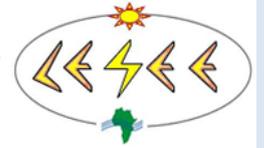




**ZiE**  
Fondation ZiE

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement  
International Institute for Water and Environmental Engineering



***Conception, montage et expérimentation  
du 1er pilote technologique des modules  
PV flottants et anti-évaporatifs :  
Les NENU-PV***

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU  
ET DE L'ENVIRONNEMENT**

**OPTION : ENERGIE ET PROCEDES INDUSTRIELS**

Présenté et soutenu publiquement le : 26 Juin 2012 par

**Cheick Ady Mohamed Sakir TRAORE**

Travaux dirigés par : **Dr. Yao AZOUMAH**

**Ing. Léandre ONADJA**

**Jury d'évaluation du mémoire :**

Président : Albert SUNNU

Membre : Ahmed BAGRE

Membre: Justin BASSOLE

Membre : Léandre ONADJA

Promotion 2011-2012

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à l'endroit du Dr Yao AZOUMAH qui a bien voulu nous faire confiance, non seulement par l'encadrement de ce mémoire, mais aussi par les marques de confiance qu'il nous a faites en nous permettant de participer à certaines activités connexes du LESEE.

J'exprime ma profonde gratitude à mon encadreur immédiat en la personne de Léandre ONADJA pour son suivi, sa disponibilité et sa collaboration ; choses sans lesquelles ce mémoire n'aurait pas été finalisé.

Je remercie également tout le personnel du LESEE qui n'a jamais manqué d'apporter des critiques constructives sur le travail qui a été accompli. Puisse Henri KOTTIN, Justin BASSOLE, Madieumbe GAYE, Patrice DANGANG, Baptiste LAVIGNE, Daniel YAMEGUEU, Ahmed SANKARA, Gildas TAPSOBA, Anselme RUNDUNGU, Ulrich COMPAORE, David TSUANYO, Lassina SANOU et Pauline KANKALA recevoir l'expression de ma profonde reconnaissance.

Aussi je tiens à dire merci à Mintou SIDIBE qui à sa façon a contribué à nous faciliter un bon séjour au LESEE. Sois en remerciée.

Ensuite ma reconnaissance va à l'endroit de tous mes camarades stagiaires du LESEE qui ont toujours fait montre d'une disponibilité et d'un état d'esprit qui ont permis d'avoir un atmosphère agréable au cours de ces quatre mois de stage.

Enfin mon dernier mot va à l'endroit de ma famille qui est toujours restée présente dans les bons comme les moins bons moments.

## **Conception, montage et expérimentation du 1er pilote technologique des modules PV flottants et anti-évaporatifs : les NENU-PV**

---

### **RESUME**

Ce mémoire présente les résultats de la conception, du montage et de l'expérimentation du 1er pilote technologique des modules PV flottants et anti-évaporatifs dénommé les NENU-PV. La mission assignée à ce pilote est de produire de l'énergie électrique en même temps qu'il sert de couverture anti-évaporative. Un cahier de charges a permis de définir et de concevoir les caractéristiques des modules flottants NENU. Fait de résine, le module flottant nénuphar est surmonté d'un cadre métallique, permettant d'accueillir les modules PV. Parallèlement au montage du pilote NENU-PV, des bacs d'eau ont été construits pour caractériser les performances électriques et anti-évaporatives du nouveau produit. L'ensemble formé de modules NENU-PV porté par un bac d'eau et alimentant des charges résistives, a constitué le banc d'essai qui a servi à caractériser les performances de ce produit. Les performances électriques déterminées se rapprochent de celles des modules PV installés avec angle d'inclinaison quoique les modules NENU soient disposés de façon horizontale sur la surface de l'eau des bacs. Par ailleurs, le profil des performances anti-évaporatives qui s'est dégagé au bout de quelques jours de mesure s'est révélé assez intéressant. Ceci a permis de tester le premier prototype des NENU-PV à l'échelle réelle et de dégager des pistes d'amélioration afin de doter les NENU-PV d'une singularité spécifique.

Mots clés : Pilote, Ilot NENU-PV, cahier de charges, Banc d'essai, Performances.

## **ABSTACT**

This master thesis presents the results of the design, assembly and testing of the first technology pilot PV modules and floating-NENU anti-evaporative called the PV. The mission assigned to this driver is to produce electrical energy at the same time it serves as blanket evaporative. A set of specifications has helped to define and develop the characteristics of floating modules NENUPHAR. Made of resin, the floating module NENUPHAR is topped by a metal frame, to accommodate the PV modules. In same time, to the mounting of the driver NENU-PV, water tanks were built to characterize the electrical performance and anti-evaporative of this new product. The set formed by NENU-PV modules carried by a tray of water and feeding resistive loads has been the test bed that was used to characterize the performances of this product. Electrical performances defined are close to those of PV modules installed with angle although NENU-PV modules are arranged horizontally on the surface of the water tanks. In addition, the profile of anti-evaporative performance that emerged after several days of measurement proved to be quite interesting. This allowed us to test the first prototype of NENU-PV to scale and identify areas for improvement in order to provide the PV-NENU a specific singularity.

Key words: pilot, NENU-PV Island, set off specifications, test bench, performances

## **Liste des abréviations**

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

LESEE : Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie

PV : Photovoltaïque

## Table des matières

I. INTRODUCTION.....	4
1. Contexte .....	4
2. Problématique.....	4
3. Objectifs et démarches .....	5
4. Présentation de la structure d'accueil : LESEE .....	5
II. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE .....	7
1. Généralités.....	7
2. Descriptif des pilotes existants.....	7
a) Pilotes proches de NENU-PV .....	7
b) Autres pilotes utilisant la technologie PV.....	8
c) Iles solaires.....	9
3. Descriptif synoptique du Pilote NENU-PV .....	10
4. Synthèse bibliographique .....	11
5. Conclusion partielle .....	12
III. Fiche technique du pilote NENU-PV .....	13
1. Conception des modules NENU .....	13
a) Cahier de charge .....	13
b) Choix technologiques .....	13
c) Visualisation du concept.....	17
2. Commande de composants et montage du prototype.....	17
a) Commande des composants .....	17
b) Montage du prototype NENU-PV.....	18
IV. Caractérisation de NENU-PV .....	20
1. Description du banc d'essai .....	20
2. Caractérisation des performances électriques .....	21
3. Caractérisation des performances anti-évaporatives.....	24
V. Evaluation des performances du pilote NENU.....	28
1. Performances électriques.....	28
a) Mesure.....	28

