à étudier. L'inclinaison du module sera changée toutes les 2 ou 3 Jours.

On relève chaque jour, toutes les 2 heures entre 8h 15' et 16h 15', la tension en circuit ouvert, le courant de court-circuit de chaque module ainsi que l'éclairement solaire (en W/m²) sur le plan de chaque module.



Figure 7: Schéma d'expérimentation de l'inclinaison optimale

III.3. ÉTUDE EXPERIMENTALE DE DEPOTS DE POUSSIÈRE SUR LES MODULES PV

Avant de commencer notre étude il est nécessaire de vérifier si les deux modules sont exactement identiques ; et au cas contraire de relever la différence.

Pour cela les deux modules (A et B) sont préalablement bien nettoyés. En prenant le module A comme référence, nous avons mesuré le courant de court-circuit à 20 secondes d'intervalle environ pour un même ensoleillement. Le tableau suivant donne les résultats et l'erreur calculé

$$\% = \frac{I_a - I_b}{I_a}$$

Tableau 1: comparaison des 2 modules proprement nettoyé

Module A propre		Module B propre		IA-IB	Pourcentage (IA-IB)/IA
E (W/m2)	I(A)	E (W/m2)	I(B)		
920	7,96	920	7,93	0,03	0%
425	3,55	425	3,56	-0,01	0%
376	3,05	376	3,08	-0,03	-1%
700	6,44	700	6,28	0,16	2%
850	7,64	850	7,66	-0,02	0%
740	6,32	740	6,37	-0,05	-1%
460	3,55	460	3,73	-0,18	-5%
Moyenne des pourcentages					1%

On constate une différence de l'ordre de **1%**. On peut donc négliger cette erreur et supposer que les deux panneaux sont identiques.

III.4. RESULTAT ET INTERPRETATION DE L'ETUDE DES DEPOTS DE POUSSIERE SUR LES MODULES PV

❖ Etude de dépôt de poussière sur l'ensemble de la période d'expérimentation

Tableau 2: Puissance moyenne journalière

	Puissance Moyenne du Module Nettoyé (W)	Puissance Moyenne du Module Non Nettoyé (W)
05/05/2011	96,85	94,64
06/05/2011	89,47	86,38
07/05/2011	82,16	75,64
09/05/2011	82,04	75,65
10/05/2011	96,17	92,34
11/05/2011	102,50	96,71
12/05/2011	96,33	91,87
13/05/2011	75,27	69,82
16/05/2011	102,37	96,58
17/05/2011	87,52	80,75
18/05/2011	98,42	88,70
19/05/2011	106,86	99,74
20/05/2011	118,29	104,49
21/05/2011	106,62	94,63

Evolution de la Puissance Moyenne (Uco x Icc) en fonction du jour

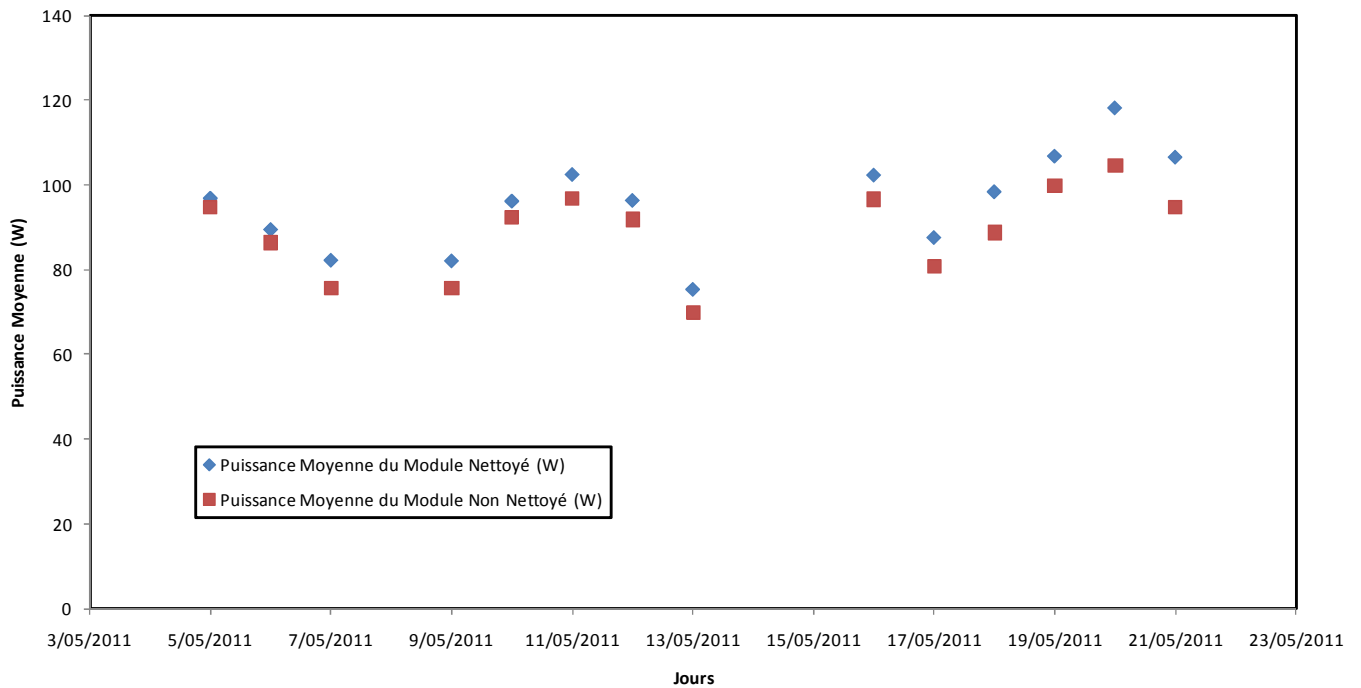


Figure 8: Evolution de la puissance Moyenne (Uco x Icc) en fonction du jour

Interprétation des courbes ci-dessus :

D'une manière générale, on constate que la puissance moyenne du module nettoyé est supérieure à celle du module non nettoyé. Cela s'explique par le fait que le module nettoyé reçoit la totalité de l'ensoleillement sur sa surface et que le module non nettoyé en perd une partie. Egalement nous remarquons que les puissances moyennes des deux modules ne sont pas régulières, elles sont variables car l'ensoleillement n'est pas continu et varie en fonction du mois et des heures de la journée. Nos expériences se sont déroulées pendant le mois de mai caractérisé par le passage des nuages rendant l'irradiation incidente parfois faible.

Quelque soit le temps de l'expérience (ciel dégagé ou nuageux), les deux courbes montrent clairement l'impact des dépôts de poussière sur les modules PV. Ce qui nous amène à évaluer les gains de puissance engendré par le module nettoyé par rapport au module non nettoyé.

III.4.1. GAINS DE PUISSANCE ($U_{co} \times I_{cc}$) MOYENNE JOURNALIERE SI ON NETTOIE NOS MODULES PHOTOVOLTAÏQUES

Le tableau suivant donne le récapitulatif des gains de puissance journalière obtenu avec nos mesures expérimentales.

