



**MISE EN PLACE ET EXECUTION D'UN PROTOCOLE
D'ETUDE ET DE SUIVI DU NETTOYAGE DE MODULES
PHOTOVOLTAÏQUES EN ZONE TRES POUSSIEREUSE :
CAS DE LA REGION SOUDANO-SAHELIENNE**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER GENIE ELECTRIQUE ENERGETIQUE ET ENERGIE
RENOUVELABLE
OPTION : GENIE ENERGETIQUE**

Présenté et soutenu publiquement le 28 Octobre 2015 par :

Naïbi Frederick DJEMENDA

Travaux dirigés par:

Dr. Moussa SORO

Enseignant-Chercheur au Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie

Ing. Alain TOSSA

Doctorant au Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie.

Ing. Moussa KADRI

Assistant-Enseignant au Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie.

LABORATOIRE ENERGIE SOLAIRE ET ECONOMIE D'ENERGIE(LESEE),

2iE, Ouagadougou, Burkina Faso

Jury d'évaluation du stage :

Président : **Dr. Daniel YAMEGUEU**

Membres et correcteurs : **Ing. Alain TOSSA**

Ing. Madieumbe GAYE

Promotion [2014/2015]

DEDICACES

A mon très cher papa NAÏBI Marcel,
A ma très chère mère feu TOGNODJI Berthe.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce stage, il est de mon devoir de remercier tous ceux qui ont œuvré d'une manière ou d'une autre à la réalisation de ce document. Je veux réaffirmer ma gratitude :

Au **Dr. Daniel YAMEGUEU**, Chef du Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE) de m'avoir retenu pour ce sujet de stage, ses idées et ses conseils ont été enrichissants pour l'aboutissement de ce mémoire.

Je remercie également mes encadreurs directs de stage : **Dr. Moussa SORO**, **Ing. Alain TOSSA** et **Ing. Moussa KADRI**. Je tiens à les remercier pour leurs conseils, soutiens et encouragements durant ce moment de stage.

Je remercie tous les membres du jury pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon profond respect.

Je n'oublie pas de remercier le personnel du Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie pour leur disponibilité à mes nombreuses sollicitudes. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma très vive reconnaissance.

J'adresse mes remerciements aux enseignants et à tous ceux qui ont contribué à ma formation de près ou de loin ces dernières années, et à tous ceux qui m'ont accompagné amis et proches sans oublier tous mes camarades de classe.

Enfin, je suis reconnaissant envers mes frères, mes sœurs, tous mes cousins et cousines restés au Tchad et qui ont été une source constante d'encouragement, de soutien et de joie.

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

P_{moy}: Puissance moyenne journalière

E_{moy}: Energie moyenne journalière

E_{SUN020 moy} : Energie moyenne totale produite par le module SUN020

E_{SUN021 moy}: Energie moyenne totale produite par le module SUN021

E_{SUN022 moy}: Energie moyenne totale produite par le module SUN022

E_{SUN023 moy}: Energie moyenne totale produite par le module SUN023

E_{SUN024 moy}: Energie moyenne totale produite par le module SUN024

GE_{SUN020}: Gain énergétique du module SUN020

GE_{SUN021}: Gain énergétique du module SUN021

GE_{SUN022}: Gain énergétique du module SUN022

GE_{SUN023}: Gain énergétique du module SUN023

GEM_{SUN020}: Gain énergétique moyen du module SUN020

GEM_{SUN021}: Gain énergétique moyen du module SUN021

GEM_{SUN022}: Gain énergétique moyen du module SUN022

GEM_{SUN023}: Gain énergétique moyen du module SUN023

RESUME

L'objectif de ce mémoire de fin d'étude est la mise en place et l'exécution d'un protocole d'étude et de suivi du nettoyage des modules photovoltaïques en zone très poussiéreuse. Après une étude bibliographique sur les salissures des modules PV en zone soudano-sahélienne et les différentes méthodes de nettoyage de modules PV, nous avons opté pour le nettoyage à eau avec une éponge et le nettoyage à sec avec une éponge.

Comparés au module non-nettoyé, les résultats des analyses de nettoyage à eau avec éponge montrent que, le nettoyage journalier à eau confère un gain énergétique moyen mensuel de **1523,40Wh/m²/mois** tandis que le nettoyage hebdomadaire à eau avec éponge confère un gain énergétique moyen mensuel de **1343,88Wh/m²/mois**.

Par ailleurs, les résultats des analyses de nettoyage à sec avec éponge révèlent que, le gain énergétique moyen mensuel de nettoyage journalier à sec avec éponge est de **1401,30Wh/m²/mois**, tandis que, celui de nettoyage hebdomadaire à sec avec éponge s'élève à **1330,20Wh/m²/mois**.

Sur la base des gains énergétiques obtenus, nous avons constaté que le nettoyage journalier à eau avec éponge est plus performant que les autres fréquences de nettoyages de modules.

Mots clé : Performance de module PV, influence de la poussière, nettoyage de modules PV

ABSTRACT

The aim of this report is to design a survey protocol to study the impact of cleaning on photovoltaic panels in dusty areas. In this purpose, we first studied the soiling of the photovoltaic modules and the different methods used to clean these panels. Then, we decided to check over two different techniques of cleaning. The first one is the dry cleaning with a sponge and the second one is the sponging down (with water).

The analysis of the sponging down shows that a daily cleaning is more efficient than a weekly cleaning. In fact, we obtained an average energy production of **1523.40Wh/m²/month** by sponging down daily while the average energy production is around **1343.88Wh/m²/month** when the photovoltaic panels are sponged down weekly.

Likewise, the study of the dry cleaning with a sponge proves that a weekly cleaning is less efficient than a daily cleaning. The average energy production is **1330.20Wh/m²/month** when the modules are cleaned weekly while the average energy production obtained by cleaning the panels daily is about **1401.30Wh/m²/month**.

All things considered, we can infer that compared with the other methods, the photovoltaic panels show best results while they are sponged down daily.

Key words: PV module performance, influence of dust, cleaning of PV modules

SOMMAIRE

DEDICACES	I
REMERCIEMENTS	II
LISTE DES ABREVIATIONS	III
RESUME	IV
ABSTRACT	V
SOMMAIRE	1
LISTE DES TABLEAUX	3
LISTE DES FIGURES	4
I- INTRODUCTION.....	5
I.1 CONTEXTE DE L'ETUDE.....	5
I.2 OBJECTIFS DE L'ETUDE	6
I.3 PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL.....	6
II- ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	8
II.1 SALISSURES DES MODULES PV EN ZONE SOUDANO-SAHELIEENNE	8
II.1.1 Déchets d'oiseaux.....	8
II.1.2 Copeaux de bois.....	8
II.1.3 La poussière.....	9
II.2 TYPES DE NETTOYAGE DES MODULES PV	9
II.2.1 Nettoyage naturel de module PV	9
II.2.2 Nettoyage mécanique des modules PV	10
II.2.3 Nettoyage des modules PV par injection d'eau	11
II.2.4 Nettoyage électrostatique des modules PV.....	11
II.2.5 Nettoyage des modules PV à l'eau simple à l'aide de chiffon	12
II.2.6 Nettoyage des modules PV avec le dioxyde de titane	12
II.2.7 Nettoyage des modules photovoltaïques à l'eau et au détergent	14
II.2.8 Nettoyage des modules PV à l'aide d'un robot	15
II.3 METHODES D'ETUDE DES PERFORMANCES DES MODULES PV	16
II.3.1 Méthode de Jonathan Leloux	16
II.3.2 Méthode de S.Mekhilef	16
II.3.3 Méthode Mother PV.....	16
II.3.4 Méthode de G KACI	17
II.3.5 Méthode de M Piliougine	17
III- MATERIEL ET METHODOLOGIE DE TRAVAIL.....	19
III.1 MATERIEL	19
II.1.1 Plateforme expérimentale.....	19
III.2 METHODOLOGIE DE TRAVAIL.....	22
IV- PROTOCOLE DE SUIVI DU NETTOYAGE DES MODULES PV	23
V- ETUDE EXPERIMENTALE DE L'INFLUENCE DE LA POUSSIERE SUR LES PERFORMANCES DES MODULES..	24
V.1 CHOIX DE LA METHODE D'ANALYSE	25
V.1.1 Puissance moyenne journalière.....	25

Mise en place et exécution d'un protocole d'étude et de suivi du nettoyage de modules photovoltaïques en zone très poussiéreuse : cas de la région soudano-sahélienne

V.1.2	<i>Ratios des puissances moyennes journalières</i>	25
V.1.3	<i>Energie moyenne journalière</i>	25
V.2	RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	25
V.2.1	<i>Etude comparative des cinq modules le premier jour de l'installation</i>	25
V.3	NETTOYAGE A EAU AVEC EPONGE	27
V.3.1	<i>Influence du dépôt de la poussière sur la puissance maximale des modules</i>	28
V.3.2	<i>Influence du dépôt de la poussière sur la production énergétique des modules</i>	29
V.3.3	<i>Gain énergétique du nettoyage à eau avec éponge</i>	31
V.4	NETTOYAGE A SEC AVEC EPONGE	32
V.4.1	<i>Influence du dépôt de la poussière sur la puissance maximale des modules</i>	32
V.4.2	<i>Influence du dépôt de la poussière sur la production énergétique des modules</i>	35
V.4.3	<i>Gain énergétique de nettoyage à sec avec éponge</i>	36
VI-	CONCLUSION	38
VII-	RECOMMANDATIONS	39
VIII-	BIBLIOGRAPHIE	40
IX-	ANNEXES	42
IX.1	ANNEXE 1 : PROTOCOLE DE SUIVI DU NETTOYAGE DES MODULES PV	42
IX.2	ANNEXE 2 : PUISSANCE MOYENNE JOURNALIERE DE NETTOYAGE A EAU AVEC EPONGE.....	43
IX.3	ANNEXE 3 : ENERGIE MOYENNE JOURNALIERE DE NETTOYAGE A EAU AVEC EPONGE	45
IX.4	ANNEXE 4 : PUISSANCE MOYENNE JOURNALIERE DE NETTOYAGE A SEC AVEC EPONGE	47
IX.5	ANNEXE 5 : ENERGIE MOYENNE JOURNALIERE DE NETTOYAGE A SEC AVEC EPONGE.....	49

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques électriques STC des modules..... 24
Tableau 2 : Valeurs moyennes mesurées des paramètres électriques (I_{sc} , V_{oc} , P_{mp}) des cinq modules au début de l'étude (Jour 1) 26
Tableau 3 : Moyenne des paramètres électriques mesurés le jour 1 et corrigés en température 27
Tableau 4 : Energie moyenne totale de nettoyage à eau avec éponge 31
Tableau 5 : Energie moyenne totale de nettoyage à sec avec éponge 36

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Déchets d'oiseaux sur le module PV [1]	8
Figure 2 : Nid d'oiseaux sur les modules PV[2]	8
Figure 3 : Poussière naturelle sur les modules PV en Egypte[7]	9
Figure 4 : Appareil pour le nettoyage mécanique des modules PV[9].....	10
Figure 5 : Nettoyage des modules PV par injection d'eau[9].....	11
Figure 6 : Nettoyage de module PV avec photocal SC[11]	14
Figure 7 : Plateforme de nettoyage des modules PV à l'eau et au détergent[7].....	14
Figure 8 : Modules à caractériser par le banc I-V sur le site du 2iE	19
Figure 9 : Pyranomètre de type KIPP & ZONEN CM 11/14.....	20
Figure 10 : Sonde de température Pt100	20
Figure 11 : Armoire des charges résistives	20
Figure 12 : Armoire de brassage	21
Figure 13 : Multimètre Agilent 34410A/11A	21
Figure 14 : Composante interne du banc I-V	22
Figure 15 : Evolution de la puissance moyenne journalière des modules nettoyés à l'eau.	28
Figure 16 : Evolution de ratios de puissance moyenne journalière de nettoyage à l'eau.	29
Figure 17 : Evolution de l'énergie moyenne journalière de nettoyage à eau.	30
Figure 18 : Evolution de la puissance moyenne journalière de nettoyage à sec.	33
Figure 19 : Evolution de ratios de puissance moyenne journalière de nettoyage à sec.	34
Figure 20 : Evolution de l'énergie moyenne journalière de nettoyage à sec	35

I- INTRODUCTION

I.1 CONTEXTE DE L'ETUDE

Depuis de nombreuses années l'humanité fait face à une forte demande en énergie. Celle-ci, n'est que la conséquence directe de la croissance démographique mondiale et la mutation progressive de nombreuses économies primaires (basées sur l'agriculture), vers des économies secondaires (basées sur l'industrie), entraînant une raréfaction des ressources naturelles utilisées pour répondre à ce besoin. Une très grande partie de ces ressources sont aujourd'hui fossiles : pétrole, charbon, gaz naturel. Bien que diversifiées et très abondantes, ces ressources, ne sont pas inépuisables.