## Conception, montage et expérimentation du 1er pilote technologique des modules PV flottants et anti-évaporatifs : les NENU-PV

---

b) Résultat .....	29
c) Discussion et analyse.....	31
2. Performances anti-évaporatives .....	33
a) Mesure.....	33
b) Résultat .....	34
c) Discussion et analyse.....	34
VII. PERSPECTIVES.....	37
ANNEXES.....	39

## **LISTE DES FIGURES**

Figure 1 : Pilote de SOLARIS.....	8
Figure 2 : Pilote de SUNENGY.....	8
Figure 3: Pilote de GEORGES JAROSLAV.....	9
Figure 4: Pilote de LAING NIKOLAUS.....	9
Figure 5 : Pilote de SOLARIS.....	10
Figure 6 : Pilote de NOLARIS.....	10
Figure 7 : Schéma de justification de la forme des modules NENU.....	14
Figure 8: Coupe d'un module NENU.....	17
Figure 9: Schéma de conception d'un ilot NENU-PV.....	17
Figure 10: Image de modules NENU montés d'une cornière métallique.....	18
Figure 11: Image d'un ilot NENU.....	19
Figure 12 : Image d'un ilot NENU-PV porté par un bac d'eau.....	20
Figure 13: Image des charges résistives.....	21
Figure 14 : Schéma de montage du banc d'essai.....	22
Figure 15: Image du tube PVC dans le bac.....	26
Figure 16: Courbe caractéristique de l'ilot NENU.....	28
Figure 17: Courbe de puissance de l'ilot NENU.....	29
Figure 18: Courbe de puissance/données du constructeur.....	30
Figure 19: Comparaison de puissance pour R=30 ohms.....	31
Figure 20: Comparaison de puissance pour R= 40 Ohms.....	32
Figure 21: Comparaison des puissances maximales.....	33

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1: Etude comparative entre pilotes.....	11
Tableau 2 : fonctions du cahier de charges.....	13
Tableau 3: Comparaison des caractéristiques du plastique et de la résine.....	15
Tableau 4 : Liste du matériel de mesure.....	22
Tableau 5: puissances normalisées de l'ilot.....	29
Tableau 6: Puissances max./données constructeur.....	30
Tableau 7: Volume d'eau évaporé.....	34
Tableau 8: quantité d'eau gagnée.....	34

## **I. INTRODUCTION**

### **1. Contexte**

Le tissu industriel des pays du sud jadis moribond connaît de nos jours un renouveau avec l'avènement des industries d'extraction minière. Ces industries, pour le cas du BURKINA FASO sont étroitement tributaires de l'énergie électrique nécessaire à leur fonctionnement, mais aussi de l'eau qui intervient à plusieurs niveaux de l'extraction du minerai. C'est alors que des retenues d'eau ont été construites par ces miniers pour satisfaire les besoins en eau dans ces zones à faible pluviométrie. Mais dans certaines zones comme le sahel avec un gisement solaire des plus importants estimé entre 4 et 7 KWh/m<sup>2</sup>/jour[1], une grande partie de l'eau stockée dans des réservoirs à ciel ouvert est perdue par évaporation.

Dès lors il s'est avéré impérieux pour ces industriels de pencher sur des mesures susceptibles de solutionner ces problèmes.

A la faveur du concours d'idée d'ingénieur 2011, une solution innovante et originale, portée sur un système anti-évaporatif capable de produire de l'énergie électrique à partir du solaire, a été proposée pour réduire ces pertes par évaporation : les Nénuphars Photovoltaïques en abrégé NENU-PV. Ce sont des couvertures flottantes qui en plus de présenter des propriétés anti-évaporatives, présentent des propriétés de production d'électricité par conversion de l'énergie solaire.

### **2. Problématique**

Le contexte socio-économique décrit ci- haut fait cas d'un environnement industriel minier très énergivore et subissant de plein fouet les conséquences de l'évaporation des retenues d'eau construites pour le traitement des minerais. Aussi le défi est de trouver un seul et même produit capable de résoudre ces deux problématiques de façon concomitante.

## **Conception, montage et expérimentation du 1er pilote technologique des modules PV flottants et anti-évaporatifs : les NENU-PV**

---

Inéluctablement, les interrogations qui se dégagent sont entre autres, de savoir s'il n'existe pas déjà un produit sur le marché pouvant répondre à ce besoin. Sinon est-il techniquement possible de prétendre concevoir un tel produit ? Si oui, sur quels critères technologiques s'appuyer pour doter ce produit d'une facilité et une commodité d'utilisation. La recherche des réponses à ces interrogations permettra de dessiner les contours du premier prototype des NENU-PV.

### **3. Objectifs et démarches**

En conjuguant les exigences liées à l'installation de modules photovoltaïques, l'objectif du pilote NENU-PV est de servir de source de production d'énergie électrique en même temps qu'il constituera une couverture anti-évaporative pour les retenues d'eau auxquelles il sera consacré. Aussi la mission première de ce travail sera de monter le premier prototype de ce pilote en dimension réelle et d'en déterminer les performances électriques et anti-évaporatives. Pour ce faire, le travail a été réalisé suivant la démarche suivante :

- 1<sup>ère</sup> étape : Faire une étude bibliographique détaillée autour des modules PV flottants et réellement dégager l'originalité de ce concept NENU-PV.
- 2<sup>ème</sup> étape : Réaliser un banc d'essai et Commander les différents éléments entrant dans la mise en œuvre du premier pilote de NENU-PV (à faire en parallèle à l'étude bibliographique)
- 3<sup>ème</sup> étape : Faire l'assemblage des divers composants et monter le 1<sup>er</sup> pilote
- 4<sup>ème</sup> étape : Caractériser les performances anti-évaporatives et électriques de ce 1<sup>er</sup> pilote à travers un protocole préalablement défini et validé au LESEE.

### **4. Présentation de la structure d'accueil : LESEE**

Le Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE) du 2iE, dirigé par Dr Yao AZOUMAH, est créé en novembre 2008. L'équipe de recherche actuelle est composée de trois (03) enseignants chercheurs, un enseignant-doctorant, trois (03) doctorants, sept(07)

5

ingénieurs de recherche, deux (02) techniciens de laboratoire, et des stagiaires internes et externes au 2iE (en moyenne une vingtaine par an).