Tableau 3: Gain de puissance moyenne journalière

Gains de Puissances Moyennes journalières

05-mai-11	2%
06-mai-11	3%
07-mai-11	8%
09-mai-11	8%
10-mai-11	4%
11-mai-11	6%
12-mai-11	5%
13-mai-11	7%
16-mai-11	6%
17-mai-11	8%
18-mai-11	10%
19-mai-11	7%
20-mai-11	12%
21-mai-11	11%
Gain Moyen	7%

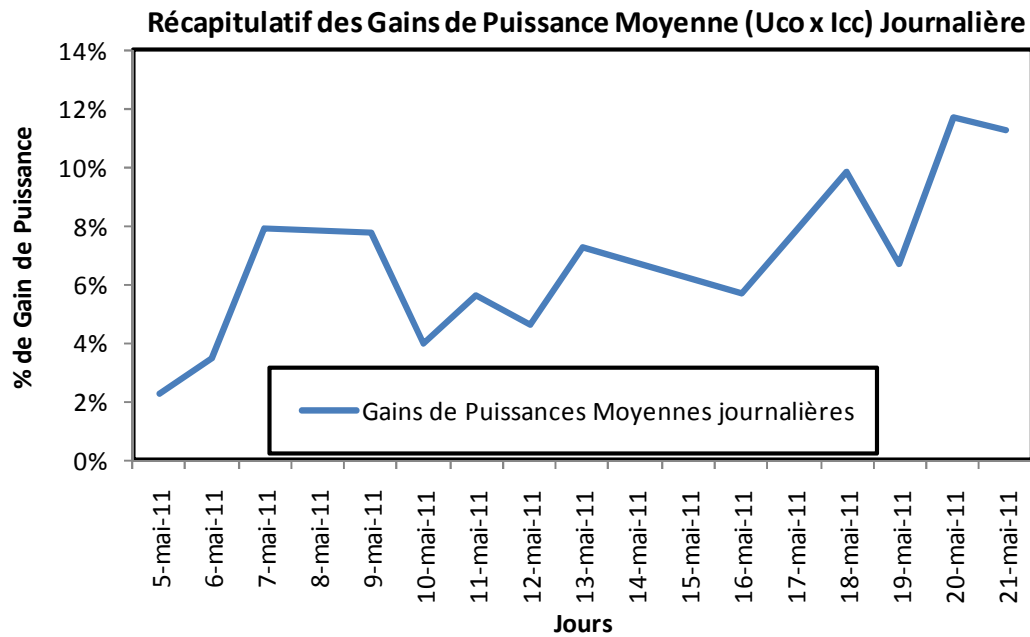


Figure 9 : Récapitulatif de l'Etude de dépôt de poussière

Du 5 au 7 mai 2011 le gain de puissance a augmenté de **2 à 8%** et reste constant jusqu'au 9 Mai 2011. Il décroît **du 9 au 10 Mai 2011**. Cette diminution du gain est due à la baisse de l'éclairement influencé par le ciel nuageux sur les surfaces des modules PV. A partir du 10 Mai 2011 il croît de nouveau de **12%** durant les 12 derniers jours d'expérience.

Sur les 21 jours si nous nettoions les modules on aura un gain de puissance moyenne journalière de **7%**.

CONCLUSION :

La baisse en efficacité électrique d'un module photovoltaïque au cours de ces années de fonctionnement constitue une réelle problématique, et les phénomènes d'encrassement en sont une des causes principales. Pour pallier à ce problème de dégradation des modules, des opérations de nettoyage manuelles sont menées sur les installations.

Pour cette étude par nettoyage simple avec de l'eau, nous obtenons un gain moyen journalier en puissance de **7%**. Cependant, la méthode utilisée est certes efficace mais consomme l'eau une autre forme d'énergie.

Afin de savoir si il y a nécessité de nettoyer les modules PV, nous allons évaluer les gains d'énergies du au nettoyage et les dépenses qui en découlent.

III.5. ESTIMATION DES GAINS D'ENERGIES

L'étude précédente révèle des pertes de puissance des modules non nettoyés et nous avons pu estimer les gains de puissance pour les modules nettoyés par rapport à ceux non nettoyés. Mais ce gain est sans doute un gain brut car avant de confirmer si réellement il est nécessaire de nettoyer les modules nous devons tenir compte du coût du nettoyage.

III.5.1.1. ESTIMATION DES GAINS ENERGETIQUES BRUTS

Le gain énergétique brut est la différence entre l'énergie produite par le module nettoyé et celle produite par le module non nettoyé sur un temps donné.

Au cours de l'expérience, le gain en énergie du module nettoyé est de **565,2Wh** par rapport à celui non nettoyé. Ce gain est obtenu en faisant la somme de tous les gains par jour durant la période de l'expérience (voir annexe 1)

Pour une bonne étude comparative il est nécessaire de ramener les gains par mètre carré de panneau et par mois.

$$\text{On obtient alors : } G = G_{MN} / (S * N) \quad (1)$$

G : gain moyen de l'énergie sur les PV

G_{MN} : gain énergétique du module nettoyé par rapport à celui non nettoyé

S : la surface du module

N : Nombre de jours.

$$\underline{AN : G=565,2/(0,975*21) \approx 27,59}$$

$G \approx 27,59 \text{Wh/m}^2/\text{j}$ soit **828 Wh/m²/mois**. Par la suite nous retiendrons un gain d'énergie moyen de **828 Wh/m²/mois** en énergies sur le panneau nettoyé par rapport à celui non nettoyé.

III.5.2. ESTIMATION DU COUT DU NETTOYAGE DES MODULES PV

Le coût du nettoyage est égal à la somme du prix de l'eau utilisée pour le nettoyage et du coût de la main d'œuvre.

$$C_n = Q * P_1 + MO \quad (2)$$

Avec C_n le cout du nettoyage d'un m²/mois

Q la quantité d'eau nécessaire pour le nettoyage d'un mètre carré par mois

Pl ; le prix d'un mètre cube d'eau

MO : la main d'œuvre pour le nettoyage d'un mètre carré par mois.

$$- Q=0,0015*30/0,975$$

$$- Q =0,046m^3/m^2$$

Au Burkina le branchement de catégorie grands maisons, industries, communes, collectivités, administrations : le tarif société est **1 040 FCFA/m³** Tarif unique (sans tranche)

On suppose qu'une personne peut nettoyer une superficie de **5000m² par jours** soit **150 000 m²/mois** et il sera payé à **35 000 FCFA/ mois** ce qui revient **MO=35000/(150000)** donc on a : **MO= 0,23 FCFA/m²/mois**

De l'équation (2) on déduit le coût de nettoyage des modules PV.

Application numérique : **C_n =0,046*1040+0,23**

$$C_n \approx 48 \text{ FCFA/m}^2/\text{mois}$$

III.5.3. ESTIMATION DES GAINS ECONOMIQUES

III.5.3.1. GAIN ECONOMIQUE BRUT

Le gain économique brut est le produit du gain énergétique brut (kWh/m²/mois) et du prix moyen du kWh produit (FCFA/kWh)

$$G_{eb} = (G_{MN}/1000) * \text{Coût du Kwh en solaire} \quad (3)$$

$$G_{eb} = (828/1000)*200$$

$$G_{eb} = 165,6\text{FCFA/m}^2/\text{mois}$$

III.5.3.2. GAINS ECONOMIQUES NETS

Le gain économique net (Gen) est la différence entre le gain économique brute (FCFA/m²/mois) et le cout du nettoyage des modules (FCFA/m²/mois).

$$G_{en} = G_{eb} - C_n \quad (4)$$

Application Numérique : **Gen=165,6-48≈118**

$$G_{en} \approx 118 \text{ FCFA/m}^2/\text{mois}$$

III.6. CONCLUSION PARTIELLE

Le dépôt de poussière est sans doute un phénomène qui entraîne la baisse en efficacité des modules PV. Ce qui nous a révélé l'étude expérimentale effectuée. Le calcul du gain économique net nous donne un ordre de grandeur des économies que nous pouvons faire en nettoyant simplement nos modules PV. Ce gain net est de **118FCFA/m²/mois** peut être augmenté si on utilise d'autres méthodes modernes de nettoyage.