L'insécurité énergétique à long terme des pays du monde, n'est pas le seul péril que fait encourir le recours aux énergies fossiles. Leur utilisation génère considérablement du dioxyde de carbone et des gaz en partie responsables de l'effet de serre. Cet effet de serre met en péril de nombreuses populations de par le monde et la stabilité géopolitique même de certaines régions du globe pourrait être mise à mal par des phénomènes climatiques majeurs.

Pour répondre à ces préoccupations, les états mettent en place des politiques incitant à l'économie de l'énergie, mais aussi à la production d'énergie grâce à d'autres moyens souvent qualifiés de « propres » en référence au fait qu'ils ne génèrent pas de dioxyde de carbone. Ces moyens de production sont principalement issus des énergies renouvelables, c'est-à-dire les ressources sont inépuisables. Parmi celles-ci on peut citer l'énergie éolienne (vent), marémotrice (des vagues et des mouvements des marées) ou encore l'énergie solaire (soleil). On distingue principalement le solaire thermique et le solaire photovoltaïque (PV). Le solaire photovoltaïque qui nous intéresse ici résulte de la transformation direct de la lumière du soleil en électricité, sans intermédiaire, grâce à un matériau semi-conducteur. Le silicium cristallin reste le semi-conducteur dominant dans la fabrication des modules PV.

Les applications de l'énergie solaire d'origine photovoltaïque se sont multipliées de manière vertigineuse dans le monde et en particulier dans la zone soudano-sahélienne qui dispose d'un grand gisement de l'ensoleillement et une grande superficie pour l'exploitation de ce dernier. Malheureusement, la zone soudano-sahélienne à l'instar du Burkina Faso est une zone à fort taux de poussière de type minéralogique qui encrasse facilement les verres des modules PV et qui à long terme induit la dégradation des performances électriques desdits modules [1,2]. De plus, la zone soudano-sahélienne a une courte saison des pluies, la raison pour laquelle l'eau

Mise en place et exécution d'un protocole d'étude et de suivi du nettoyage de modules photovoltaïques en zone très poussiéreuse : cas de la région soudano-sahélienne

qui est le moyen le plus efficace pour le nettoyage des modules PV devient une denrée rare dans cette localité.

Pour appréhender la dégradation des performances électriques des modules PV en milieu naturel dans la zone soudano-sahélienne soumis à l'accumulation des salissures, le Laboratoire Energie Solaire et Economies d'Energie (LESEE) de 2iE, dispose d'un banc expérimental de caractérisation de mesure I-V installé sur son site de Kamboinsé.

I.2 OBJECTIFS DE L'ETUDE

L'objectif global de cette étude est la mise en place et l'exécution d'un protocole d'étude et de suivi du nettoyage de modules photovoltaïques en zone très poussiéreuse.

Au regard de l'objectif global ci-dessus, les objectifs spécifiques ci-après peuvent être dégagés:

- ✚ Mettre en place un protocole de suivi de nettoyage des modules PV en zone soudano-sahélienne;
- ✚ Déterminer la périodicité (journalière et hebdomadaire) de nettoyage à eau et de nettoyage à sec des modules;
- ✚ Analyser la dégradation des performances électriques des modules soumis à l'accumulation de salissures en milieu naturel dans la zone soudano-sahélienne.

I.3 PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL

Le Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE) situé sur le site de 2iE Kamboinsé à environ 15 kilomètres du centre-ville d'Ouagadougou, fait partie des cinq laboratoires de recherche de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et l'Environnement (2iE).

Créé en novembre 2008, le LESEE est actuellement dirigé par le **Dr. Daniel YAMEGUEU**.

Le laboratoire est composé de :

- ✚ Cinq enseignants-chercheurs,
- ✚ Six doctorants,
- ✚ Sept ingénieurs de recherches.

Le LESEE a pour objectif de contribuer à l'innovation industrielle dans le domaine du solaire pour une production et une utilisation rationnelle de l'énergie électrique, mécanique, et thermique en Afrique surtout en zones rurales et périurbaines. Le LESEE exerce ses activités à travers deux axes de recherche :

Mise en place et exécution d'un protocole d'étude et de suivi du nettoyage de modules photovoltaïques en zone très poussiéreuse : cas de la région soudano-sahélienne

Axe 1 : Conversion de l'énergie solaire sous environnements chauds et rudes. Cet axe se décompose en trois sous axes de recherche :

- ✚ Systèmes solaires photovoltaïques en milieu hostile;
- ✚ Centrales solaires à concentration (CSP) pour mini réseaux;
- ✚ Habitats solaires.

Axe 2 : Gestion optimale d'énergie durable : production, transport, distribution. Cet axe se décompose en deux sous axes de recherche :

- ✚ L'hybridation des systèmes énergétiques ;
- ✚ L'interaction sources-réseau intelligents-utilisateurs.

Le présent stage s'est déroulé au sein du LESEE du 02 Février 2015 au 02 Juillet 2015.

II- ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

II.1 SALISSURES DES MODULES PV EN ZONE SOUDANO-SAHELIENNE

II.1.1 Déchets d'oiseaux

D'après les expériences menées par **Hassan et al** en milieu soudano-sahélienne, l'accumulation de fientes d'oiseaux sur la surface des modules PV empêche le rayonnement incident d'atteindre les cellules PV [1].

Dans le même ordre d'idées, une équipe scientifique dirigée par **Lisa et al** a montré que, lorsque le dépôt des fientes d'oiseaux n'est pas nettoyé pendant une semaine, celui-ci diminue le rendement et décolore le verre des modules PV [2].



Figure 1 : Déchets d'oiseaux sur le module PV [1]

II.1.2 Copeaux de bois

Des chercheurs ont montré que la dégradation du rendement du module PV ne dépend pas uniquement de la densité de la poussière cumulée, mais également des copeaux de bois [3]. Les copeaux de bois tels que, les feuillettes mortes, les nids d'oiseaux créent de l'ombre sur la surface des modules et les empêchent de recevoir la totalité de l'ensoleillement.

Une étude menée par **Jan Hermann et al** [3] sur la dégradation des modules PV en milieu désertique a montré que, les nids d'oiseaux sont les véritables causes de rayure de surface de module.



Figure 2 : Nid d'oiseaux sur les modules PV[2]

II.1.3 La poussière

La poussière est une poudre très fine composée de particules de diamètre inférieur à 500 μ m et qui varie d'une localité à une autre en fonction de la nature du sol et de l'activité humaine [5].

II.1.3.1 Types de poussières

✚ les poussières artificielles [6]: Elles sont d'origines non atmosphérique causées par l'activité de l'être humain tels que la construction des routes, la circulation des véhicules.

✚ Les poussières naturelles [6]: Elles sont d'origines atmosphérique et liées au climat.

Les expériences effectuées au Caire en Egypte ont montré que, la poussière a un effet négatif sur la puissance maximale et le courant de court-circuit de module photovoltaïque [7].



Figure 3 : Poussière naturelle sur les modules PV en Egypte[7]

II.2 TYPES DE NETTOYAGE DES MODULES PV

L'encrassement des modules PV par les salissures constituent l'un des problèmes majeurs qui entravent le développement du secteur solaire dans les zones à forte densité de poussière. Face à ce problème, la solution courante consiste à nettoyer les modules PV selon les ressources de nettoyage disponibles sur les sites d'installations des systèmes PV.

II.2.1 Nettoyage naturel de module PV

Le nettoyage naturel de module PV se fait par l'eau de pluie ou la vitesse de vent sur les sites d'installations [5, 8]. Le nettoyage des modules à l'eau de pluie est possible grâce à l'angle d'inclinaison qui facilite le ruissellement de l'eau de pluie en nettoyant les salissures qui sont sur la surface du module PV. Ce type de nettoyage a certes de grands avantages, mais plusieurs inconvénients peuvent toutefois s'en dégager.

II.2.1.1 Avantages

- ✚ Nettoyage facile;
- ✚ Absence de ressources humaines et matérielles ;
- ✚ Favorable pour des régions à forte pluviométrie ;

- ✚ Favorable pour des régions à forte vitesse de vent.

II.2.1.2 Inconvénients

- ✚ Nettoyage saisonnier selon les localités ;
- ✚ Forte accumulation de poussière sur les modules PV à cause de longue période de saison sèche dans la zone soudano-sahélienne très poussiéreuse;
- ✚ Inefficace pour le nettoyage des fientes d'oiseaux, plus le temps sans nettoyage est long ; plus les fientes d'oiseaux dégradent la surface des modules.

II.2.2 Nettoyage mécanique des modules PV

Le nettoyage mécanique de module PV se fait à l'aide d'un pinceau mécanique couplé à un aspirateur de poussière. Le principe de fonctionnement est semblable au système de nettoyage des vitres de véhicule qui emploie l'essuie-glace. Cependant, cette technologie est plus efficace pour le nettoyage de la poussière que pour le nettoyage des fientes d'oiseaux [9].

Enumérons les avantages et inconvénients du nettoyage mécanique des modules PV.

II.2.2.1 Avantages

- ✚ Efficace pour le nettoyage de la poussière naturelle de type minéral;
- ✚ Utile pour le nettoyage de grands champs de modules PV.

II.2.2.2 Inconvénients

- ✚ Coût élevé de maintenance de l'appareil de nettoyage;
- ✚ Main d'œuvre qualifiée nécessaire;
- ✚ Forte consommation d'énergie électrique;
- ✚ Inefficace pour le nettoyage des fientes d'oiseaux;
- ✚ Détérioration du verre des modules PV.



Figure 4 : Appareil pour le nettoyage mécanique des modules PV[9]

II.2.3 Nettoyage des modules PV par injection d'eau

La technique de nettoyage des modules PV par injection d'eau a été développée par des chercheurs en Arabie Saoudite [9]. Le système de nettoyage à l'injection d'eau est constitué d'une pompe qui injecte l'eau directement sur la surface des modules PV et d'une brosse électrique rotative qui à son tour nettoie les salissures se trouvant sur la surface du module. Ce système de nettoyage présente les avantages et inconvénients suivants :

II.2.3.1 Avantages

- ✚ Nettoyage rapide et efficace des fientes d'oiseaux;
- ✚ Moins coûteux dans les régions tempérées.

II.2.3.2 Inconvénients

- ✚ Nécessite une main d'œuvre qualifiée;
- ✚ Utilisation importante de ressources en eau (obstacle dans les zones désertiques);
- ✚ Coût élevé de la maintenance.



Figure 5 : Nettoyage des modules PV par injection d'eau[9]

II.2.4 Nettoyage électrostatique des modules PV

Dans le cadre des recherches spatiales et les recherches en milieu désertique, les Etats Unis d'Amérique ont développé en 1967 par le truchement de la NASA un procédé de nettoyage électrostatique des modules PV [10].

Le nettoyage électrostatique fonctionne à base d'oxyde d'indium et d'étain qui est un matériau transparent, que l'on fixe sur les modules photovoltaïques. L'étain est associé à une série de capteurs qui sont chargés de détecter la présence de poussière et toutes sortes d'impuretés sur la surface des modules PV[11].

Cette technologie de nettoyage présente les avantages et inconvénients ci-dessous :

II.2.4.1 Avantages

- ✚ Absence de rayures sur la face avant des modules PV;
- ✚ Nettoyage automatique des modules PV;
- ✚ Nettoyage efficace dans l'espace et dans les zones désertiques.

II.2.4.2 Inconvénients

- ✚ Coût de maintenance élevé;
- ✚ Nécessite une main d'œuvre qualifiée dans le domaine électronique ;
- ✚ Forte consommation d'énergie.