- **Objectif :** Contribuer à l'innovation industrielle dans le domaine du solaire par une production et une utilisation rationnelle d'énergies électrique /thermique en Afrique.
- **Axes de recherche :** Les orientations de recherche dudit laboratoire sont regroupées en trois grands axes :

***Axe 1 : Étude 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.

***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.

## **II. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

### **1. Généralités**

Une dizaine de pilote a été répertoriée dans le cadre de cette recherche bibliographique. Les raisons qui ont milité à la conception de ces différents pilotes se trouvent tout d'abord dans l'intention d'utiliser le solaire comme source d'énergie alternative à l'énergie fossile qu'est le pétrole. Les centrales solaires, nécessitant de grandes surfaces, entrent souvent en conflit avec les terres cultivables. Aussi les retenues d'eau ont été sollicitées pour accueillir ces centrales solaires à travers des plateformes flottantes. Les types d'installation recensés sur ces surfaces aquatiques sont aussi bien les centrales solaires thermiques que les centrales solaires photovoltaïques. Par ailleurs ces installations auront permis de recycler des retenues d'eau en fin de vie.

### **2. Descriptif des pilotes existants**

#### **a) Pilotes proches de NENU-PV**

Ces pilotes à l'instar de NENU-PV constituent une source de production d'énergie électrique en même temps qu'ils servent de dispositifs anti-évaporatifs. Ces pilotes utilisent la technologie photovoltaïque et sont assemblables à l'infini. Ils se caractérisent par des performances électriques remarquables dues aux systèmes de suivi continu de la position du soleil. Cependant les systèmes de tracking du soleil sont différents.

Le pilote développé par Solaris SYNERGY utilise des surfaces curvilignes pour réfléchir les rayonnements sur une rampe médiane portant des cellules PV[2]. Celui de SUNENGY utilise un miroir de Fresnel et une surface curviligne aluminé pour réfléchir le rayonnement solaire au point focal du miroir recouvert par des cellules PV[3]. Ainsi ces pilotes utilisent une très faible quantité de cellules photovoltaïques avec des performances électriques intéressantes. Par ailleurs les performances anti-évaporatives semblent être reléguées au second plan.

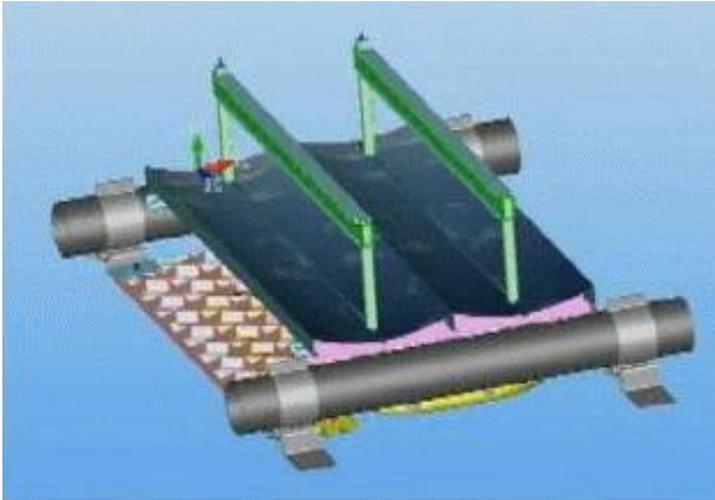


Figure 1 Pilote de SOLARIS

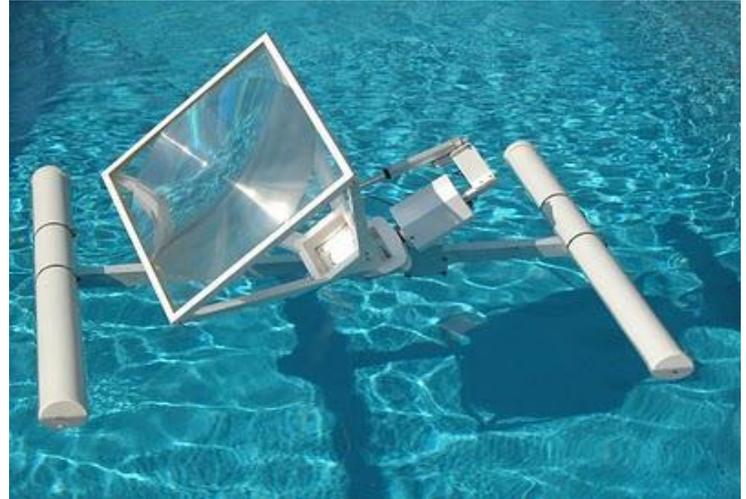


Figure 2 :Pilote de SUNENGY

#### *b) Autres pilotes utilisant la technologie PV*

De nombreux pilotes utilisant la technologie PV ont été répertoriés. Mais ces derniers diffèrent de celui des NENU-PV sur bien de critères.

Le pilote de GEORGES JAROSLAV comporte un dôme motorisé qui permet au module PV qu'il porte de suivre la position du soleil. Par ailleurs la lourdeur de son dispositif ne lui confère pas une facilité d'utilisation[4].

Les pilotes développés par YEKUTIELY DAVID se caractérisent par une simplicité singulière. Ces trois plateformes différentes sont des variantes de pellicules photovoltaïques montées sur une géo-membrane. Ceci permet d'avoir des pilotes légers avec des perspectives intéressantes de performances anti-évaporatives[5].

Aussi les pilotes comme ceux développés par PAN GE et ALLAN YEOMANS utilisent des systèmes de réflexion par miroirs sur des cellules PV[6]. Cependant la stabilité et la commodité d'utilisation de ces pilotes sont un fait [7].

Enfin le pilote développé par LAING JOHANNES NIKOLAUS focalise au moyen de concentrateurs linéaires le rayonnement solaire pour l'utiliser à travers des convertisseurs d'énergie comme les cellules PV[8].

Ces pilotes se caractérisent par la lourdeur du dispositif de leurs composants qui engendre des difficultés de liaison entre les unités d'un même pilote. Les figures suivantes présentent les images de quelques cités précédemment.