III.7. ÉTUDE DE L'INCLINAISON OPTIMALE DES MODULES

RESULTAT ET INTERPRETATION DE L'ETUDE D'INCLINAISON

L'une des étapes les plus importantes du dimensionnement du générateur photovoltaïque consiste à choisir l'inclinaison optimale du panneau solaire. Une variété de solutions est possible selon la disposition des supports : fixe, mobile, semi-mobile. Les valeurs de l'inclinaison couramment adoptées étant en général empiriques, cette étude tente d'évaluer en comparaison avec diverses positions, l'inclinaison optimale pour un panneau au support fixe dans un climat sahélien.

Pour cela, deux modules photovoltaïques identiques sont montés sur des supports différents orientés plein sud. Durant toute l'expérience, l'inclinaison du module A est fixée à 15° tandis que celle du module B varie suivant les angles 0°, 5°, 10°, 15°, 20° et 12°, soit six (6) inclinaisons à étudier.

☞ Comparaison entre les inclinaisons 15° et 0°

Etude de l'inclinaison Optimale entre 15° et 0° :

Les courbes suivantes donnent les puissances moyennes mesurées en W, des deux modules photovoltaïques situés auprès de la centrale météo de K2 (Kamboinsé), pendant un mois (Mai 2011), pour différentes valeurs de l'inclinaison.

Tableau 4: Puissance moyenne journalière entre les inclinaisons de 15° et 0°

	Puissance Moyenne du Module 15° (W)	Puissance Moyenne du Module 0° (W)
05/05/2011	49	49
06/05/2011	44	43
07/05/2011	46	42

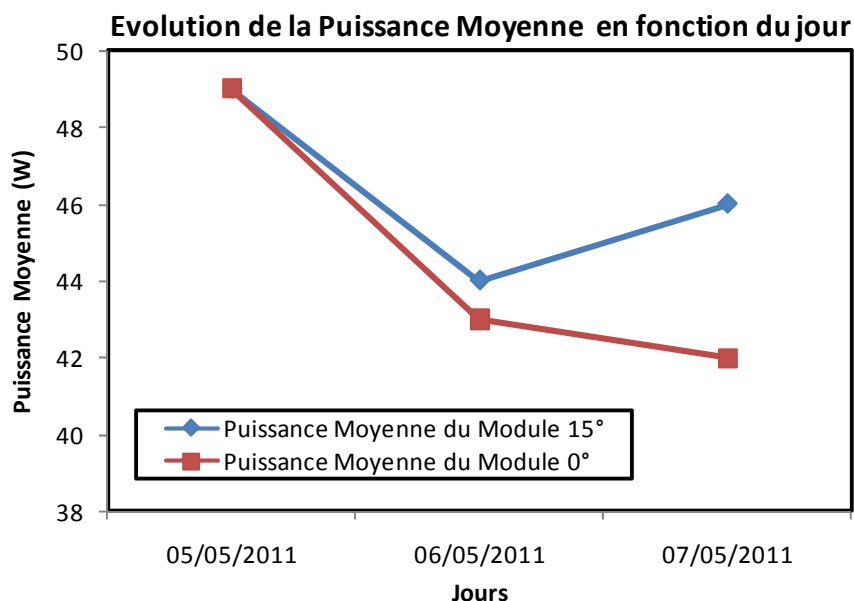


Figure 10 : Etude de l'inclinaison Optimale entre 15° et 0°

Interprétation :

En comparant les puissances moyennes journalières du module A incliné à 15° et celle du module B incliné à 0° (figure10), on constate que à part le premier jour les puissances moyennes sont sensiblement égales; la puissance moyenne du module A est supérieure à celle du module B.

Pour les trois jours d'étude (Mois de Mai), l'expérience montre que le module incliné à 15° est plus performant en puissance moyenne de 4% que celui incliné à 0° (Voir Annexe 2).

☞ **Comparaison entre les inclinaisons 15° et 5°**

Etude de l'inclinaison Optimale entre 15° et 5°

Tableau 5: Puissance moyenne journalière entre les inclinaisons de 15° et 5°

	Puissance Moyenne du Module 15° (W)	Puissance Moyenne du Module 5° (W)
09/05/2011	42,00	41,00
10/05/2011	50,00	50,00
11/05/2011	54,00	53,00

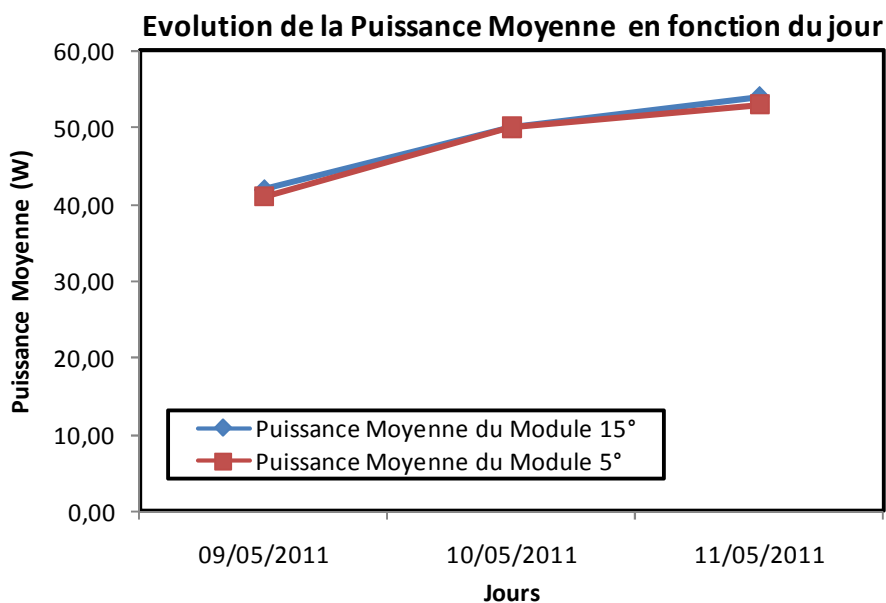


Figure 11 : Etude de l'inclinaison Optimale entre 15° et 5°

Interprétation :

En comparant les puissances moyennes journalières du module A incliné à 15° et celle du module B incliné à 5°(figure11), on constate que à part le deuxième jour dont la puissance moyenne du module A est égale à celle du module B; les deux autres jours la puissances moyenne du module A est supérieure à celle du module B. Cette expérience nous montre également qu'un module incliné à 15° est plus performant en puissance moyenne de 2% que celui incliné à 5° (Voir Annexe 2).