II.2.5 Nettoyage des modules PV à l'eau simple à l'aide de chiffon

Le nettoyage des modules PV à l'eau simple avec un chiffon est le type de nettoyage le plus facile et certainement le plus répandu dans le monde. Cependant, les études ont montré que ce nettoyage des modules PV n'est efficace que pour les installations photovoltaïques à petite échelle telles que les installations domestiques et les plateformes d'expériences dans les laboratoires de recherches solaires[1,11].

Cette méthode de nettoyage a en effet des avantages et des inconvénients qui sont présentés ci-dessous:

II.2.5.1 Avantages

- ✚ Nettoyage manuel et simple ;
- ✚ Moins coûteux dans les régions tempérées.

II.2.5.2 Inconvénients

- ✚ Pénible pour des champs de grande taille;
- ✚ Utilisation importante des ressources en eau (obstacle dans les zones désertiques) ;
- ✚ Dégradation des modules par apparition de micro-rayures sous l'effet des frottements ;
- ✚ Les modules PV vieillissent plus vite.

II.2.6 Nettoyage des modules PV avec le dioxyde de titane

Le dioxyde de titane est un produit chimique qui permet de nettoyer les modules PV. Il est composé de dioxygène et de titane (TiO_2). C'est un catalyseur qui permet d'augmenter la réaction chimique d'une substance sous l'action des rayons lumineux[10].

II.2.6.1 Propriétés du dioxyde de titane[11]

Le dioxyde de titane a trois propriétés chimiques à savoir:

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. Il est utilisé dans le domaine de l'industrie de peinture.

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

II.2.6.2 Principe de la photocatalyse[11]

Lorsque le dioxyde de titane est exposé à 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 présents à la surface du module PV. Après quelques secondes, un phénomène d'oxydoréduction se produit, dans le but de faciliter la décomposition entière des entités polluantes et qui transformera entièrement le dioxyde de carbone (en très faible quantité), en eau, et en nitrates.

II.2.6.3 Mode d'application du dioxyde de titane[11]

Le nettoyage de modules PV avec le dioxyde de titane se fait manuellement dans un environnement sec via une pompe à haute pression qui permet de pulvériser de manière uniforme le dioxyde de titane sur toute la surface du module PV. Ensuite, pour passer d'une couche à une autre de TiO_2 sur un module PV, il est conseillé d'attendre environ une heure de temps ; juste pour que le processus de la photocatalyse ait lieu.

Cette méthode de nettoyage des modules PV présente des avantages de taille mais aussi des inconvénients majeurs.

II.2.6.4 Avantages

- ✚ Faible coût de maintenance;
- ✚ Empêche l'encrassement des modules PV par les taches blanches causées par la pluie;
- ✚ Favorable pour les régions désertiques;
- ✚ Les modules PV s'auto-nettoient ;
- ✚ Gain en rendement de 5% après 3 mois de fonctionnement[11].

II.2.6.5 Inconvénients

- ✚ La main d'œuvre qualifiée nécessaire ;

Mise en place et exécution d'un protocole d'étude et de suivi du nettoyage de modules photovoltaïques en zone très poussiéreuse : cas de la région soudano-sahélienne

- ✚ Le recours aux nanoparticules de TiO_2 pour la mise en œuvre de la photocatalyse peut présenter des risques sur la santé de l'homme à cause de la toxicité du dioxyde de titane d'après une analyse sanitaire[11].



Figure 6 : Nettoyage de module PV avec photocal SC[11]

II.2.7 Nettoyage des modules photovoltaïques à l'eau et au détergent

L'expérience sur le nettoyage de module PV à l'eau et au détergent a été réalisée dans une université germanique au Caire en Egypte. L'objectif de cette expérience consiste à évaluer le rendement de modules PV nettoyés à l'eau et au détergent pendant 45 jours[7].

La plateforme de cette expérience est constituée de 12 modules monocristallins de 185W (1) ; un tank d'eau en Aluminium qui a une capacité de $0,16\text{m}^3$ (2); une pompe de 0,5cheval qui fait circuler l'eau sur les modules (3); un système d'injection d'eau et de détergent sur les modules (4), un conduit d'injection d'eau sur les modules (5) et enfin un système de collecte de l'eau usée qui sera traitée et réutilisée pour le prochain nettoyage des modules PV (6).



Figure 7 : Plateforme de nettoyage des modules PV à l'eau et au détergent[7]

Le résultat de cette expérience montre que, le nettoyage des modules PV à l'eau et au détergent est inefficace pour tous types de salissures et le rendement des modules augmente de 9% à 15% durant les 45 jours d'expérience[7].

Mise en place et exécution d'un protocole d'étude et de suivi du nettoyage de modules photovoltaïques en zone très poussiéreuse : cas de la région soudano-sahélienne

D'autres études ont été menées par **Abd-Elhady et al** sur le nettoyage de modules PV à l'eau et au détergent sous une température ambiante de 37°C. Les résultats de ces études montrent que, les modules PV perdent leurs performances de 12% après 35 jours de nettoyage à l'eau et au détergent[7].

Cette technologie de nettoyage a des avantages et des inconvénients énumérés ci-dessous :

II.2.7.1 Avantages

- ✚ Efficace pour tous types de salissure;
- ✚ Absence de ressource humaine pour le nettoyage.

II.2.7.2 Inconvénients

- ✚ Détérioration des verres de couvertures de modules à long terme;
- ✚ Coût de la maintenance élevé;
- ✚ Forte consommation d'énergie.

II.2.8 Nettoyage des modules PV à l'aide d'un robot

Les premiers appareils de nettoyage des modules PV robotisés étaient fabriqués aux Etats Unis d'Amérique, plus précisément à Boston[12]. Ce type de nettoyage consiste à faire glisser le nettoyeur principal verticalement sur les rails fixés à l'extrémité des panneaux solaires. Ensuite, le robot est combiné généralement à un système automatique d'injection d'eau à basse pression sur les surfaces des panneaux solaires qui nettoient les salissures sur les modules PV.

Cette méthode de nettoyage a des avantages et inconvénients ci-dessous :

II.2.8.1 Avantages

- ✚ Absence de ressource humaine;
- ✚ Gain de temps;
- ✚ Nettoyage parfait de module PV.

II.2.8.2 Inconvénients

- ✚ Forte consommation d'énergie électrique;
- ✚ Demande une main d'œuvre qualifiée pour la maintenance du robot;
- ✚ Coût de maintenance élevé.

II.3 METHODES D'ETUDE DES PERFORMANCES DES MODULES PV

II.3.1 Méthode de Jonathan Leloux

Cette méthode a été développée en France par Jonathan Leloux [13] pour analyser la performance des modules PV dans les installations domestiques. La méthode consiste à calculer le ratio de performance du module par la formule ci-dessous :

$$PR = \frac{E_{produite} * G_{STC}}{P_{STC} \int_{t_0}^{t_1} G dt} \quad (1)$$

$E_{produite}$: Energie produite par le module;

G_{STC} : Ensoleillement dans les conditions STC;

P_{STC} : Puissance du module dans les conditions STC;

G : Ensoleillement mesuré dans le milieu naturel.

t_0 : Temps à l'aube ;

t_1 : Temps au crépuscule.

II.3.2 Méthode de S.Mekhilef

Cette étude a été élaborée par des scientifiques malaisiens préoccupés par l'effet de l'accumulation de la poussière et de l'humidité sur les modules PV en milieu naturel[14]. La méthode est basée sur le calcul du ratio de performance.

$$PR = \frac{P_m * G_{STC}}{P_{STC} * G_m} \quad (2)$$

P_m : Puissance mesurée du module.

G_m : Ensoleillement mesuré du module.

P_{STC} : Puissance du module dans les conditions STC.

G_{STC} : Ensoleillement du module dans les conditions STC

II.3.3 Méthode Mother PV

La méthode Mother PV (Meteorological, Optical and Thermal Histories for Energy Rating in Photovoltaics) a été développée à l'Institut National de l'Énergie Solaire en France[15]. Elle consiste à calculer le ratio de performance des modules PV en fonction des données mesurées par le banc I-V et les données du module dans les conditions STC.

✚ Calcul de l'énergie reçue par le module PV au cours d'une période.

$$E = \int_{t_0}^{t_1} G dt \quad (3)$$

t_0 : Temps à l'aube

t_1 : Temps au crépuscule.

- ✚ Calcul de l'énergie totale du site.

$$E_{site} = \sum_{i=1}^n E_i \quad (4)$$

n: Effectif d'ensoleillement

- ✚ Calcul de la distribution de l'ensoleillement.

$$DF = \frac{E}{E_{Site}} \quad (5)$$

- ✚ Calculer le ratio de performance en fonction de la puissance maximale et le courant de court-circuit.

$$PR = \frac{P_m * I_{CC,STC}}{P_{STC} * I_{CC,m}} \quad (6)$$

- ✚ Calcul de la moyenne des ratios de performance.

$$PR_{mean} = \sum_{i=1}^n PR_i * DF_i \quad (7)$$

II.3.4 Méthode de G KACI

Cette méthode a été présentée lors de la Conférence Internationale sur l'Electronique l'Electricité et l'Automatisme [16]. La méthode consiste à calculer le rendement et le ratio de performance de module PV. Les formules ci-dessous illustrent cette méthode:

- ✚ Calcul de rendement des modules PV

$$\eta = \frac{P_m}{G * S} \quad (8)$$

P_m : Puissance maximale produite par le module, G: Ensoleillement reçu par le module ;

S : Surface du module.

- ✚ Calcul du ratio de performance de module PV

$$PR = \frac{P_m * G_{STC}}{G * P_{STC}} \quad (9)$$

G_{STC} : Ensoleillement et P_{STC} : Puissance du module dans les conditions STC.

II.3.5 Méthode de M Piliouline

Menée par les chercheurs de l'Université de Malaga en Espagne. La méthode de M Piliouline consiste à analyser la performance des modules PV sur la base du calcul des énergies journalières et du ratio de performance [17].

Mise en place et exécution d'un protocole d'étude et de suivi du nettoyage de modules photovoltaïques en zone très poussiéreuse : cas de la région soudano-sahélienne

- ✚ Calcul de l'énergie journalière des modules en fonction de la puissance maximale.

$$E_{daily} = \sum_{i=1}^n P_m dt \quad (10)$$

- ✚ Calcul de l'énergie journalière des modules en fonction de l'ensoleillement.

$$E = \sum_{i=1}^n G dt \quad (11)$$

- ✚ Calcul de la productivité énergétique journalière des modules en fonction de la puissance maximale de module dans STC.

$$Y_{daily} = \frac{E_{daily}}{P_{STC}} \quad (12)$$

- ✚ Calcul de la productivité énergétique journalière de référence en fonction de l'ensoleillement dans les conditions STC.

$$Y_{daily}^R = \frac{E_{daily}}{G_{STC}} \quad (13)$$

- ✚ Calcul du ratio de performance journalier de module.

$$PR = \frac{Y_{daily}}{Y_{daily}^R} \quad (14)$$

III- MATERIEL ET METHODOLOGIE DE TRAVAIL

III.1 MATERIEL

III.1.1 Plateforme expérimentale

Nos travaux de stage, se sont déroulés autour d'un banc de caractérisation de modules PV (banc I-V) installé à Kamboinsé sur le site K1 (du 2iE). Le banc I-V est constitué d'une partie externe située sur le toit du laboratoire et d'une autre partie interne qui se trouve dans un local aménagé.

III.1.1.1 Partie externe du banc I V

La partie externe du banc I-V est composée des modules à caractériser et de plusieurs appareils tels que, le pyranomètre, le pyrgeomètre, la sonde UVA / UVB, une station météorologique et une armoire de charge résistive.

✚ **Module PV** : C'est l'association de plusieurs cellules PV en série ou en parallèle qui convertissent l'énergie solaire incidente directement en énergie électrique. Ainsi, nous disposons pour notre étude plusieurs modules PV. Les modules sont installés et orientés plein sud avec une inclinaison de 14° sur la toiture du LESEE (voir la figure 1).



Figure 8 : Modules à caractériser par le banc I-V sur le site du 2iE

✚ **Pyranomètre** : C'est un appareil thermoélectrique qui permet de mesurer le rayonnement solaire de l'endroit où il est installé. Le rayonnement solaire s'exprime en W/m^2 .