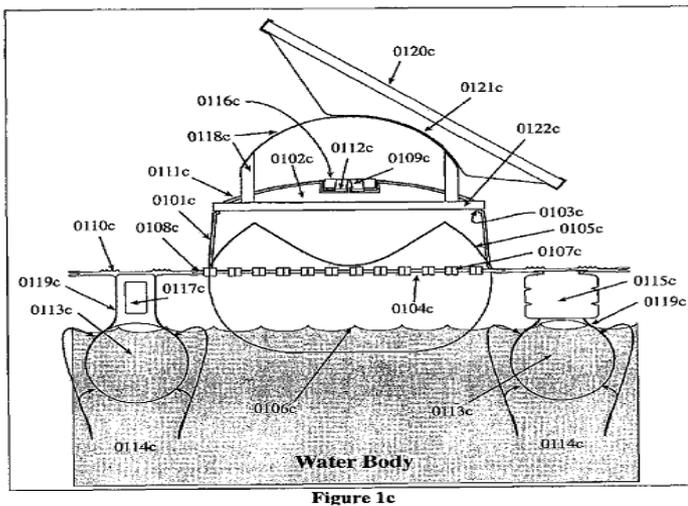


Figure 3: Pilote de GEORGES JAROSLAV

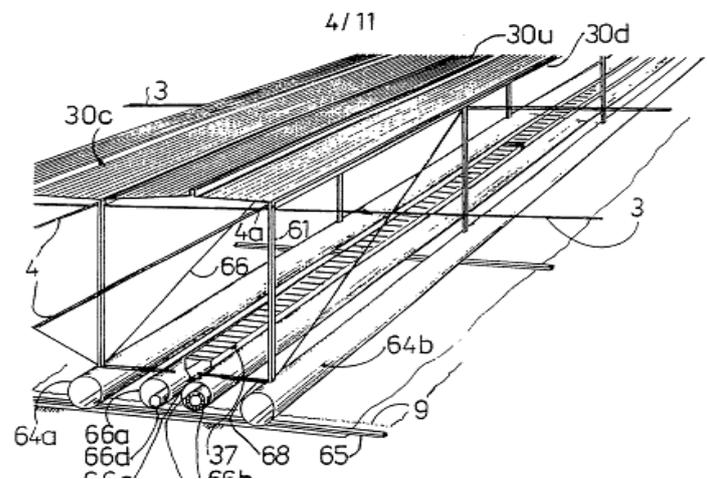


Figure 4: Pilote de LAING NIKOLAUS

### c) Iles solaires

Du nombre de ces pilotes il y'a un pilote développé par SOLARIS SYNERGY et celui développé par la start-up suisse NOLARIS. Le pilote de SOLARIS utilise la technologie photovoltaïque pendant que celui de de NOLARIS utilise la technologie du solaire thermique[9]. Ils se distinguent par une plateforme pré dimensionnée pour accueillir un nombre bien défini de modules PV pour l'un et de capteurs pour l'autre. Ils se caractérisent par un système de tracking composé d'un système de poulie et de cordes[2]. Leurs formes n'augurent pas une adaptabilité à tous les types de cours d'eau quoique les performances électriques semblent intéressantes. Les performances anti-évaporatives quant à elles ne sont pas spécifiées.

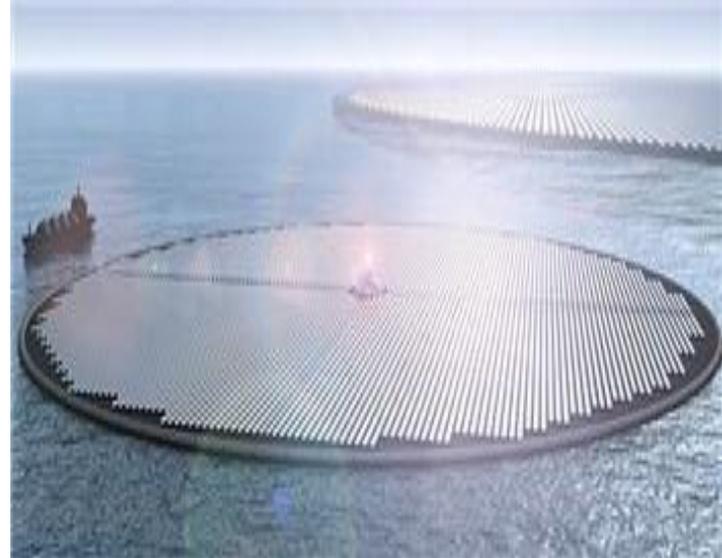
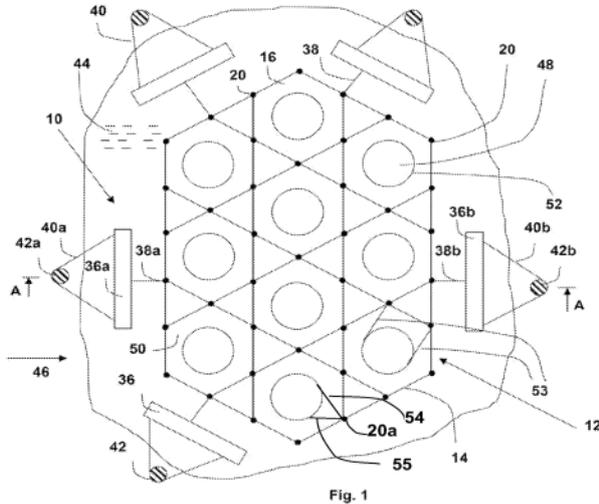


Figure 5 : Pilote de SOLARIS

Figure 6 : Pilote de NOLARIS

### 3. Descriptif synoptique du Pilote NENU-PV

Un îlot NENU-PV est un assemblage de 7 modules flottants hexagonaux de même dimension dont six sont surmontés de panneaux photovoltaïques. Cependant seuls 6 de ces hexagones seront surmontés des modules PV, le septième devant servir de boîtier de liaison des différents modules de l'îlot. Les modules NENU sont conçus en résine et renferment une chambre à air qui leur confère une totale flottabilité. Par ailleurs les modules hexagonaux sont surmontés d'un cadre métallique qui leur permet d'accueillir des modules photovoltaïques de 50 Wc. Ainsi les modules photovoltaïques seront montés sur des modules NENU sans angle d'inclinaison.

L'îlot est maintenu stable grâce à un contre poids déposé au fonds du bassin qui sera solidaire à l'îlot.

#### 4. Synthèse bibliographique

Dans le cadre de cette étude une dizaine de pilotes photovoltaïques aquatiques a été répertoriée. Aussi les pilotes existants sont référencés en annexe et feront l'objet d'une étude comparative à travers les critères que sont la simplicité, les performances électriques et anti-évaporatives, la facilité de montage et la facilité d'entretien.

Le tableau suivant dresse une étude comparative des différents pilotes y compris celui de NENU-PV.