☞ **Comparaison entre les inclinaisons 15° et 10°**

Etude de l'inclinaison Optimale entre 15° et 10°

Tableau 6: Puissance moyenne journalière entre les inclinaisons de 15° et 10°

	Puissance Moyenne du Module 15° (W)	Puissance Moyenne du Module 10° (W)
12/05/2011	49,00	48,00
13/05/2011	35,00	34,00

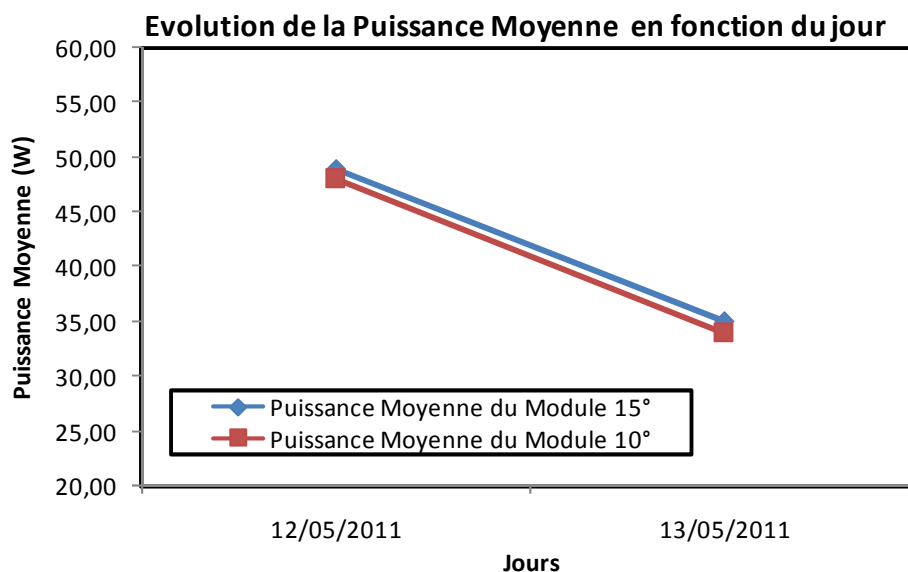


Figure 12 : Etude de l'inclinaison Optimale entre 15° et 10°

Interprétation :

En comparant les puissances moyennes journalières entre les deux modules A et B incliné respectivement 15° et 10° (figure 12), nous constatons que même que la puissance moyenne du module A est toujours supérieure à celle du module B.

Donc pour les deux jours d'étude (Mois de Mai), l'expérience nous montre que le module incliné à 15° est plus performant en puissance moyenne de 2% que celui incliné à 10° (Voir Annexe 2).

☞ **Comparaison entre les inclinaisons 15° et 15°**

Etude de l'inclinaison Optimale entre 15° et 15°

Tableau 7: Puissance moyenne journalière entre les inclinaisons de 15° et 15°

	Puissance Moyenne du Module 15° (W)	Puissance Moyenne du Module 15° (W)
16/05/2011	48,00	48,00
17/05/2011	44,00	44,00

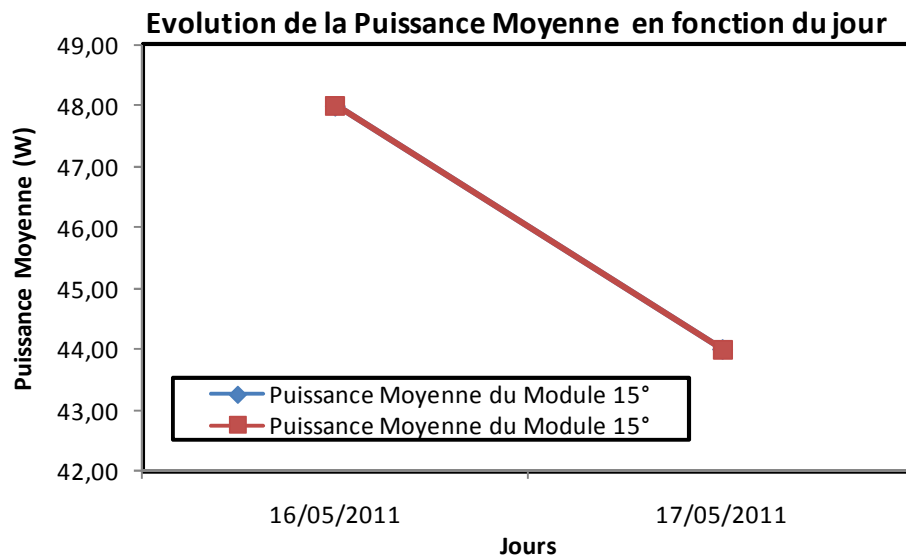


Figure 13 : Etude de l'inclinaison Optimale entre 15° et 15°

Interprétation :

Pour les deux jours d'expérience les puissances moyennes enregistrées pour les deux modules sont identique puisque les deux modules sont orientés tous de 15°.

☞ Comparaison entre les inclinaisons 15° et 20°

Etude de l'inclinaison Optimale entre 15° et 20°

Tableau 8: Puissance moyenne journalière entre les inclinaisons de 15° et 20°

	Puissance Moyenne du Module 15° (W)	Puissance Moyenne du Module 20° (W)
18/05/2011	42,00	40,00
19/05/2011	46,00	44,00

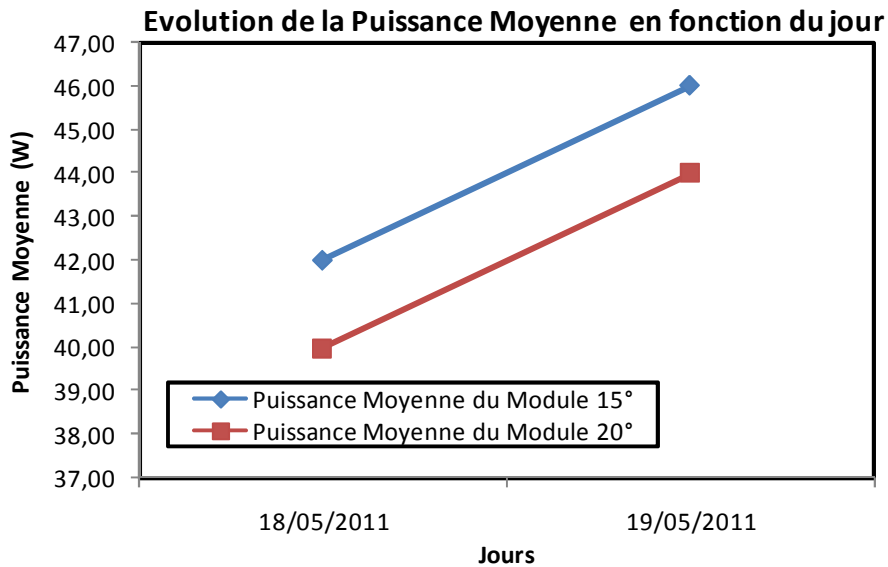


Figure 14 : Etude de l'inclinaison Optimale entre 15° et 20°

Interprétation :

En comparant ces puissances moyennes journalières de ces deux inclinaisons, on constate que les puissances moyennes du module A est supérieure à celle du module B (figure 14).

Pour les deux jours d'étude (Mois de Mai), l'expérience nous montre que le module incliné à 15° est plus performant en puissance moyenne de 5% que celui incliné à 20° (Voir Annexe 2).