Figure 9 : Pyranomètre de type KIPP & ZONEN CM 11/14

- ✚ **Sonde de température** : Permet de mesurer la température d'un milieu donné selon son emplacement. Dans le cadre de notre étude, la sonde de température est collée au milieu de la face arrière du module PV afin de mesurer la température du module.



Figure 10 : Sonde de température Pt100

- ✚ **Armoire des charges résistives** : C'est le regroupement de plusieurs résistances dans une armoire, qui permettent de dissiper l'énergie électrique produite par les modules. Notons que les charges résistives dans notre cas sont placées à l'extérieur du local pour éviter de chauffer la pièce qu'elles occuperaient. En Europe elles peuvent rester à l'intérieur des locaux et servir en même temps pour le chauffage des bâtiments.



Figure 11 : Armoire des charges résistives

III.1.1.2 Partie interne du banc de mesure I-V

Cette partie est constituée de plusieurs appareils qui permettent de mesurer et d'enregistrer les différents paramètres d'un module photovoltaïque ainsi que les données climatiques.

- ✚ **Armoire de brassage** : Permet de faire la jonction des câbles qui viennent de l'armoire des charges résistives, du banc I-V, les capteurs, les sondes PT100 et des modules placés sur le toit.



Figure 12 : Armoire de brassage

- ✚ **Multimètre** : Permet d'effectuer des mesures précises de courant et de la tension des modules.

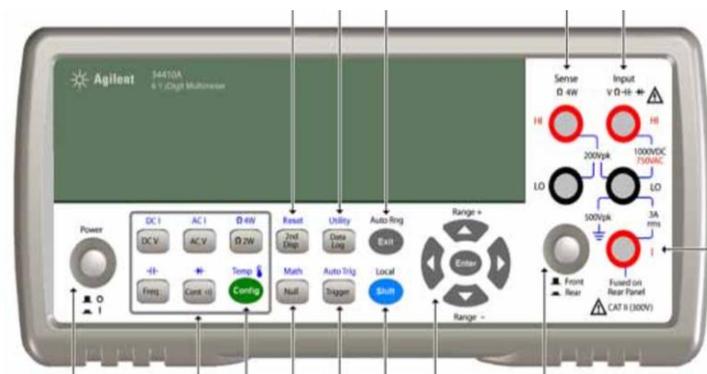


Figure 13 : Multimètre Agilent 34410A/11A

- ✚ **Ordinateur industriel** : Permet d'enregistrer et de stocker les données mesurées à travers un programme informatique développé sous Labview.

Mise en place et exécution d'un protocole d'étude et de suivi du nettoyage de modules photovoltaïques en zone très poussiéreuse : cas de la région soudano-sahélienne

- ✚ **Relai** : C'est un organe électronique qui a pour rôle de dissocier la partie interne et externe du banc I-V. Il sert à connecter les voies de la partie externe (modules PV) aux différents appareils de mesure (les multimètres)

La figure 7 ci-dessous montre la baie qui est une composante de la partie interne du banc I-V.



Figure 14 : Composante interne du banc I-V

III.2 METHODOLOGIE DE TRAVAIL

Pour atteindre les objectifs spécifiques fixés, nous allons suivre successivement les quatre étapes suivantes :

- ✚ Etude bibliographique sur les types de salissures des modules PV en zone sahélienne, les méthodes de nettoyage de modules PV et les méthodes d'étude de l'impact de la salissure sur les modules PV;
- ✚ Proposition d'un protocole de suivi de nettoyage des modules photovoltaïques;
- ✚ Suivi et collecte des données du banc I-V ;
- ✚ Analyse des données du banc I-V.

IV- PROTOCOLE DE SUIVI DU NETTOYAGE DES MODULES PV

Le protocole de suivi du nettoyage des modules PV est composé d'une fiche Excel et d'un cahier de suivi du nettoyage des modules PV.

- ✚ Fiche Excel permet de faire le suivi du nettoyage des modules PV. On remplit en vert si le nettoyage a été effectué et en rouge si le nettoyage n'est pas effectué (voir annexe 1).
- ✚ Cahier de suivi du nettoyage permet de noter toutes les opérations effectuées sur la plateforme en mentionnant la date, le nom et prénom de l'opérateur.

Les étapes d'exécution du protocole de suivi du nettoyage des modules PV se présente comme suit :

- ✚ Etape 1 : Nettoyer les modules PV destinés pour le nettoyage journalier à eau et à sec.
- ✚ Etape 2 : Contrôler les connexions des sonde Pt100 sur les boîtiers ensuite sur les modules PV.
- ✚ Etape 3 : Mettre en marche le banc I-V via la charge KEPCO.
- ✚ Etape 4 : Vérifier les courbes I-V des différents modules PV connectés au banc I-V.
- ✚ Etape 5 : Noter sur le cahier de suivi du nettoyage des modules PV toutes opérations effectuées sur le banc I-V.
- ✚ Etapes 6 : Remplir les cases du fiche Excel de suivi du nettoyage des modules PV en vert si le nettoyage a été effectuer et en rouge si le nettoyage n'est pas effectué.

V- ETUDE EXPERIMENTALE DE L'INFLUENCE DE LA POUSSIERE SUR LES PERFORMANCES DES MODULES

La présente étude porte sur la dégradation des performances des modules PV sous l'influence de la poussière en région soudano-sahélienne (Ouagadougou/ Burkina Faso). L'étude est menée sur cinq modules PV au silicium de technologie polycristalline (pc-Si) et de mêmes caractéristiques électriques données par le fabricant SolarWorld dans les conditions STC (voir le Tableau 1).

Les modules sont nommés respectivement SUN020, SUN021, SUN022, SUN023 et SUN024. Ils sont caractérisés par le banc expérimental « banc I-V » installé sur la plateforme expérimentale du Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE/2IE, 12° 26' 48" North, 1° 33' 45" West) au Burkina à une hauteur de 5,3 mètres du sol.

Les modules SUN020, SUN021 sont nettoyés à l'eau avec une éponge synthétique, le module SUN021 servira de référence pour la suite des travaux. Par contre, les modules SUN022, SUN023 sont nettoyés à sec avec une éponge synthétique; le module SUN024 est resté non nettoyé durant toute l'étude qui s'étend du 29/01/2015 au 28/02/2015. Différentes périodicités de nettoyage sont expérimentées :

- ✚ Les modules SUN021 et SUN022 sont nettoyés chaque jour le matin à 7h;
- ✚ Les modules SUN020 et SUN023 sont nettoyés hebdomadairement chaque jeudi matin à 7h;
- ✚ Le module SUN024 ne sera pas nettoyé durant toute l'expérience. En effet, il est prévu pour ce module, un nettoyage saisonnier et la période d'étude ne couvre qu'une seule (la saison sèche) des deux saisons rencontrées au Burkina Faso. En effet, au Burkina Faso, la saison sèche s'étend du mois de Novembre à Juin et la saison pluvieuse de juillet à octobre.

Tableau 1 : Caractéristiques électriques STC des modules

Nom du module/ Technologie	Fréquence de nettoyage	P_{mp}(Wc)	V_{mp}(V)	I_{mp}(A)	V_{oc}(V)	I_{sc}(A)
SUN021/pc-Si	journalière	50	18,2	2,75	22,1	2,95
SUN020/pc-Si	hebdomadaire	50	18,2	2,75	22,1	2,95
SUN022/pc-Si	journalière	50	18,2	2,75	22,1	2,95
SUN023/pc-Si	hebdomadaire	50	18,2	2,75	22,1	2,95
SUN024/pc-Si	non nettoyé	50	18,2	2,75	22,1	2,95

V.1 CHOIX DE LA METHODE D'ANALYSE

V.1.1 Puissance moyenne journalière

La puissance moyenne (arithmétique) journalière d'un module est la somme des puissances maximales mesurées au cours d'une journée, divisée par le nombre de mesure. Elle se calcule par la formule 15.

$$P_{moy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{m_i} \quad (15)$$

P_m : Puissance moyenne journalière en W.

V.1.2 Ratios des puissances moyennes journalières

Le ratio des puissances moyennes journalières est le rapport des puissances moyennes des différents modules.

$$Ratio_1 = \frac{P_{moy} \text{ module non nettoyé}}{P_{moy} \text{ net_journalier}} \quad (16)$$

$$Ratio_2 = \frac{P_{moy} \text{ module non nettoyé}}{P_{moy} \text{ net_hebdomadaire}} \quad (17)$$

V.1.3 Energie moyenne journalière

L'énergie moyenne journalière est la somme de l'intégrale de la puissance maximale de module photovoltaïque en fonction de la variation de temps de fonctionnement de la journée.

Elle se calcule par la formule 18:

$$E_{moy} = \int_{t_0}^{t_1} P_m dt \quad (18)$$

E_{moy} : Energie moyenne journalière en Wh

V.2 Résultats et discussions

V.2.1 Etude comparative des cinq modules le premier jour de l'installation

Au début de l'étude (29 janvier 2015), les cinq modules ont été nettoyés à l'eau; ensuite ils ont été caractérisés pour comparer leurs performances dans les conditions identiques de fonctionnement. Les modules sont comparés sur la base des moyennes journalières de trois principaux paramètres électriques mesurés dans les mêmes conditions météorologiques. Il s'agit du courant de court-circuit (I_{sc}), la tension à circuit-ouvert (V_{oc}) et la puissance maximale (P_{mp}).

Les moyennes journalières de ces trois paramètres sont calculées grâce à la formule suivante :

Mise en place et exécution d'un protocole d'étude et de suivi du nettoyage de modules photovoltaïques en zone très poussiéreuse : cas de la région soudano-sahélienne

$$X_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (19)$$

Où X représente l'un des trois paramètres électriques (I_{sc} , V_{oc} et P_{mp}) et N représente le nombre de mesures prises dans la journée entre 7h et 17h. Le tableau 2 présente les valeurs moyennes trouvées.

Tableau 2 : Valeurs moyennes mesurées des paramètres électriques (I_{sc} , V_{oc} , P_{mp}) des cinq modules au début de l'étude (Jour 1)

Nom du module/ Technologie	G (W/m ²)	T _m (°C)	P _m (W)	I _{sc} (A)	V _{oc} (V)
SUN021/pc-Si	777,631	53,926	35,083	2,478	19,402
SUN020/pc-Si	776,248	49,907	35,473	2,478	19,480
SUN022/pc-Si	784,381	52,109	33,760	2,459	19,318
SUN023/pc-Si	775,988	50,384	35,192	2,452	19,476
SUN024/pc-Si	775,741	51,958	33,605	2,454	19,311

Le Tableau 2 nous indique que les mesures sont prises sur les modules pour des conditions d'ensoleillement solaire très voisines sinon identiques, les écarts pouvant être négligés. En effet si nous considérons le module SUN021 (module de référence), l'ensoleillement moyen reçu est 777,631W/m² or le pyranomètre (Kipp & Zonen CM11/14), a une précision de ±3% sur la valeur mesurée, ce qui voudrait dire que toute valeur d'ensoleillement entre 754,302W/m² et 800,95W/m² pourrait être considérée comme identique à 777,631W/m².

Les écarts entre la température du SUN021 et celles des modules SUN020, SUN022, SUN023 et SUN024 sont de 4,019°C, 1,817°C, 3,542°C et 1,968°C. Ces écarts ne peuvent cependant pas être imputés à l'incertitude de mesure de la sonde Pt100 utilisée pour la mesure de la température. En effet, l'incertitude ΔT sur la mesure d'une température T par la sonde Pt100 (classe B) est donnée par la formule 20 :

$$\Delta T [^{\circ}C] = 0.30 + 0.005 \times T [^{\circ}C] \quad (20)$$

Pour une température mesurée de 53,926 °C (SUN021), la valeur vraie se situerait entre 53,356°C et 54,495°C. Les températures des quatre autres modules ne se trouvant pas dans cet intervalle, il s'impose une correction en température des mesures. Cette correction est faite grâce à la relation bien connue:

$$X(T_{ref}) = X(T_{meas}) - CT_X \cdot (T_{meas} - T_{ref}) \quad (21)$$

Avec T_{ref} la température de référence (ici elle est égale à la température du module SUN021), T_{meas} la température mesurée et CT_X le coefficient de température du module relatif au paramètre X ($CT_{P_{mp}} = -0,225 \text{ W}/^{\circ}C$; $CT_{I_{sc}} = 0,00239 \text{ A}/^{\circ}C$; $CT_{V_{oc}} = -0,08177 \text{ V}/^{\circ}C$).