*Tableau 1: Etude comparative entre pilotes*

		Critères						
		Technologie	Performances anti-évap.	Tracking du soleil	Simplicité du concept	stabilité	Facilité d'entretien	Facilité de montage
<b>Pilotes</b>	<b>NENU-PV</b>	<b>PV</b>	= +	-	=	=	=	=
	<b>SOLARIS SYNERGY</b>	<b>PV à conc.</b>	? ?	+ ?	= -	+ -	= -	= +
	<b>NOLARIS</b>	<b>Therm.</b>	?	+	-	+	-	-
	<b>YEKUTIELY DAVID</b>	<b>PV PV PV</b>	? ? ?	+ + +	+ + -	+ + -	+ + -	? ? ?
	<b>SUNENGY</b>	<b>PV à conc.</b>	?	+	-	+		+
	<b>Pan Ge</b>	<b>PV à conc.</b>	?	+	-	-	-	-
	<b>LAING NIKOLAUS</b>	<b>PV à conc.</b>	?	+	-	-	-	-
	<b>ALLAN J. YEOMANS</b>	<b>PV conc.</b>	?	+	-	-	-	-
	<b>GEORGE JAROSLAV</b>	<b>PV</b>	?	+	-	-	-	=

LEGENDE

- Les caractéristiques des NENU-PV seront prises comme référence
- + : indique que le critère dont il s'agit est supérieur à celui des NENU-PV
- - : indique que le critère de comparaison est inférieur à celui des NENU-PV
- ? : indique qu'il n'y a aucune information sur les pilotes pour les critères correspondants.
- = : indique la similarité ou le même degré de difficulté pour ce critère.
- PV à conc : système photovoltaïque à concentration
- Therm.: solaire thermique

**5. Conclusion partielle**

Au vu de cet état des lieux il ressort clairement que bien de pilotes à l'instar des NENU-PV ont été développés pour produire de l'énergie électrique à partir de cellules photovoltaïques montées sur des plateformes aquatiques. Par ailleurs seuls quelques pilotes à l'instar de NENU-PV semblent être préoccupés par le phénomène de perte d'eau dû à l'évaporation.

Néanmoins il ressort que l'accent est d'abord porté sur les performances électriques des pilotes vu que tous les pilotes à l'exception de NENU-PV sont dotés d'un système de suivi du soleil. Aussi la disponibilité de pellicules photovoltaïques confère à certains pilotes une simplicité singulière comme ceux développés par **YEKUTIELY DAVID** contrairement aux pilotes qui utilisent des modules déjà montés et donc plus lourds.

Par ailleurs la spécificité des NENU-PV pourrait se situer dans son rôle anti-évaporatif. Bien que tous les pilotes jouent par dessein ou non un rôle anti-évaporatif, aucun n'arrive à quantifier le volume d'eau gagné du fait de l'utilisation des différents pilotes. Aussi NENU-PV pourra s'orienter dans ce sens de façon à pouvoir chiffrer non seulement les performances électriques mais aussi celles anti-évaporatives tout en alliant certains critères fondamentaux comme la facilité de montage, la stabilité et surtout un prix de revient très acceptable.

### III. Fiche technique du pilote NENU-PV

#### 1. Conception des modules NENU

##### a) Cahier de charge :

Les exigences imposées par le cahier de charge ont servi de vecteur directeur à la conception du pilote NENU-PV. Les fonctions assignées au pilote et leur critère d'appréciation sont regroupés dans le tableau suivant :

*Tableau 2 : Fonctions du cahier de charges*

Fonction	Enoncé de la fonction	Critères d'application	Niveau d'exigence
<b>FS1</b>	Permettre à l'utilisateur de réduire ces pertes par évaporation	➤ Taux de réduction de l'évaporation	✚ >85%
<b>FS2</b>	Permettre à l'utilisateur de consommer de l'énergie solaire	➤ Efficacité système ➤ Fiabilité du système	✚ 13,5% ✚ Moyenne
<b>FS3</b>	L'utilisateur doit pouvoir l'entretenir facilement	➤ Accessibilité pour entretien ➤ Taux de nettoyage	✚ Réservé aux spécialistes ✚ Régulier
FC1	Doit être stable sur la retenue d'eau	➤ Stabilité	✚ Résister aux vents de plus de 80 km/h
FC2	Doit être sans danger pour l'utilisateur	➤ Niveau de protection	✚ IP : 67
FC3	Doit être d'un prix raisonnable	➤ Prix de vente	✚ < 5€/Wc installé
FC4	Doit être d'une installation facile	➤ Modularité ➤ Personnel exigé	✚ Pièces séparables ✚ Personnel qualifié

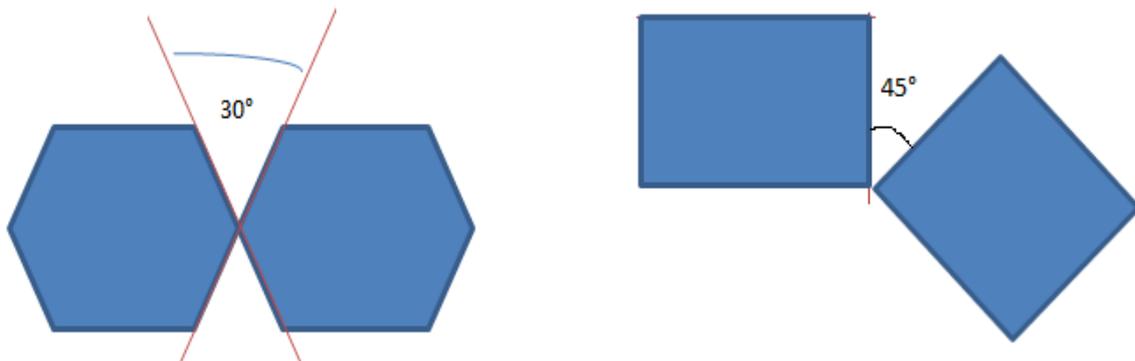
##### b) Choix technologiques

Les différents choix technologiques opérés se veulent les solutions aux équations posées par le cahier de charge.

✚ Forme des modules

Le choix de la forme hexagonale des modules est loin d'être fortuit. Il a été opéré en ayant en vue la facile connectivité des modules entre eux. En effet cette forme de modules offre une possibilité pour chaque encoche de connexion de recueillir deux autres modules qui seront fixés sur le premier avec une inclinaison maximale de  $30^\circ$ . Cela laisse augurer d'une adéquation des modules NENU avec des retenues d'eau de diverses géométries.