☞ **Comparaison entre les inclinaisons 15° et 12°**

Etude de l'inclinaison Optimale entre 15° et 12°

Tableau 9 : Puissance moyenne journalière entre les inclinaisons de 15° et 12°

	Puissance Moyenne du Module 15° (W)	Puissance Moyenne du Module 12° (W)
20/05/2011	36	34
21/05/2011	37	35
22/05/2011	45	44

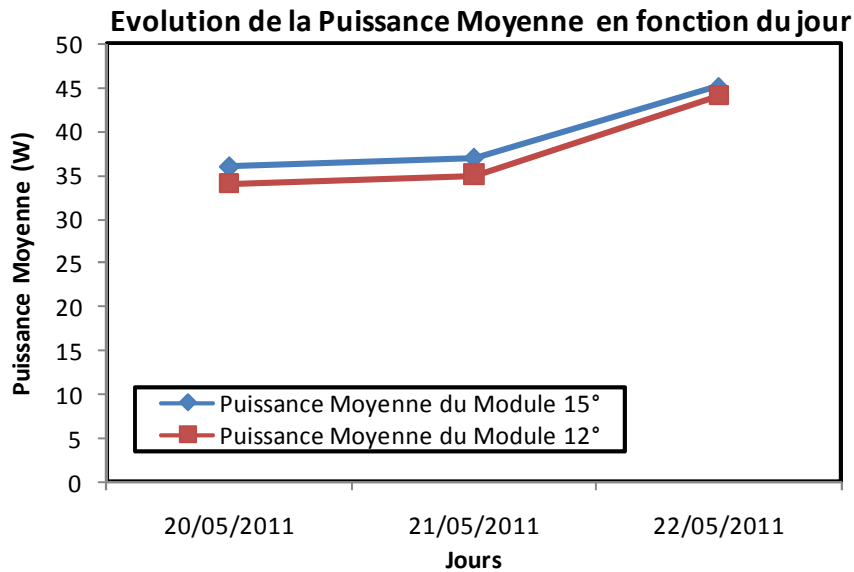


Figure 15 : Etude de l'inclinaison Optimale entre 15° et 12°

Interprétation :

En comparant ces puissances moyennes journalières de ces deux inclinaisons, on constate que les puissances moyennes du module A est supérieure à celle du module B (figure 15).

Pour les deux jours d'étude (Mois de Mai), l'expérience nous montre que le module incliné à 15° est plus performant en puissance moyenne de 4% que celui incliné à 12° (Voir Annexe 2).

L'inclinaison du module B représente la latitude du lieu et constitue l'inclinaison théorique des modules PV. Dans le cas de notre zone d'étude (Burkina Faso) l'expérience qu'il est préférable qu'il est mieux de choisir une inclinaison un peu supérieure à celle de la latitude du lieu.

Conclusion Partielle

La première constatation est que si on choisie une inclinaison supérieure à 15°, le module devient moins performant. Il perd même une grande quantité d'énergie par rapport au module incliné à 15° (figure 14). Il sera donc important de ne pas orienté les module au delà de 15° pour notre zone d'expérience (Burkina Faso).

La deuxième est que pour les inclinaisons inferieures à 15°, le module de 15° reste plus performant mais pas comme les modules d'inclinaison supérieure à 15°.

Nous pouvons alors conclure que l'inclinaison optimale trouvée durant notre étude expérimentale est de 15° dans notre zone d'étude.

IV. RECOMMANDATIONS

Refaire l'étude sur une longue période (toute l'année par exemple) pour mieux quantifier l'influence de la poussière sur les modules PV	Saisons, vent influencent la qualité des résultats. Un an → toutes les saisons seront parcourues.
Disposer de plusieurs modules identiques à des différentes inclinaisons qu'on souhaite étudier au même instant et au moins pendant 1an.	Ne pas avoir toutes les inclinaisons possibles au même instant engendre des imprécisions sur les résultats à cause de la variation de l'ensoleillement.
Remplacer le clinomètre par un rapporteur pour une plus grande précision au niveau de l'inclinaison.	Fabriquer des supports rigides réglables en inclinaison
Disposer de plusieurs solarimètres connectés à un système enregistreur ou bien utiliser la station météo.	Internet étant défaillant,
Mettre le nombre de pas (intervalle de temps) à 2 minutes au lieu de 2 heures avec un système enregistreur	Par ce que l'ensoleillement varie à chaque moment et entraine une variation du courant et la tension.
Mettre une charge sur les modules photovoltaïques, pour mieux comparer les intensités et les tensions à vide et en charge.	Pour pouvoir voir la différence entre les tensions et les courants avec charge ou non
Disposer un appareil de mesure de la poussière sur la surface des modules	Pour pouvoir estimer une couche de poussière d'épaisseur par mètre carré diminue la conversion d'énergie solaire de combien.
Limites du Travail	<ul style="list-style-type: none"> - Etude effectué 1 mois, pas suffisante pour valider les résultats pour une année - Manque d'équipements

V. CONCLUSION GENERALE

Cette étude nous a permis en premier lieu de montrer l'influence des dépôts de poussière sur les modules PV. Nous avons constaté que durant l'étude expérimentale sur le dépôt de poussière, si on ne nettoie pas nos panneaux on perd en moyenne de puissance de **7%** de sa performance et cette perte entraîne la diminution de la production d'énergie indiquée par les fabricants. Il ressort également que si nous nettoyons notre système PV avec de l'eau savonneuse nous pourrions engranger des économies d'énergie brute de **828Wh/m²/ mois**. En considérant le cout de nettoyage de **48 FCFA/m²/ mois** notre étude révèle un gain nette de **118 FCFA/m²/ mois**.

L'étude sur l'inclinaison des modules nous à permis de confirmer que l'angle optimum des modules PV est proche de la latitude du lieu. En ce qui concerne notre zone d'étude (Kamboinsé) qui à une latitude de 12°, nous avons obtenu 15° comme l'angle optimum pour les différentes inclinaisons des modules. Il est aussi à noter qu'il est les pertes de puissance sont plus importantes si nous dépassons les 15° que si nous sommes au dessous de cette inclinaison pendant le mois de l'expérience (Mai 2011).

De ces deux études nous pouvons dire qu'il est nécessaire de prendre en compte les paramètres d'installation (inclinaison) et le dépôt de poussière pour ne pas mettre en cause les puissances dimensionnées. Vu les influences de ces paramètres il serait intéressant de poursuivre cette étude en utilisant d'autres méthodes de nettoyage comme la méthode de Photocal SC et de rechercher l'angle optimum pour chaque mois durant l'année.

VI. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Jacob P. Bock, Jason R. Robison, Rajesh Sharma, Jing Zhang, Malay. K. Mazumder. An Efficient Power Management Approach for Self-Cleaning Solar Panels with Integrated Electrodynamic Screens *Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics 2008, Paper O2*
- [2] Monto Mani, Rohit Pillai. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Centre for Sustainable Technologies, Indian Institute of Science, Bangalore 560012, India. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/rser
- [3] <http://www.panneauenergiesolaire.com/?p=14>
- [4] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Photocatalyse>
- [5] http://www.actu-environnement.com/ae/news/depollution_photocatalyse_6819.php4
- [6] *Société Nanofrance technologies* : www.photocal.fr
- [7] <http://photocal.over-blog.com/>
- [8] Toxicité du TiO₂ :
http://www.notre-planete.info/actualites/actu_2197_nanoparticules_dioxyde_titane_danger_sante.php
- [9] <http://www.zegreenweb.com/sinformer/energie/quand-la-nasa-ameliore-1%E2%80%99efficacite-des-panneaux-solaires,15566>
- [10] http://www.prog-paradisaea.com/spip.php?page=thema&id_article=28
- [11] <http://www.faiteslepleindavenir.com/2010/09/30/des-panneaux-solaires-auto-nettoyants-2/>
- [12] <http://www.enerzine.com/1/10240+les-panneaux-solaires-auto-nettoyants-expliques+.html>
- [13] Société Volotek: <http://www.volotek.com/renewable-technologies>
- [14] J. Buret-Bahraoui, F.A.Senhaji, S. Ouattar. Appropriate technologies for rural development : Solar Dryers and photovoltaic systems. *Proceedings du séminaire organisé par la FIS et l'IAV Hassan II ; Rabat, Maroc, 24-28 mai 1988.*
- [15] <http://www.scribd.com/doc/17231970/Module-solaire-photovoltaique>
- [16] www.eabbatus.nl (cf. bas de la page)
- [17] A. Mehdaoui, M. Sadok, S.A. Chikhi et A. Mammeri. Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, 'URERMS'. B.P. 478, Route de Reggane, Adrar, Algérie (Reçu le 13 Juin 2010 – accepté le 25 Décembre 2010). *Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°4 (2010) 571 – 582*