Mise en place et exécution d'un protocole d'étude et de suivi du nettoyage de modules photovoltaïques en zone très poussiéreuse : cas de la région soudano-sahélienne

Le Tableau 3 présente les valeurs obtenues pour les trois paramètres électriques après la correction en température.

Tableau 3 : Moyenne des paramètres électriques mesurés le jour 1 et corrigés en température

Nom du module/ Technologie	G (W/m ²)	T _m (°C)	P _m (W)	I _{sc} (A)	V _{oc} (V)
SUN021/pc-Si	777,631	53,926	35,083	2,478	19,402
SUN020/pc-Si	776,248	53,926	34,568	2,491	19,151
SUN022/pc-Si	784,381	53,926	33,551	2,464	19,169
SUN023/pc-Si	775,988	53,926	35,95	2,463	19,186
SUN024/pc-Si	775,741	53,926	33,162	2,460	19,190

A partir du tableau 3, on peut noter au départ de l'étude de légères différences entre les performances des cinq modules. En rapportant ces différences au module de référence SUN021 on note que:

- ✚ Les modules SUN020, SUN022, SUN023 et SUN024 ont des écarts de puissances par rapport au module SUN021. Les écarts sont respectivement de -0,39W, 1,713W, -1,432W et 1,587W.
- ✚ Les modules SUN022, SUN023 et SUN024 ont également des écarts de courant de court-circuit à celle du SUN021. Ces écarts varient de 0,019A, 0,007A et -0,002A. Par contre, le module SUN020 a un courant de court-circuit identique à celui de SUN021.
- ✚ Les quatre modules ont par ailleurs des valeurs plus faibles de tension en circuit ouvert. Les écarts sont respectivement de -0,078V, 0,162V, -0,158V et 0,165V.

Ces écarts obtenus le premier jour et dans les mêmes conditions opératoires, sont relativement faibles par rapport aux valeurs nominales des différents paramètres ; de plus ces écarts résultent en partie des incertitudes liées aux différents appareils (Multimètre Agilent) utilisés pour les mesures de courant et de tension des différents modules. Pour toutes ces raisons nous considérons dans la suite de l'étude que les modules ont dans les mêmes conditions météo, les mêmes performances.

Nous illustrerons les résultats des analyses de l'influence de la poussière sur les modules PV dans le paragraphe suivant.

V.3 Nettoyage à eau avec éponge

Dans cette partie, nous allons présenter les valeurs de puissances mesurées du 29/01/2015 au 28/02/2015. Nous rappelons que, les principaux modules concernés par ce nettoyage sont :

- ✚ Le module SUN021 est destiné pour le nettoyage journalier à eau ;
- ✚ Le module SUN020 est réservé au nettoyage hebdomadaire (jeudi) à eau ;
- ✚ Le module SUN024 ne sera pas nettoyé durant toute l'expérience.

V.3.1 Influence du dépôt de la poussière sur la puissance maximale des modules

La figure 15 représente l'évolution de la puissance moyenne journalière des trois modules durant la période d'étude (29/01/2015 au 28/02/2015).

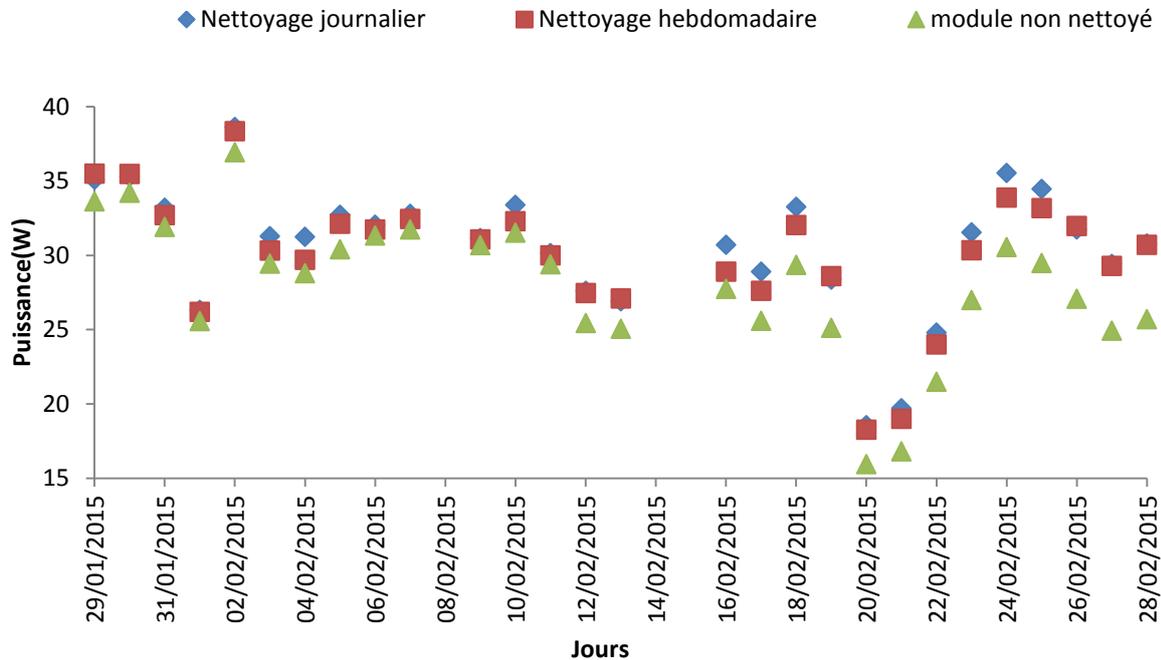


Figure 15 : Evolution de la puissance moyenne journalière des modules nettoyés à l'eau.

Nous constatons sur la figure 15, que la puissance moyenne journalière du module SUN020 (nettoyage hebdomadaire) est légèrement supérieure de 0,39W au module SUN021 (nettoyage journalier) et supérieure de 1,86W à celui de module SUN024 le premier jour de l'installation. Cela s'explique par le fait que dès le premier jour de l'installation, nous avons constaté un écart de puissance entre les modules que nous avons jugé négligeables.

On remarque aussi sur la figure 15, que les puissances moyennes journalières des modules SUN021 et SUN020 sont sensiblement égales aux dates ci-après : **le 05/02/2015 ; 12/02/2015 ; 19/02/2015** et le **26/05/2015**. Nous pouvons expliquer cela par le fait que ces jours (les jeudis) ont eu lieu en même temps le nettoyage journalier et le nettoyage hebdomadaire. Ceci confirme que les deux modules SUN020 et SUN021 ont des performances semblables dans les mêmes conditions de fonctionnement.

En outre, nous observons d'une manière générale que la puissance moyenne journalière de module SUN024 (non nettoyé) est inférieure à la puissance moyenne journalière des modules PV fournies par les modules aux nettoyages journalier et hebdomadaire. Cela traduit que le module SUN024 (non nettoyé) ne reçoit pas la totalité de l'ensoleillement sur sa surface, il perd une partie de l'ensoleillement à cause du dépôt de la poussière sur sa surface.

V.3.1.1 Calcul des ratios de puissance moyenne journalière des modules

Les ratios de puissance moyenne journalière sont calculés par les formules 16 et 17.

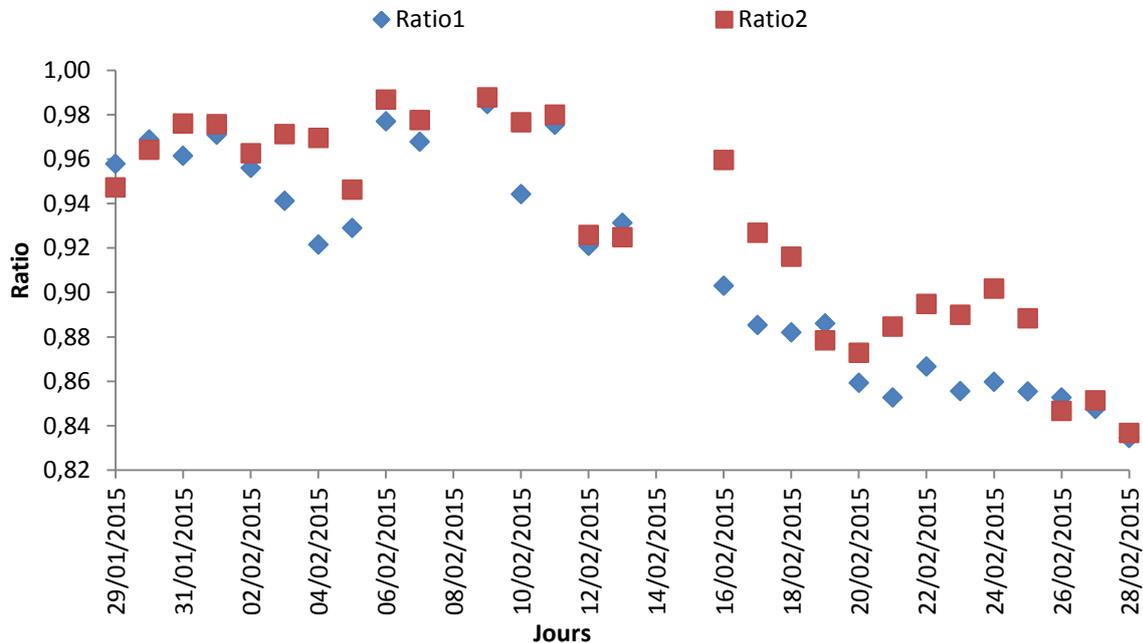


Figure 16 : Evolution de ratios de puissance moyenne journalière de nettoyage à l'eau.

La figure 16 ci-dessus montre dans la majeure partie des cas, le ratio 2 est supérieur au ratio 1. A titre d'exemple le 18/02/2015, le ratio 2 est de **91,6%** et le ratio 1 qui est de **88,2%** (voir annexe 2). Ceci élucide que, le nettoyage hebdomadaire à l'eau perd de ratio moyen de puissance de **3,4%** par rapport au nettoyage journalier à eau.

V.3.2 Influence du dépôt de la poussière sur la production énergétique des modules

Dans cette partie, nous allons étudier l'impact de dépôt de la poussière sur la production énergétique des modules photovoltaïques en milieu naturel. La figure 17 montre l'évolution de l'énergie moyenne journalière des modules.

Mise en place et exécution d'un protocole d'étude et de suivi du nettoyage de modules photovoltaïques en zone très poussiéreuse : cas de la région soudano-sahélienne

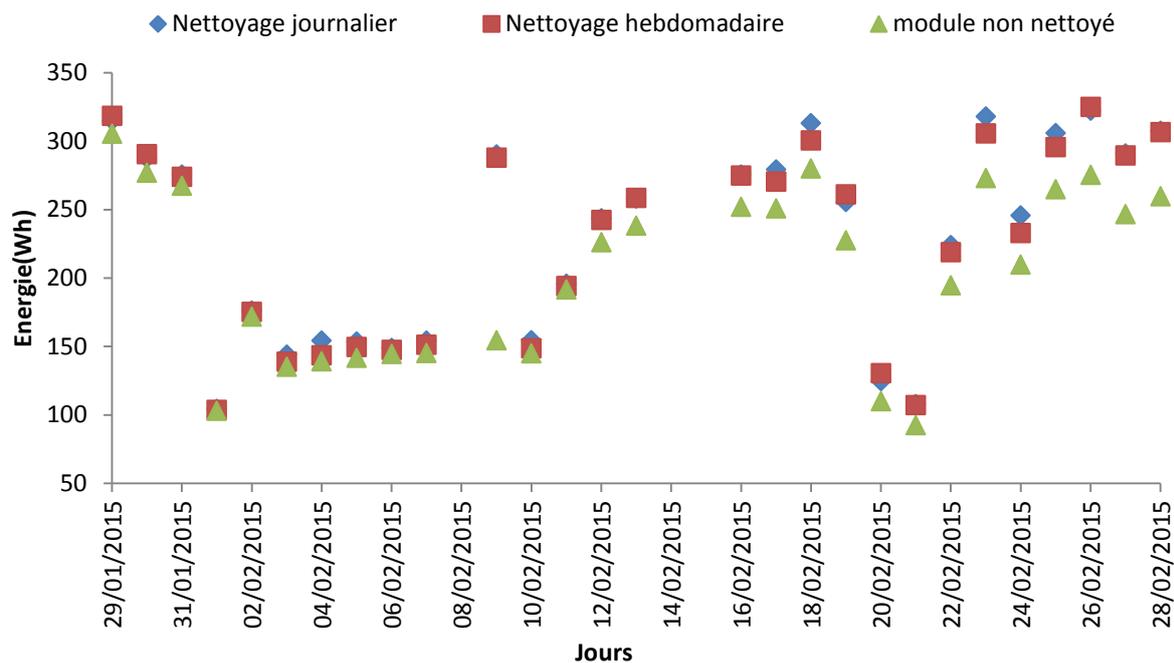


Figure 17 : Evolution de l'énergie moyenne journalière de nettoyage à eau.