Par ailleurs une autre option aurait été de choisir des formes plus simplistes comme le rectangle ou le carré. Mais de toute évidence ces formes de modules ne seraient pas appropriées pour beaucoup de types de cours d'eau. Contrairement aux modules à forme hexagonale qui n'ont besoin que d'une rotation d'un angle d'au plus  $30^\circ$  pour être liés entre eux, les modules carrés ou rectangles nécessiteraient une rotation d'un angle d'au plus  $45^\circ$  ; d'où des conditions de liaison plus difficiles.



*Figure 7 : Schéma de justification de la forme des modules NENU*

En définitive, l'hexagone se définirait comme une figure optimale. Non seulement elle permet de paver le plan, mais, de plus, elle correspond à un optimum iso périmétrique, c'est-à-dire que parmi les figures régulières qui permettent de paver un plan, l'hexagone correspond à la plus grande surface possible pour un périmètre donné. Aucune autre figure permettant de paver l'espace n'utilise moins de matériau que celle adoptée par les géométries à forme hexagonale[10]. Par ailleurs les modules NENU ne s'imbriquant pas de façon parfaite, ils offrent des brèches aux rayons lumineux pour la survie d'espèces aquatiques animaux et

## Conception, montage et expérimentation du 1er pilote technologique des modules PV flottants et anti-évaporatifs : les NENU-PV

végétaux. Donc, même pour une surface aquatique intégralement occupée par les modules NENU, la vie des espèces aquatiques ne s'en trouverait pas menacée.

### ✚ Choix du matériau de conception des modules

La nécessité de moulage de matériau pour la conception de modules flottants a conduit à tabler sur deux types de matériaux que sont le plastique (polystyrène) et la résine (polyuréthane).

Le tableau suivant dresse une comparaison entre ces deux polymères qui sont très utilisés dans l'industrie automobile.

*Tableau 3: Comparaison des caractéristiques du plastique et de la résine*

	Plastique	Résine
Utilisation	Très générale	Modèles originaux
Mise en œuvre	Industrielle	Artisanale
Type de moule	Métal et presse d'injection	Silicone et moulage manuel sous vide
Type de production	Production de masse vendue bon marché	Production de niche vendue plus chère
Amortissement du coût d'outillage	Sur une grande quantité produite	Sur une petite quantité produite
Nombre limite de tirage des moules	Tirage quasi illimité	50 exemplaires par moule
Difficultés de transformation	souple	Plus dur à travailler, plus épais et plus cassant que le plastique
Toxicité	Non toxique	Toxicité très faible
Autres spécificités	Durée de vie d'environ 1000 ans.	Pas vraiment défini

En somme, il ressort que sur bien de critères le choix du plastique s'avère plus judicieux que celui de la résine. Cependant les difficultés pour trouver un maquettiste pouvant produire les modules plastiques dans le laps de temps imparti a contraint à utiliser la résine pour la fabrication et le test des premiers prototypes.

#### Choix du type des modules PV

Le pilote à développer ayant une double vocation anti-évaporative et production d'électricité, il se devait de se focaliser sur une source d'énergie disponible et rependu comme l'énergie solaire. Cela offre à priori une palette de technologie solaire applicable comme le solaire thermique, le photovoltaïque à concentration et le photovoltaïque simple. Vu que le cahier de charge impose un produit final accessible et bon marché pour une large frange de consommateurs, la technologie des modules PV a été finalement l'option requise.

Pour autant, il devient plus commode d'utiliser des modules amorphes vu que ces derniers sont moins couteux que les modules cristallins. En effet, les modules amorphes étant moins performants que les cristallins, pour une même puissance à fournir, une installation en PV amorphe occupera plus de surface qu'une installation en PV cristallins et coutera surtout beaucoup moins chère.

#### Choix du mode de fixation des PV sur les modules

Le prototype du pilote NENU développé comporte une structure métallique devant accueillir le module photovoltaïque disposé de façon horizontale, c'est-à-dire sans angle d'inclinaison. Le pilote étant destiné à un milieu aqueux, il a été indispensable de recouvrir la structure métallique d'une peinture à huile pouvant l'épargner de la rouille.

Par ailleurs pour une utilisation à dimension réelle et industrielle, il serait intéressant de concevoir cette structure en aluminium pour lui permettre de résister de façon durable à l'effet de la rouille.

c) Visualisation du concept

Le croisement des exigences du cahier de charges combinées avec les différents choix technologiques ont permis de dessiner les contours du premier prototype des NENU-PV.

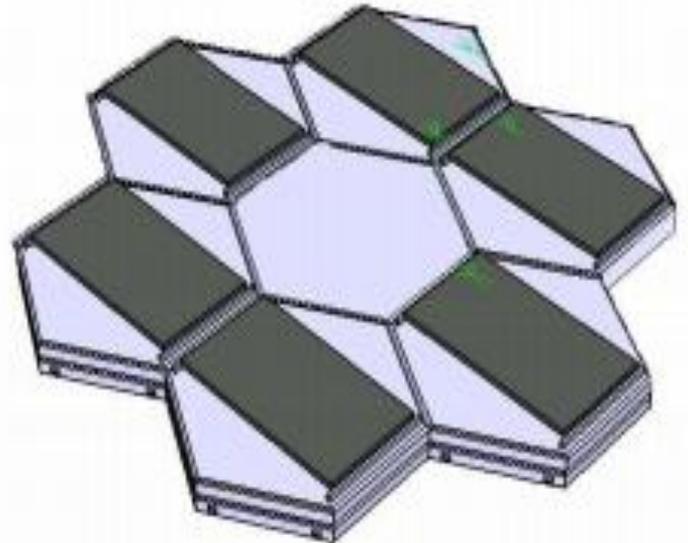
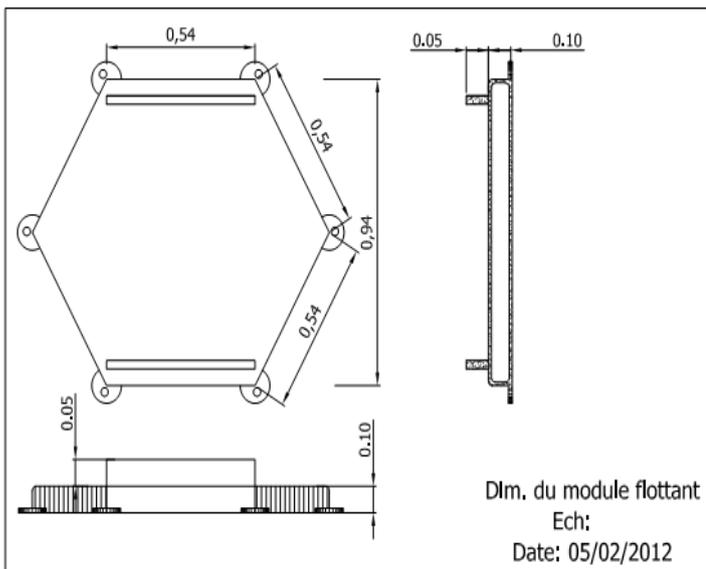