VII. ANNEXE

VII.1. ANNEXE 1 : MESURES SUR LE DEPOT DE POUSSIERE SUR LA SURFACE DES MODULES PV

Heure	Module A à 15° Nettoyé					Module B à 15° (Non Nettoyé)					Gain d'Energie (Wh)	
	Ensoleillement (w/m2)	Tension en circuit ouvert (V)	Courant de court-circuit (A)	Puissance (W)	Energie	Ensoleillement (w/m2)	Tension en circuit ouvert (V)	Courant de court-circuit (A)	Puissance (W)	Energie		
05/05/2011	8 H	376	18,58	3,15	58,527	117,054	376	18,49	3,07	56,7643	113,5286	3,5254
	10 H	690	19,17	6,15	117,8955	235,791	690	19,21	5,8	111,418	222,836	12,955
	12 H	815	18,72	7,36	137,7792	275,5584	815	18,78	7,13	133,9014	267,8028	7,7556
	14 H	691	18,75	6,13	114,9375	229,875	691	18,61	6,15	114,4515	228,903	0,972
	16 H	360	18,57	2,97	55,1529	110,3058	360	18,46	3,07	56,6722	113,3444	-3,0386
	Puissance Moyenne				96,85842	774,86736	Puissance Moyenne				94,64148	757,13184
06/05/2011	8 H	430	18,69	2,11	39,4359	78,8718	430	18,27	2	36,54	73,08	5,7918
	10 H	660	19,29	6,1	117,669	235,338	660	19,29	6	115,74	231,48	3,858
	12 H	788	18,95	7,37	139,6615	279,323	788	18,9	7,16	135,324	270,648	8,675
	14 H	780	19,17	6,53	125,1801	250,3602	780	19,09	6,27	119,6943	239,3886	10,9716
	16 H	162	18,16	1,4	25,424	50,848	162	17,98	1,37	24,6326	49,2652	1,5828
	Puissance Moyenne				89,4741	715,7928	Puissance Moyenne				86,38618	691,08944
07/05/2011	8 H	580	18,92	2,52	47,6784	95,3568	580	18,6	2,39	44,454	88,908	6,4488
	10 H	720	18,85	6,49	122,3365	244,673	720	18,86	6,14	115,8004	231,6008	13,0722
	12 H	511	18,86	4,57	86,1902	172,3804	511	18,89	4,37	82,5493	165,0986	7,2818
	14 H	595	18,63	5,97	111,2211	222,4422	595	18,58	5,05	93,829	187,658	34,7842
	16 H	293	18,47	2,35	43,4045	86,809	293	18,32	2,27	41,5864	83,1728	3,6362
	Puissance Moyenne				82,16614	657,32912	Puissance Moyenne				75,64382	605,15056

	Heure	Module A à 15° Nettoyé					Module B à 15° (Non Nettoyé)					Gain d'Energie (Wh)
		Eclairement (w/m2)	Tension en circuit ouvert (V)	Courant de court-circuit (A)	Puissance (W)	Energie	Eclairement (w/m2)	Tension en circuit ouvert (V)	Courant de court-circuit (A)	Puissance (W)	Energie	
09/05/2011	8 H	230	18,43	0,98	18,0614	36,1228	230	18,07	0,92	16,6244	33,2488	2,874
	10 H	579	19,61	5,02	98,4422	196,8844	579	19,57	4,64	90,8048	181,6096	15,2748
	12 H	755	19,52	6,62	129,2224	258,4448	755	19,49	6,15	119,8635	239,727	18,7178
	14 H	647	19,23	5,6	107,688	215,376	647	19,18	5,13	98,3934	196,7868	18,5892
	16 H	360	19,06	2,98	56,7988	113,5976	360	18,91	2,78	52,5698	105,1396	8,458
	Puissance Moyenne				82,04256	656,34048	Puissance Moyenne				75,65118	605,20944
10/05/2011	8 H	480	18,9	4,01	75,789	151,578	480	18,74	3,78	70,8372	141,6744	9,9036
	10 H	630	19,42	5,74	111,4708	222,9416	630	19,36	5,53	107,0608	214,1216	8,82
	12 H	815	19,07	7,36	140,3552	280,7104	815	19,06	7,07	134,7542	269,5084	11,202
	14 H	627	18,93	5,57	105,4401	210,8802	627	18,9	5,41	102,249	204,498	6,3822
	16 H	310	18,68	2,56	47,8208	95,6416	310	18,58	2,52	46,8216	93,6432	1,9984
	Puissance Moyenne				96,17518	769,40144	Puissance Moyenne				92,34456	738,75648
11/05/2011	8 H	500	18,62	4,21	78,3902	156,7804	500	18,54	4,06	75,2724	150,5448	6,2356
	10 H	774	18,98	7,03	133,4294	266,8588	774	18,98	6,56	124,5088	249,0176	17,8412
	12 H	818	18,75	7,37	138,1875	276,375	818	18,7	6,85	128,095	256,19	20,185
	14 H	678	18,73	6,01	112,5673	225,1346	678	18,73	5,8	108,634	217,268	7,8666
	16 H	337	18,63	2,68	49,9284	99,8568	337	18,18	2,59	47,0862	94,1724	5,6844
	Puissance Moyenne				102,50056	820,00448	Puissance Moyenne				96,71928	773,75424

	Heure	Module A à 15° Nettoyé					Module B à 15° (Non Nettoyé)					Gain d'Energie (Wh)
		Eclairement (w/m2)	Tension en circuit ouvert (V)	Courant de court-circuit (A)	Puissance (W)	Energie	Eclairement (w/m2)	Tension en circuit ouvert (V)	Courant de court-circuit (A)	Puissance (W)	Energie	
12/05/2011	8 H	640	19,36	5,65	109,384	218,768	640	19,42	5,49	106,6158	213,2316	5,5364
	10 H	825	19,19	7,25	139,1275	278,255	825	19,39	6,73	130,4947	260,9894	17,2656
	12 H	773	18,83	6,83	128,6089	257,2178	773	18,7	6,52	121,924	243,848	13,3698
	14 H	565	18,88	4,87	91,9456	183,8912	565	18,73	4,71	88,2183	176,4366	7,4546
	16 H	173	18,25	0,69	12,5925	25,185	173	17,85	0,68	12,138	24,276	0,909
	Puissance Moyenne				96,3317	770,6536	Puissance Moyenne				91,87816	735,02528
13/05/2011	8 H	626	19,03	5,52	105,0456	210,0912	626	19,07	5,3	101,071	202,142	7,9492
	10 H	690	19,35	6,09	117,8415	235,683	690	19,29	5,42	104,5518	209,1036	26,5794
	12 H	397	19,07	3,58	68,2706	136,5412	397	19,01	3,37	64,0637	128,1274	8,4138
	14 H	373	18,98	3,21	60,9258	121,8516	373	18,88	3,02	57,0176	114,0352	7,8164
	16 H	177	18,41	1,32	24,3012	48,6024	177	18,21	1,23	22,3983	44,7966	3,8058
	Puissance Moyenne				75,27694	602,21552	Puissance Moyenne				69,82048	558,56384