Sur la figure 17 nous remarquons que l'énergie moyenne journalière produite par le module SUN020 (nettoyage hebdomadaire) est légèrement supérieur à l'énergie produite par le module SUN021 (nettoyé journalier) les deux premiers jours de l'installation. Nous pouvons justifier cela par le fait que, le premier jour de l'installation, nous avons un écart de puissance maximale de 0,39W au module SUN021 (nettoyage journalier) et supérieure de 1,587W à celui de module SUN024 le premier jour de l'installation. Cela s'explique par le fait que dès le premier jour de l'installation, nous avons constaté un écart de puissance entre les modules et nous avons jugé négligeable. Cet écart est dû également aux erreurs de mesure des appareils.

La figure 17 montre que les énergies moyennes journalières des modules SUN021 et SUN020 sont sensiblement égales aux dates ci-après : **05/02/2015 ; 12/02/2015 ; 19/02/2015** et **26/05/2015**. Cela s'explique par le fait que ces jours (les jeudis) ont eu lieu en même temps le nettoyage journalier et le nettoyage hebdomadaire. Ceci montre que les deux modules SUN020 et SUN021 garantissent pratiquement les mêmes productions énergétiques dans les mêmes conditions de fonctionnement.

Par ailleurs, nous remarquons que la production énergétique du module SUN024 (module non nettoyé) durant toute la période d'expérience est en général faible par rapport à la production énergétique des modules SUN021 (nettoyage journalier) et SUN020 (nettoyage

Mise en place et exécution d'un protocole d'étude et de suivi du nettoyage de modules photovoltaïques en zone très poussiéreuse : cas de la région soudano-sahélienne

hebdomadaire). Cela, s'explique par le fait que le dépôt de la poussière diminue la part du rayonnement solaire absorbée par le module SUN024. Nous observons également que, les productions énergétiques des trois modules ne sont pas régulières à cause de la variation de l'ensoleillement d'un jour à un autre.

V.3.3 Gain énergétique du nettoyage à eau avec éponge

Nous faisons la synthèse des énergies moyennes (voir annexe 3) de différentes fréquences de nettoyage à eau avec éponge dans le tableau 3 ci-dessous.

Tableau 4 : Energie moyenne totale de nettoyage à eau avec éponge

Nom du module/ technologie	Energie moyenne (Wh)
SUN021 (Nettoyage journalier)/pc-Si	6422,842
SUN020 (Nettoyage hebdomadaire)/pc-Si	6339,794
SUN024 (module non nettoyé)/pc-Si	5718,382

Ensuite, nous allons évaluer les gains énergétiques des modules SUN021 et SUN020 par rapport au module SUN024 (module non nettoyé).

✚ Gain énergétique mensuel du module SUN021

$$GE_{SUN021} = E_{SUN021 moy} - E_{SUN024 moy} \quad (22)$$

GE_{SUN021} : Energie moyenne totale produite par le module SUN021

$E_{SUN024 moy}$: Energie moyenne totale produite par le module SUN024

GE_{SUN021} : Gain énergétique mensuel du module SUN021

Application numérique: $GE_{SUN021} = 6422,842 - 5718,382$

$$GE_{SUN021} = \mathbf{704,46Wh}$$

✚ Gain énergétique mensuel du module SUN020

$$GE_{SUN020} = E_{SUN020 moy} - E_{SUN024 moy} \quad (23)$$

$E_{SUN020 moy}$: Energie moyenne totale produite par le module SUN020

GE_{SUN020} : Gain énergétique mensuel du module SUN020

Application numérique : $GE_{SUN020} = 6339,794 - 5718,382$

$$GE_{SUN020} = \mathbf{621,412Wh}$$

Cependant, pour une bonne comparaison du nettoyage journalier au nettoyage hebdomadaire, nous calculerons pour ces deux fréquences de nettoyage à eau avec éponge synthétique, les gains énergétiques moyens journaliers par unité de surface des modules.

✚ Gain énergétique moyen du module SUN021

Mise en place et exécution d'un protocole d'étude et de suivi du nettoyage de modules photovoltaïques en zone très poussiéreuse : cas de la région soudano-sahélienne

Le gain énergétique moyen du module SUN021 se calcule par la formule ci-dessous et s'exprime en Wh/m²/j ou Wh/m²/mois.

$$GEM_{SUN021} = \frac{GE_{SUN021}}{S * N} \quad (24)$$

GE_{SUN021} : Gain énergétique moyen du module SUN021

S : Surface du module (**0,4624m²**)

N : Nombre des jours de mesure (30 jours)

Application numérique : $GEM_{SUN021} = \frac{704,46}{0,4624 * 30}$

$GEM_{SUN021} = 50,78 \text{Wh/m}^2/\text{j}$ soit un gain énergétique moyen mensuel de **1523,4Wh/m²/mois**

✚ Gain énergétique moyen du module SUN020

$$GE_{SUN020} = \frac{GE_{SUN020}}{S * N} \quad (25)$$

GE_{SUN020} : Gain énergétique moyen du module SUN020

Application numérique : $GE_{SUN020} = \frac{621,412}{0,4624 * 30}$

$GE_{SUN020} = 44,79 \text{Wh/m}^2/\text{j}$ soit un gain énergétique moyen mensuel de **1343,88Wh/m²/mois**

V.4 Nettoyage à sec avec éponge

Contrairement au nettoyage à l'eau avec éponge, le nettoyage à sec consiste à nettoyer les surfaces de modules photovoltaïques uniquement avec éponge synthétique. Ainsi, les principaux modules concernés par ce nettoyage sont les suivants :

- ✚ Le module SUN022 est nettoyé tous les matins à sec avec éponge;
- ✚ Le module SUN023 est nettoyé hebdomadairement (les jeudis) à sec avec éponge ;
- ✚ Le module SUN024 ne sera pas nettoyé durant toute l'expérience.

V.4.1 Influence du dépôt de la poussière sur la puissance maximale des modules

La figure 18 ci-dessous, montre l'évolution de la puissance moyenne journalière de module SUN022 (nettoyage journalier), le module SUN023 (nettoyage hebdomadaire) et le module SUN024 (module non nettoyé).

Mise en place et exécution d'un protocole d'étude et de suivi du nettoyage de modules photovoltaïques en zone très poussiéreuse : cas de la région soudano-sahélienne

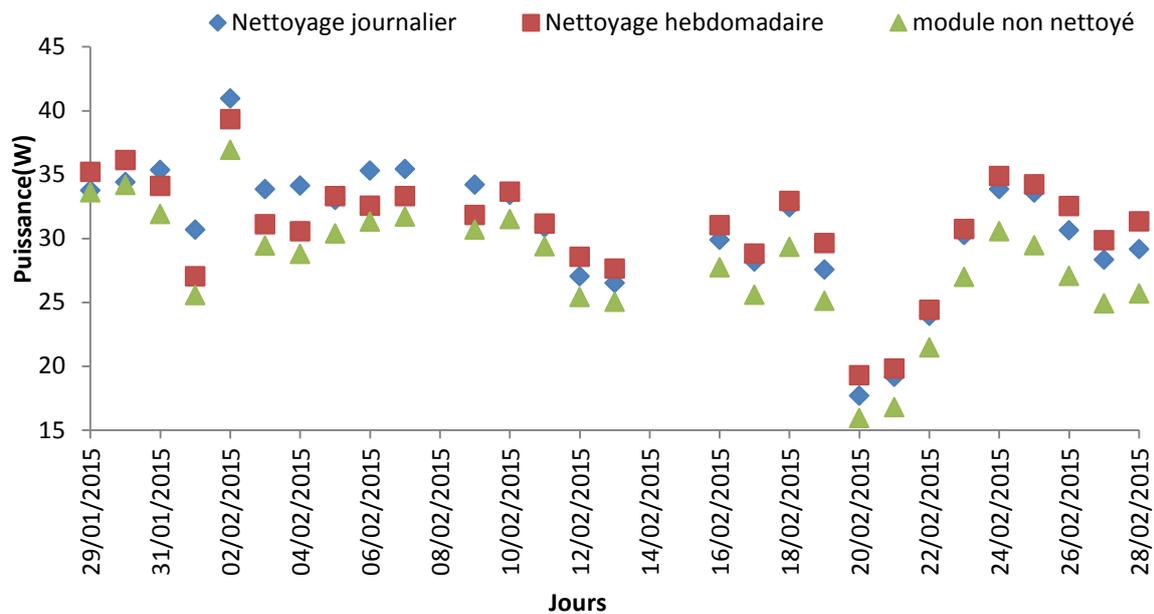


Figure 18 : Evolution de la puissance moyenne journalière de nettoyage à sec.

Les deux premiers jours de l'installation, la puissance moyenne journalière de module SUN023 est légèrement supérieure aux modules SUN022 et SUN024. Cela s'explique par le fait que, le premier jour de l'installation nous avons eu un écart maximal de **1,587W** (voir le tableau 2) entre les trois modules.

Du **31/01/2015** au **09/02/2015**, nous constatons que, la puissance moyenne journalière de module SUN022 (nettoyage journalier) est supérieure aux modules SUN023 (nettoyage hebdomadaire) et SUN024 (module non nettoyé). Nous justifions cela par le fait que, le module SUN022 reçoit plus de l'ensoleillement à cause de faible taux de dépôt de la poussière sur sa surface.

Du **10/02/2015** au **28/02/2015**, nous remarquons que, la puissance moyenne journalière de module SUN023 (nettoyage hebdomadaire) devient supérieure au module SUN022 (nettoyage journalier). Cela s'explique par le fait que, le nettoyage journalier à sec à long terme crée des rayures sur la surface des verres de module PV et réduit la transmittance des verres de module.

Toutefois, nous observons d'une manière générale que la puissance moyenne journalière du module SUN024 (non nettoyé) est inférieure à la puissance moyenne journalière du module SUN022 (nettoyage journalier) et SUN023 (nettoyage hebdomadaire). Cela montre que le module SUN024 (non nettoyé) a un taux de dépôt de la poussière très élevé par rapport aux deux autres modules.