Figure 8: Coupe d'un module NENU

Figure 9: Schéma de conception d'un ilot NENU-PV

2. Commande de composants et montage du prototype

a) Commande des composants

Après avoir conçu les dimensions des modules NENU sur ceux des modules PV qu'ils sont censés porter, une commande a été faite auprès d'un maquetiste de la place. La commande a concerné la livraison de sept modules NENU dont six furent destinés aux modules PV.

Les modules PV furent de même commandés auprès d'un fournisseur de la place.

## Conception, montage et expérimentation du 1er pilote technologique des modules PV flottants et anti-évaporatifs : les NENU-PV

---

Les modules PV portent une structure métallique qui recevra le module PV. Cette structure métallique faite de cornière a été dimensionnée sur les proportions des modules PV. Ils furent exécutés et livrés par un concessionnaire de la place.

### *b) Montage du prototype NENU-PV*

Les étapes principales du montage du module NENU-PV sont :

- L'enduit des cornières métalliques par une peinture à huile contre la rouille
- La fixation de cornières métalliques sur les modules NENU



*Figure 10: Image de modules NENU montés d'une cornière métallique*

## Conception, montage et expérimentation du 1er pilote technologique des modules PV flottants et anti-évaporatifs : les NENU-PV

---

- Câblage des modules PV
- Montage de connecteurs
- Fixation des modules PV sur les modules NENU



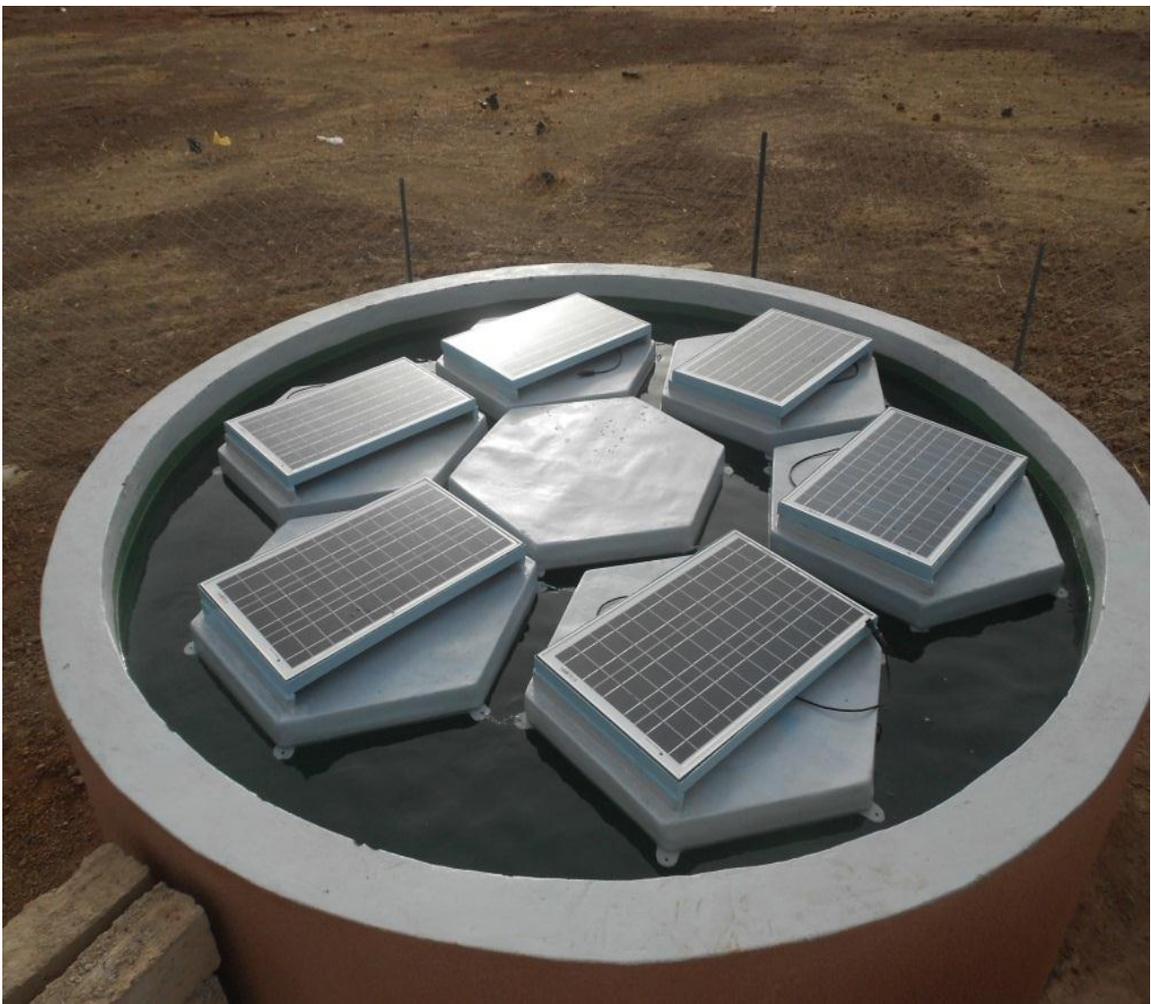
*Figure 11: Image d'un îlot NENU*

## IV. Caractérisation de NENU-PV

### 1. Description du banc d'essai

Le banc d'essai se compose de :

- Un ensemble de six modules NENU-PV connectés en série autour d'un module NENU sans module PV : un îlot NENU-PV.
- Un bac d'eau dimensionné pour accueillir un îlot NENU-PV. Les caractéristiques du bac sont de 3,5 mètres de diamètre, d'une hauteur de 1 mètre et d'une forme circulaire.



*Figure 12 : Image d'un îlot NENU-PV porté par un bac d'eau*

- De plusieurs charges résistives alimentés par les modules PV.