	Heure	Module A à 15° Nettoyé					Module B à 15° (Non Nettoyé)					Gain d'Energie (Wh)
		Eclairement (w/m2)	Tension en circuit ouvert (V)	Courant de court-circuit (A)	Puissance (W)	Energie	Eclairement (w/m2)	Tension en circuit ouvert (V)	Courant de court-circuit (A)	Puissance (W)	Energie	
16/05/2011	8 H	640	19,48	5,83	113,5684	227,1368	640	19,5	5,65	110,175	220,35	6,7868
	10 H	646	19,24	5,88	113,1312	226,2624	646	19,2	5,49	105,408	210,816	15,4464
	12 H	768	18,94	6,98	132,2012	264,4024	768	18,94	6,69	126,7086	253,4172	10,9852
	14 H	646	18,52	5,81	107,6012	215,2024	646	18,41	5,46	100,5186	201,0372	14,1652
	16 H	240	18,3	2,48	45,384	90,768	240	18,07	2,22	40,1154	80,2308	10,5372
	Puissance Moyenne				102,3772	819,0176	Puissance Moyenne				96,58512	772,68096
17/05/2011	8 H	680	19,09	6,09	116,2581	232,5162	680	19,04	5,72	108,9088	217,8176	14,6986
	10 H	571	19,15	5,2	99,58	199,16	571	19,14	4,77	91,2978	182,5956	16,5644
	12 H	565	18,91	5,07	95,8737	191,7474	565	18,8	4,72	88,736	177,472	14,2754
	14 H	497	18,71	4,35	81,3885	162,777	497	18,57	4,05	75,2085	150,417	12,36
	16 H	276	18,48	2,41	44,5368	89,0736	276	18,34	2,16	39,6144	79,2288	9,8448
	Puissance Moyenne				87,52742	700,21936	Puissance Moyenne				80,7531	646,0248
18/05/2011	8 H	441	19,48	3,82	74,4136	148,8272	441	19,37	3,18	61,5966	123,1932	25,634
	10 H	727	19,1	6,66	127,206	254,412	727	19,06	6,04	115,1224	230,2448	24,1672
	12 H	787	18,62	7,03	130,8986	261,7972	787	18,55	6,59	122,2445	244,489	17,3082
	14 H	625	18,5	5,65	104,525	209,05	625	18,4	5,1	93,84	187,68	21,37
	16 H	370	18,49	2,98	55,1002	110,2004	370	18,32	2,77	50,7464	101,4928	8,7076
	Puissance Moyenne				98,42868	787,42944	Puissance Moyenne				88,70998	709,67984

Heure	Module A à 15° Nettoyé					Module B à 15° (Non Nettoyé)					Gain d'Energie (Wh)	
	Eclairement (w/m ²)	Tension en circuit ouvert (V)	Courant de court-circuit (A)	Puissance (W)	Energie	Eclairement (w/m ²)	Tension en circuit ouvert (V)	Courant de court-circuit (A)	Puissance (W)	Energie		
19/05/2011	8 H	647	19,23	5,62	108,0726	216,1452	647	19,19	5,15	98,8285	197,657	18,4882
	10 H	755	19,5	6,65	129,675	259,35	755	19,53	6,15	120,1095	240,219	19,131
	12 H	768	18,94	6,98	132,2012	264,4024	768	18,94	6,69	126,7086	253,4172	10,9852
	14 H	646	18,52	5,81	107,6012	215,2024	646	18,41	5,46	100,5186	201,0372	14,1652
	16 H	360	19,06	2,98	56,7988	113,5976	360	18,91	2,78	52,5698	105,1396	8,458
	Puissance Moyenne				106,86976	854,95808	Puissance Moyenne				99,747	797,976
20/05/2011	8 H	700	18,84	6,93	130,5612	261,1224	700	18,86	6,14	115,8004	231,6008	29,5216
	10 H	595	18,63	5,6	104,328	208,656	595	18,58	5,09	94,5722	189,1444	19,5116
	12 H	757	18,36	6,88	126,3168	252,6336	757	18,33	6,26	114,7458	229,4916	23,142
	14 H	815	18,82	7,31	137,5742	275,1484	815	18,78	6,56	123,1968	246,3936	28,7548
	16 H	500	18,21	5,09	92,6889	185,3778	500	18,54	4	74,16	148,32	37,0578
	Puissance Moyenne				118,29382	946,35056	Puissance Moyenne				104,49504	835,96032
21/05/2011	8 H	466	18,57	4,63	85,9791	171,9582	466	18,52	4,06	75,1912	150,3824	21,5758
	10 H	640	19,36	6,28	121,5808	243,1616	640	19,42	5,49	106,6158	213,2316	29,93
	12 H	787	18,62	7,03	130,8986	261,7972	787	18,55	6,59	122,2445	244,489	17,3082
	14 H	625	18,5	5,65	104,525	209,05	625	18,4	5,1	93,84	187,68	21,37
	16 H	500	18,62	4,84	90,1208	180,2416	500	18,54	4,06	75,2724	150,5448	29,6968
	Puissance Moyenne				106,62086	852,96688	Puissance Moyenne				94,63278	757,06224

VII.2. ANNEXE 2 : MESURES SUR LES INCLINAISONS DES MODULES PV

	Heure	Module A à 15°				Module B à 0°			
		Ensoleillement (w/m2)	Tension en circuit ouvert (V)	Courant de court-circuit (A)	Puissance	Ensoleillement (w/m2)	Tension en circuit ouvert (V)	Courant de court-circuit (A)	Puissance
05/05/2011	8 H	450	18,99	1,85	35,1315	450	18,27	1,98	36,1746
	10 H	675	19,29	3,06	59,0274	675	18,88	3,04	57,3952
	12 H	845	18,81	3,59	67,5279	845	18,35	3,57	65,5095
	14 H	696	18,8	2,87	53,956	696	18,23	3,11	56,6953
	16 H	419	18,58	1,49	27,6842	419	18,15	1,55	28,1325
	Puissance Moyenne				49	Puissance Moyenne			
06/05/2011	8 H	265	18,43	1,06	19,5358	265	17,75	1,05	18,6375
	10 H	695	19,37	3	58,11	695	18,65	2,98	55,577
	12 H	840	19,21	3,7	71,077	840	18,72	3,72	69,6384
	14 H	725	18,64	3,16	58,9024	725	18,04	3,22	58,0888
	16 H	157	18,08	0,67	12,1136	157	17,55	0,63	11,0565
	Puissance Moyenne				44	Puissance Moyenne			
07/05/2011	8 H	500	18,96	1,89	35,8344	500	18,11	1,7	30,787
	10 H	700	18,93	3,23	61,1439	700	18,8	2,99	56,212
	12 H	630	18,77	2,68	50,3036	630	18,98	2,82	53,5236
	14 H	560	18,57	2,64	49,0248	560	18,32	2,39	43,7848
	16 H	355	18,68	1,68	31,3824	355	18,27	1,39	25,3953
	Puissance Moyenne				46	Puissance Moyenne			