V.4.1.1 Calcul des ratios de puissance moyenne journalière des modules

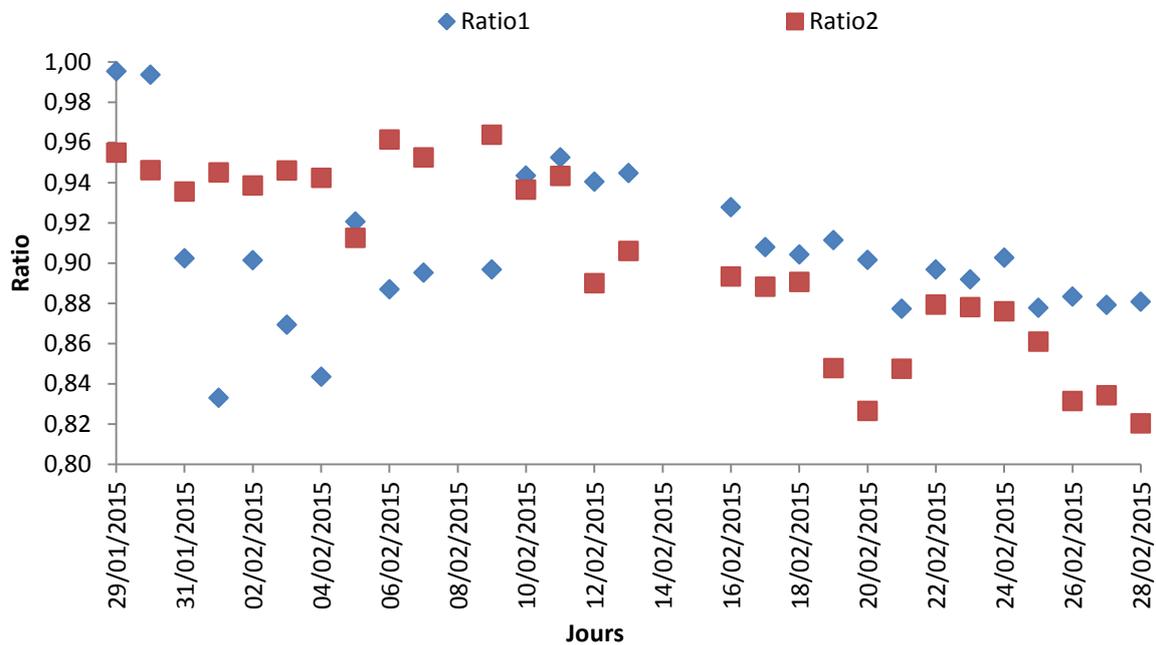


Figure 19 : Evolution de ratios de puissance moyenne journalière de nettoyage à sec.

Du **28/02/2015** au **09/02/2015**, nous remarquons sur la figure 20 ci-dessus que, le ratio 2 est supérieur au ratio 1. La moyenne de ratio 2 vaut **94,45%** ensuite le ratio 1 est égale à **90,67%** (voir annexe 4). Cela montre que, le ratio de puissance moyenne journalière du nettoyage hebdomadaire perd de ratio de puissance moyenne journalière de **3,77%** par rapport à celui du nettoyage journalier.

Du **10/02/2015** au **28/02/2015**, la moyenne de ratio 1 équivaut à **90,49%** supérieur à celui du ratio 2 qui est égale à **86,95%**. Cela s'explique par le fait que, le nettoyage journalier à sec de module PV à long terme dégrade le verre de couverture de module. Autrement dit, le nettoyage journalier à sec perd plus de puissance à cause des rayures des verres de couverture du module PV.

V.4.2 Influence du dépôt de la poussière sur la production énergétique des modules

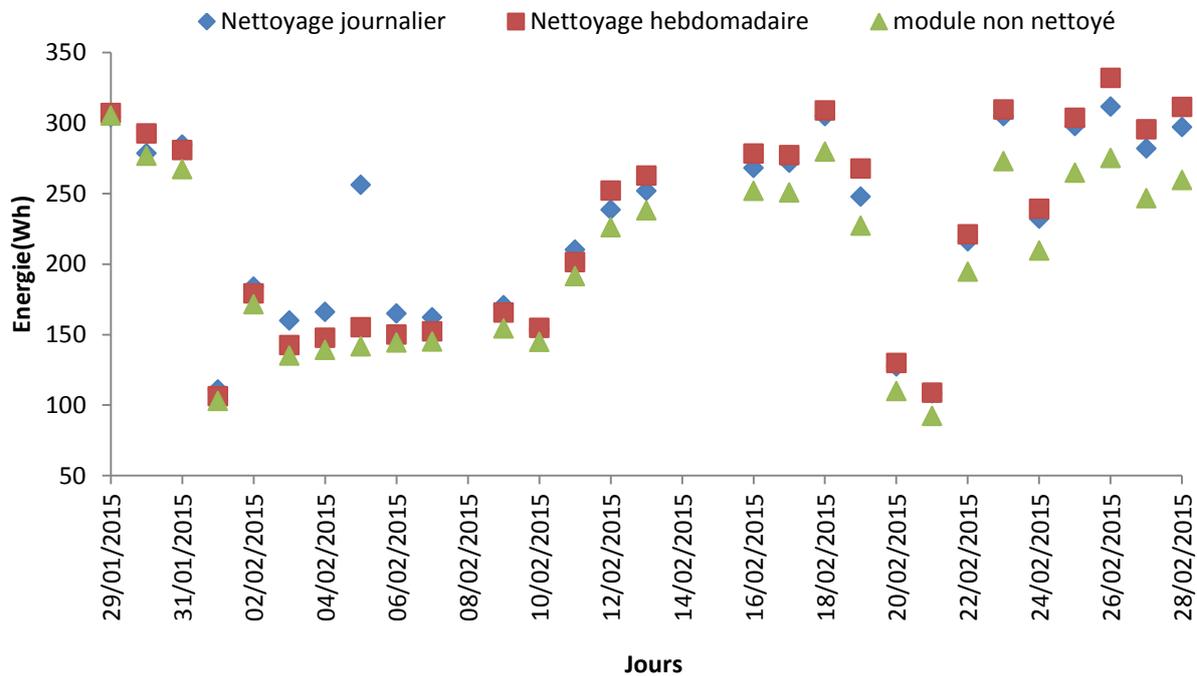


Figure 20 : Evolution de l'énergie moyenne journalière de nettoyage à sec

Nous observons sur la figure 21 ci-dessus que, les deux premiers jours de l'installation, l'énergie produite par le module SUN023 (nettoyage hebdomadaire) est supérieur par rapport aux modules SUN022 et SUN024. Cela s'explique par le fait que, le premier jour de l'installation, nous avons constaté un écart de puissance moyenne maximale de 1,587W.

Du **31/01/2015** au **09/02/2015**, la production énergétique moyenne de module SUN022 (nettoyage journalier à sec) est supérieure à celle des modules SUN023 (nettoyage hebdomadaire à sec) et SUN024 (module non nettoyé). Cela montre que, le module SUN022 reçoit plus de l'ensoleillement par rapport aux autres modules à cause de nettoyage qui se fait régulièrement.

Du **10/02/2015** au **28/02/2015**, la production énergétique moyenne du module SUN022 (nettoyage journalier à sec) devient inférieure à la production énergétique de module SUN023 (nettoyage hebdomadaire). Cela s'explique par le fait que, le nettoyage journalier à sec avec éponge endommage le verre de couverture de module PV et crée des rayures sur les surfaces de modules.

V.4.2.1 Calcul des ratios de l'énergie moyenne journalière des modules

V.4.3 Gain énergétique de nettoyage à sec avec éponge

Le tableau 4 ci-dessous, récapitule l'énergie moyenne totale des différents modules (voir annexe 4).

Tableau 5 : Energie moyenne totale de nettoyage à sec avec éponge

Nom du module/ technologie	Energie moyenne(Wh)
SUN022 (Nettoyage journalier)/pc-Si	6366,292
SUN023 (Nettoyage hebdomadaire)/pc-Si	6333,412
SUN024 (module non nettoyé)/pc-Si	5718,382

Dans le paragraphe qui suit, nous calculerons les gains énergétiques des modules SUN022 et SUN023 par rapport au module SUN024 (non nettoyé).

Gain énergétique mensuel du module SUN022

$$GE_{SUN022} = E_{SUN022\ moy} - E_{SUN024\ moy} \quad (26)$$

$E_{SUN022\ moy}$: Energie moyenne totale produite par le module SUN022

GE_{SUN022} : Gain énergétique du module SUN022

Application numérique: $GE_{SUN022} = 6366,292 - 5718,382$

$GE_{SUN022} = \mathbf{647,91Wh}$

Gain énergétique mensuel du module SUN023

$$GE_{SUN023} = E_{SUN023\ moy} - E_{SUN024\ moy} \quad (27)$$

$E_{SUN023\ moy}$: Energie moyenne totale produite par le module SUN023

GE_{SUN023} : Gain énergétique du module SUN023

Application numérique : $GE_{SUN023} = 6333,412 - 5718,382$

$GE_{SUN023} = \mathbf{615,03Wh}$

Gain énergétique moyen du module SUN022

Le gain énergétique moyen du module SUN022 se calcule par la formule 28 ci-dessous et s'exprime en Wh/m²/j ou Wh/m²/mois.

$$GEM_{SUN022} = \frac{GE_{SUN022}}{S * N} \quad (28)$$

GEM_{SUN022} : Gain énergétique moyen du module SUN022

S : Surface du module (**0,4624m²**)

N : Nombre des jours de mesure (30 jours)

Application numérique: $GEM_{SUN022} = \frac{647,91}{0,4624 * 30}$

Mise en place et exécution d'un protocole d'étude et de suivi du nettoyage de modules photovoltaïques en zone très poussiéreuse : cas de la région soudano-sahélienne

$GEM_{SUN022} = 46,71 \text{Wh/m}^2/\text{j}$ soit un gain énergétique moyen mensuel de **1401,3Wh/m²/mois**

✚ **Gain énergétique moyen du module SUN023**

$$GE_{SUN023} = \frac{GE_{SUN023}}{S * N} \quad (29)$$

GE_{SUN023} : Gain énergétique moyen du module SUN023

Application numérique : $GE_{SUN023} = \frac{615,03}{0,4624 * 30}$

$GE_{SUN023} = 44,34 \text{Wh/m}^2/\text{j}$ soit un gain énergétique moyen mensuel de **1330,2Wh/m²/mois**

VI- CONCLUSION

L'accumulation de la poussière sur la surface de module PV est un phénomène atmosphérique qui entraîne la diminution de puissance maximale de module photovoltaïque en milieu naturel. Le calcul de gain énergétique montre que, lorsque nous nettoyons le module quotidiennement à eau avec éponge synthétique, le gain énergétique moyen mensuel est de **1523,4Wh/m²/mois** par rapport au nettoyage hebdomadaire à eau avec éponge synthétique qui a un gain énergétique moyen mensuel de **1343,88Wh/m²/mois** par rapport au module non nettoyé.

Il ressort également de cette étude que, le nettoyage journalier à sec avec éponge synthétique a un gain énergétique moyen mensuel de **1401,3Wh/m²/mois** par rapport au nettoyage hebdomadaire à sec avec éponge synthétique a un gain énergétique moyen mensuel de **1330,2Wh/m²/mois** par rapport au module non nettoyé.

L'étude révèle que, le nettoyage à sec avec éponge à long terme détériore les surfaces (verres) et la performance de module PV.

Nous constatons que, le gain énergétique mensuel du nettoyage à eau avec éponge est supérieur à celui de nettoyage à sec avec éponge quel que soit la fréquence (journalière, hebdomadaire) de nettoyage de module.

De ce qui précède, nous pouvons dire que le nettoyage à eau avec éponge synthétique est avantageux, car elle permet de réduire le problème de la dégradation (rayures) des verres de modules PV.

VII- RECOMMANDATIONS

- ✚ Faire cette étude avec d'autres technologies de modules PV : monocristalline, amorphe et le HIT.
- ✚ Faire une étude économique sur les coûts de nettoyage des modules PV à eau et à sec.

VIII- BIBLIOGRAPHIE

- [1] Travis Sarver, Ali Al-Qaraghuli, Lawrence L. Kazmerski, “A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 22 (2013), pp.698-733.
- [2] Lisa A. Lamont, Lana El Chaar, “Enhancement of a stand-alone photovoltaic system’s performance: Reduction of soft and hard shading”, *Renewable Energy*, vol.36 (2010), pp.1306 - 1310.
- [3] Jan Herrmann, Karolina Slamova, Rüdiger Glaser, Michael Köhl, “Modeling the soiling of glazing materials in arid regions with geographic information systems (GIS) ”, *Energy procedia*, vol. 48 (2014), pp.715-720.
- [4] “Bruxelles environnement”, <http://www.bruxellesenvironnement.be>
- [5] R.E. Cabanillas and H. Munguia, “Dust accumulation effect on efficiency of Si photovoltaic modules”, *Renewable and sustainable energy*, (2011).
- [6] “Le photovoltaïque en France: énergie, risques, environnement, technologies, investissement.”. http://sycomoreen.free.fr/syco_PV_FAQ_fra.html
- [7] K.A Moharram, M.S. Abd-Elhady, H.A Kandil, H.El-Sherif, “Influence of cleaning using water and surfactants on the performance of photovoltaic panels”, *Energy Conversion and Management*, vol. 68 (2013) pp. 266 -272.
- [8] Monto Mani ; Rohit Pillai, “Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations”, vol.14 (2010), pp.3124 - 3131.
- [9] Sanaz Ghazi, Ali Sayigh, Kenneth Ip, “Dust effect on flat surfaces – A review paper”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33 (2014), pp. 742-751.
- [10] Gaofa He, Chuande Zhou, Zelun Li, “Review of Self-Cleaning Method for Solar Cell Array”, *Procedia Engineering*, vol. 16 (2011), pp.640 - 645.
- [11] DIALLO Amadou Sadio, “Etude de l’influence de l’inclinaison et des dépôts de poussière sur les performances des modules photovoltaïques à Kamboisé”, mémoire pour l'obtention de master 2, option : énergie et procédés industriels, 2iE, Juin 2010.
- [12] Mark Anderson, Ashton Grandy, Jeremy Hastie, Andrew Sweezey, Richard Ranky, Constantinos Mavroidis, “Robotic device for cleaning photovoltaic panel arrays”, *Energy Conversion and Management* (2006)

- [13] Jonathan Leloux, Luis Narvarte, David Trebosc, "Review of the performance of residential PV systems in France", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.16, (2011), pp. 1369 - 137
- [14] S. Mekhilef, R.Saidur, S. Mekhilef.R, "Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.16 (2012), pp. 2920-2925.
- [15] Institut National de l'Energie Solaire (INES), "Meteorological, Optical and Thermal Histories for Energy Rating in Photovoltaic."
- [16] G. Mohand Kaci, A. Mahrane, M. Chikh, A Oulebsir, "Etude comparative des performances de modules photovoltaïques de différentes technologies dans un climat méditerranéen" *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 17, (2014), pp.291-300.
- [17] : M. Piliougine, J. Carretero, M. Sidrach-de-Cardona, D. Montiel & P. Sánchez-Friera, "Comparative analysis of the dust losses in photovoltaic modules with different cover glasses", 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, September 2008.

IX- ANNEXES

IX.1 Annexe 1 : Protocole de suivi du nettoyage des modules PV

Légende :

Vert : Le nettoyage a été effectué

Rouge : Le nettoyage non effectué

				Janvier			Mois de février 2015																											
				J	V	S	D	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	
Technologies	Noms	Voies	Freq / type nettoyage	29	30	31	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
Poly - type 1	SUN020	Voie13	Hebdomadaire/ à eau	Vert					Vert							Vert								Vert										
	SUN021	Voie18	Journalier/ à eau	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Rouge	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Rouge	Rouge	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	
	SUN022	Voie22	Journalier/ à sec	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Rouge	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Rouge	Rouge	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	
	SUN023	Voie23	Hebdomadaire/ à sec	Vert						Vert						Vert								Vert								Vert		
	SUN024	Voie21	Non nettoyé	Vert						Vert						Vert								Vert								Vert		
Poly - type 2	VIC007	Voie12	Hebdomadaire/ à eau	Vert						Vert						Vert								Vert								Vert		
	VIC008	Voie17	Journalier/ à eau	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Rouge	Vert	Rouge	Rouge	Vert																	
Amorphe	SHA018	Voie15	Hebdomadaire/ à eau	Vert						Vert						Vert								Vert								Vert		
	SHA019	Voie20	Journalier/ à eau	Vert						Vert						Vert								Vert								Vert		
Mono	VIC003	Voie11	Hebdomadaire/ à eau	Vert						Vert						Vert								Vert								Vert		
	VIC004	Voie16	Journalier/ à eau	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Rouge	Vert	Rouge	Rouge	Vert																	

Mise en place et exécution d'un protocole d'étude et de suivi du nettoyage de modules photovoltaïques en zone très poussiéreuse : cas de la région soudano-sahélienne

IX.2 Annexe 2 : Puissance moyenne journalière de nettoyage à eau avec éponge

Date/ module	Puissance moyenne journalière(W)			Ratios	
	SUN021 (nettoyage journalier)	SUN020 (nettoyage hebdomadaire)	SUN024 (module non nettoyé)	Ratio1	Ratio2
29/01/2015	35,083	35,473	33,605	0,958	0,947
30/01/2015	35,290	35,456	34,191	0,969	0,964
31/01/2015	33,177	32,682	31,900	0,962	0,976
01/02/2015	26,312	26,183	25,548	0,971	0,976
02/02/2015	38,613	38,347	36,917	0,956	0,963
03/02/2015	31,269	30,300	29,431	0,941	0,971
04/02/2015	31,237	29,688	28,786	0,922	0,970
05/02/2015	32,707	32,112	30,384	0,929	0,946
06/02/2015	32,039	31,724	31,304	0,977	0,987
07/02/2015	32,766	32,436	31,711	0,968	0,978
09/02/2015	31,142	31,046	30,670	0,985	0,988
10/02/2015	33,377	32,271	31,516	0,944	0,977
11/02/2015	30,130	29,987	29,389	0,975	0,980
12/02/2015	27,596	27,451	25,417	0,921	0,926
13/02/2015	26,887	27,074	25,039	0,931	0,925
16/02/2015	30,700	28,887	27,723	0,903	0,960
17/02/2015	28,892	27,599	25,581	0,885	0,927
18/02/2015	33,250	32,014	29,326	0,882	0,916
19/02/2015	28,341	28,590	25,113	0,886	0,878
20/02/2015	18,542	18,253	15,933	0,859	0,873
21/02/2015	19,697	18,985	16,795	0,853	0,885
22/02/2015	24,775	23,996	21,470	0,867	0,895

Mise en place et exécution d'un protocole d'étude et de suivi du nettoyage de modules photovoltaïques en zone très poussiéreuse : cas de la région soudano-sahélienne

23/02/2015	31,532	30,314	26,975	0,856	0,890
24/02/2015	35,534	33,877	30,549	0,860	0,902
25/02/2015	34,446	33,171	29,465	0,855	0,888
26/02/2015	31,723	31,950	27,050	0,853	0,847
27/02/2015	29,397	29,262	24,914	0,848	0,851
28/02/2015	30,782	30,700	25,686	0,834	0,837
Moyenne	30,544	29,994	27,943	0,912	0,929

IX.3 Annexe 3 : Energie moyenne journalière de nettoyage à eau avec éponge

	Energie(Wh)		
Date/modules	SUN021 (nettoyage journalier)	SUN020 (nettoyage hebdomadaire)	SUN024 (module non nettoyé)
29/01/2015	315,053	318,419	305,164
30/01/2015	287,615	290,335	276,811
31/01/2015	275,460	273,820	267,252
01/02/2015	104,263	103,692	102,860
02/02/2015	176,019	175,205	171,572
03/02/2015	144,006	138,833	135,006
04/02/2015	154,123	143,508	139,117
05/02/2015	153,562	149,549	141,558
06/02/2015	148,826	147,335	144,338
07/02/2015	154,106	151,092	145,113
09/02/2015	290,113	287,717	154,355
10/02/2015	154,307	148,558	144,909
11/02/2015	195,564	194,116	191,430
12/02/2015	243,557	242,321	225,945
13/02/2015	257,856	258,495	238,012
16/02/2015	275,351	274,829	251,902
17/02/2015	279,200	270,253	250,794
18/02/2015	313,059	300,360	279,740
19/02/2015	255,385	260,845	227,272
20/02/2015	124,600	130,399	109,845
21/02/2015	107,893	107,181	92,294
22/02/2015	223,892	218,651	194,525
23/02/2015	317,773	305,484	272,951
24/02/2015	245,471	232,676	209,573

Mise en place et exécution d'un protocole d'étude et de suivi du nettoyage de modules photovoltaïques en zone très poussiéreuse : cas de la région soudano-sahélienne

25/02/2015	305,669	295,405	264,791
26/02/2015	321,969	324,736	275,119
27/02/2015	290,856	289,488	246,570
28/02/2015	307,294	306,490	259,564
Total	6422,842	6339,794	5718,382

Mise en place et exécution d'un protocole d'étude et de suivi du nettoyage de modules photovoltaïques en zone très poussiéreuse : cas de la région soudano-sahélienne

IX.4 Annexe 4 : Puissance moyenne journalière de nettoyage à sec avec éponge

Date /module	Puissance moyenne journalière(W)			Ratios	
	SUN022 (nettoyage journalier)	SUN023 (Nettoyage hebdomadaire)	SUN024 (module non nettoyé)	Ratio1	Ratio2
29/01/2015	33,760	35,192	33,605	0,995	0,955
30/01/2015	34,409	36,136	34,191	0,994	0,946
31/01/2015	35,356	34,101	31,900	0,902	0,935
01/02/2015	30,672	27,033	25,548	0,833	0,945
02/02/2015	40,958	39,337	36,917	0,901	0,938
03/02/2015	33,853	31,110	29,431	0,869	0,946
04/02/2015	34,130	30,550	28,786	0,843	0,942
05/02/2015	33,008	33,302	30,384	0,921	0,912
06/02/2015	35,294	32,564	31,304	0,887	0,961
07/02/2015	35,425	33,294	31,711	0,895	0,952
09/02/2015	34,202	31,822	30,670	0,897	0,964
10/02/2015	33,403	33,657	31,516	0,944	0,936
11/02/2015	30,857	31,154	29,389	0,952	0,943
12/02/2015	27,027	28,560	25,417	0,940	0,890
13/02/2015	26,504	27,638	25,039	0,945	0,906
16/02/2015	29,882	31,035	27,723	0,928	0,893
17/02/2015	28,176	28,801	25,581	0,908	0,888
18/02/2015	32,434	32,928	29,326	0,904	0,891
19/02/2015	27,553	29,623	25,113	0,911	0,848
20/02/2015	17,673	19,279	15,933	0,902	0,826
21/02/2015	19,147	19,821	16,795	0,877	0,847
22/02/2015	23,941	24,416	21,470	0,897	0,879
23/02/2015	30,247	30,724	26,975	0,892	0,878
24/02/2015	33,845	34,875	30,549	0,903	0,876

Mise en place et exécution d'un protocole d'étude et de suivi du nettoyage de modules photovoltaïques en zone très poussiéreuse : cas de la région soudano-sahélienne

25/02/2015	33,571	34,226	29,465	0,878	0,861
26/02/2015	30,623	32,540	27,050	0,883	0,831
27/02/2015	28,341	29,866	24,914	0,879	0,834
28/02/2015	29,167	31,320	25,686	0,881	0,820
Moyenne	30,838	30,889	27,943	0,906	0,902

IX.5 Annexe 5 : Energie moyenne journalière de nettoyage à sec avec éponge

	Energie(Wh)		
Date/ module	SUN022 (nettoyage journalier)	SUN023 (nettoyage hebdomadaire)	SUN024 (module non nettoyé)
29/01/2015	304,1001643	307,105	305,164
30/01/2015	278,531	292,481	276,811
31/01/2015	284,596	280,685	267,252
01/02/2015	111,095	106,243	102,860
02/02/2015	183,929	179,261	171,572
03/02/2015	159,914	142,588	135,006
04/02/2015	165,997	147,714	139,117
05/02/2015	256,158	155,210	141,558
06/02/2015	165,017	150,051	144,338
07/02/2015	162,326	152,349	145,113
09/02/2015	170,783	165,556	154,355
10/02/2015	153,583	154,742	144,909
11/02/2015	210,253	201,321	191,430
12/02/2015	238,553	252,089	225,945
13/02/2015	251,922	262,675	238,012
16/02/2015	268,057	278,382	251,902
17/02/2015	271,656	277,260	250,794
18/02/2015	304,718	308,853	279,740
19/02/2015	247,788	267,595	227,272
20/02/2015	127,391	129,967	109,845
21/02/2015	108,370	108,918	92,294
22/02/2015	216,126	221,072	194,525
23/02/2015	304,776	309,458	272,951
24/02/2015	232,234	239,235	209,573

Mise en place et exécution d'un protocole d'étude et de suivi du nettoyage de modules photovoltaïques en zone très poussiéreuse : cas de la région soudano-sahélienne

25/02/2015	297,798	303,696	264,791
26/02/2015	311,566	331,979	275,119
27/02/2015	281,914	295,545	246,570
28/02/2015	297,140	311,382	259,564
Total	6366,292	6333,412	5718,382