	Heure	Module A à 15°				Module B à 5°			
		Ensoleillement (w/m2)	Tension en circuit ouvert (V)	Courant de court-circuit (A)	Puissance	Ensoleillement (w/m2)	Tension en circuit ouvert (V)	Courant de court-circuit (A)	Puissance
09/05/2011	8 H	250	18,98	1,13	21,4474	250	19,33	1,22	23,5826
	10 H	449	19,65	2,22	43,623	449	19,15	2,21	42,3215
	12 H	739	19,46	3,2	62,272	739	18,73	3,16	59,1868
	14 H	640	19,27	2,76	53,1852	640	18,77	2,7	50,679
	16 H	380	19,01	1,47	27,9447	380	18,58	1,44	26,7552
	Puissance Moyenne				42	Puissance Moyenne			
10/05/2011	8 H	600	18,48	2,42	44,7216	600	18,87	2,63	49,6281
	10 H	655	19,54	2,88	56,2752	655	18,98	2,95	55,991
	12 H	810	19,03	3,58	68,1274	810	18,5	3,58	66,23
	14 H	660	18,93	2,75	52,0575	660	18,41	2,77	50,9957
	16 H	350	18,83	1,4	26,362	350	18,39	1,44	26,4816
	Puissance Moyenne				50	Puissance Moyenne			
11/05/2011	8 H	500	19,21	2,78	53,4038	500	18,75	2,74	51,375
	10 H	761	19,04	3,36	63,9744	761	18,54	3,4	63,036
	12 H	811	18,8	3,58	67,304	811	18,32	3,63	66,5016
	14 H	653	18,8	2,99	56,212	653	18,27	3,05	55,7235
	16 H	354	18,77	1,44	27,0288	354	18,39	1,49	27,4011
	Puissance Moyenne				54	Puissance Moyenne			

	Heure	Module A à 15°				Module B à 10°			
		Ensoleillement (w/m2)	Tension en circuit ouvert (V)	Courant de court-circuit (A)	Puissance	Ensoleillement (w/m2)	Tension en circuit ouvert (V)	Courant de court-circuit (A)	Puissance
12/05/2011	8 H	600	19,41	2,82	54,7362	600	19,08	2,77	52,8516
	10 H	810	19,22	3,56	68,4232	810	18,86	3,58	67,5188
	12 H	750	18,85	3,34	62,959	750	18,42	3,31	60,9702
	14 H	479	18,52	2,04	37,7808	479	18,12	2,03	36,7836
	16 H	145	18,2	1,24	22,568	145	17,95	1,21	21,7195
	Puissance Moyenne				49	Puissance Moyenne			
13/05/2011	8 H	580	18,92	2,52	47,6784	580	18,6	2,39	44,454
	10 H	659	19,36	2,72	52,6592	659	18,94	2,79	52,8426
	12 H	404	18,66	1,96	36,5736	404	18,27	1,94	35,4438
	14 H	340	18,73	1,44	26,9712	340	18,37	1,43	26,2691
	16 H	191	18,48	0,69	12,7512	191	18,16	0,7	12,712
	Puissance Moyenne				35	Puissance Moyenne			

	Heure	Module A à 15°				Module B à 15°			
		Ensoleillement (w/m2)	Tension en circuit ouvert (V)	Courant de court-circuit (A)	Puissance	Ensoleillement (w/m2)	Tension en circuit ouvert (V)	Courant de court-circuit (A)	Puissance
16/05/2011	8 H	600	18,89	2,59	48,9251	600	19,39	2,55	49,4445
	10 H	625	18,8	2,89	54,332	625	19,08	2,85	54,378
	12 H	758	18,8	3,37	63,356	758	18,72	3,31	61,9632
	14 H	628	18,33	2,78	50,9574	628	18,31	2,76	50,5356
	16 H	326	18,27	1,31	23,9337	326	18,18	1,29	23,4522
	Puissance Moyenne				48	Puissance Moyenne			
17/05/2011	8 H	660	18,92	2,9	54,868	660	18,9	2,8	52,92
	10 H	563	18,83	2,42	45,5686	563	18,74	2,4	44,976
	12 H	590	18,18	2,56	46,5408	590	18,82	2,54	47,8028
	14 H	556	18,5	2,37	43,845	556	18,47	2,35	43,4045
	16 H	348	18,52	1,55	28,706	348	18,54	1,54	28,5516
	Puissance Moyenne				44	Puissance Moyenne			

	Heure	Module A à 15°				Module B à 20°			
		Ensoleillement (w/m2)	Tension en circuit ouvert (V)	Courant de court-circuit (A)	Puissance	Ensoleillement (w/m2)	Tension en circuit ouvert (V)	Courant de court-circuit (A)	Puissance
18/05/2011	8 H	403	19,71	1,59	31,3389	403	19,36	1,58	30,5888
	10 H	631	19,38	2,71	52,5198	631	19,01	2,57	48,8557
	12 H	753	19,04	3,26	62,0704	753	18,72	3,13	58,5936
	14 H	499	18,99	2	37,98	499	18,7	2,01	37,587
	16 H	345	18,72	1,41	26,3952	345	18,33	1,34	24,5622
	Puissance Moyenne				42	Puissance Moyenne			
19/05/2011	8 H	425	19,6	1,77	34,692	425	19,22	1,66	31,9052
	10 H	720	19,15	2,78	53,237	720	18,89	3,02	57,0478
	12 H	775	18,6	3,43	63,798	775	18,3	3,29	60,207
	14 H	650	18,53	2,77	51,3281	650	18,17	2,6	47,242
	16 H	436	18,47	1,48	27,3356	436	18,09	1,38	24,9642
	Puissance Moyenne				46	Puissance Moyenne			

	Heure	Module A à 15°				Module B à 12°			
		Ensoleillement (w/m2)	Tension en circuit ouvert (V)	Courant de court-circuit (A)	Puissance	Ensoleillement (w/m2)	Tension en circuit ouvert (V)	Courant de court-circuit (A)	Puissance
20/05/2011	8 H	200	19,18	0,67	12,8506	200	18,89	0,51	9,6339
	10 H	425	19,19	1,48	28,4012	425	18,85	1,32	24,882
	12 H	790	19,01	3,51	66,7251	790	18,66	3,48	64,9368
	14 H	718	18,82	3,14	59,0948	718	18,47	3,14	57,9958
	16 H	171	18,12	0,6	10,872	171	17,78	0,64	11,3792
	Puissance Moyenne				36	Puissance Moyenne			
21/05/2011	8 H	330	19,53	1,39	27,1467	330	19,24	1,36	26,1664
	10 H	557	19,16	2,41	46,1756	557	18,79	2,39	44,9081
	12 H	568	19,1	2,51	47,941	568	18,78	2,45	46,011
	14 H	576	19,05	2,6	49,53	576	18,75	2,56	48
	16 H	177	18,35	0,66	12,111	177	18,03	0,68	12,2604
	Puissance Moyenne				37	Puissance Moyenne			
22/05/2011	8 H	338	19,54	1,43	27,9422	338	19,2	1,38	26,496
	10 H	662	19,31	2,92	56,3852	662	18,94	2,86	54,1684
	12 H	775	19,15	3,42	65,493	775	18,81	3,38	63,5778
	14 H	590	18,8	2,63	49,444	590	18,43	2,61	48,1023
	16 H	341	18,76	1,31	24,5756	341	18,44	1,4	25,816
	Puissance Moyenne				45	Puissance Moyenne			