*Figure 13: Image des charges résistives*

## 2. Caractérisation des performances électriques

Le but de cette caractérisation est de dresser la courbe caractéristique du pilote NENU-PV afin de la comparer avec celle des données du constructeur. Un protocole établi proposé et validé par le LESEE a servi de directoire à cette partie. Il s'étale sur une dizaine de jours et consiste à :

- Chercher des valeurs d'ensoleillement précis : de  $200\text{W/m}^2$  jusqu'à  $1000\text{ W/m}^2$  par pas de 200.
- Pour chacune de ces valeurs d'ensoleillement, noter la tension en circuit-ouvert  $V_{co}$
- Noter le courant de court-circuit
- Alimenter une charge résistive par le générateur PV
- Noter la valeur de tension affichée par le multimètre

## Conception, montage et expérimentation du 1er pilote technologique des modules PV flottants et anti-évaporatifs : les NENU-PV

- Noter la valeur de courant affichée par le multimètre
- Noter la valeur de la température mesurée par le thermocouple en dessous des modules PV.

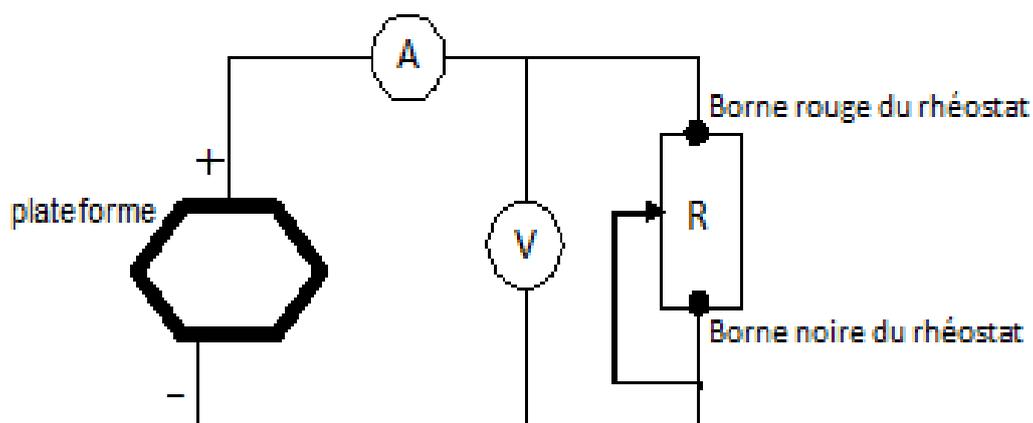
Ce procédé est répété durant ces dix jours avec des valeurs différentes de résistances. L'objectif étant de recueillir le maximum de couple courant tension (U,I) pour dresser la courbe caractéristique des générateur PV.

Pour réaliser cette manipulation, il est nécessaire de se doter de certains instruments qui sont listés comme suit :

Tableau 4 : Liste du matériel de mesure

DESIGNATION	NOMBRE
Plateforme de 6 modules PV	1
Multimètre	2
Rhéostat	1
Solari mètre	1
Sonde à température	1
Câbles de connexion	10

Le schéma électrique de l'installation se présente comme suit :



\*

Figure 14 : Schéma de montage du banc d'essai

 Méthode de comparaison des courbes caractéristiques

La courbe caractéristique du constructeur étant standardisée à 25°C, il est impératif de ramener la courbe tracée du pilote à 25°C. Pour cela les étapes suivantes seront suivies :

- Tracer les droites de charge correspondantes aux différentes charges résistives choisies
- Identifier tous les points de fonctionnement de la courbe caractéristique
- Calculer les puissances délivrées par le module en ces points de fonctionnement à travers la formule  $P=U \times I$  (1)
- Evaluer la différence de température mesurée entre la température des différents couples de points (U,I) et la température standard qui est de 25°C
- Utiliser le coefficient de correction lié à la température pour ramener la valeur de la puissance calculée à la puissance que le pilote aurait délivré avec une température de fonctionnement fixée à 25°C. Ce coefficient est de **-0.43%**.
- La puissance standardisée à 25°C s'écrit donc :  
 $P(25^{\circ}\text{C}) = P(1+0.0043 \times \Delta T)$  (2)
- Faire de même pour la détermination des points de fonctionnement de la courbe des données du constructeur et calculer les puissances maximales.
- Comparer la puissance calculée du pilote à celle des données du constructeur.

**3. Caractérisation des performances anti-évaporatives**

L'estimation de l'évaporation est importante pour déterminer l'action du pilote NENU-PV sur le phénomène de l'évaporation. Il existe plusieurs méthodes qui servent à évaluer l'évaporation d'une surface d'eau libre. Du nombre de ces méthodes, il y'a[11]:

- La méthode de transfert de masse
- La méthode du bilan d'énergie
- La méthode du bilan d'eau
- Un ensemble de méthodes empiriques.

La méthode qui la mieux adaptée aux conditions d'expérimentation est celle du bilan d'eau appliquée à deux bacs ; un des bacs porte les modules NENU-PV et l'autre servira de bac témoin.

La méthode du bilan d'eau est régie par la formule suivante :

$$E=I+P-O-O_g+\Delta S+F \quad (3) \quad \text{avec}$$

E= Quantité d'eau évaporée ;	I= Débit d'eau entrant
P= Quantité d'eau recueillie des précipitations ;	O= Débit d'eau sortant
O <sub>g</sub> = Quantité d'eau infiltrée ;	ΔS= variation d'emmagasinement (ou de hauteur)
	F= glace emmagasinée.

En annulant les grandeurs relatives au débit d'eau entrant, sortant et de glace emmagasinée, la formule régissant l'évaporation se simplifiera comme suit :

$$E=P+\Delta S \quad (4)$$

Ainsi pour un jour sans précipitation l'estimation de la quantité d'eau évaporée reviendra simplement à mesurer la variation de hauteur de l'eau du bac.

$$E=\Delta S \quad (5)$$

## Conception, montage et expérimentation du 1er pilote technologique des modules PV flottants et anti-évaporatifs : les NENU-PV

- Précautions sur la conception et l'usage du bac
  - Les bacs devront être étanches à l'infiltration de l'eau.
  - Éviter les socles en béton, les surfaces asphaltées ou les revêtements pierreux..
  - Protéger les bacs à l'aide de grilles pour empêcher l'accès des installations aux animaux.
  - Disposer d'un tube en PVC dans les bacs pour marquer de façon précise un niveau de référence de l'eau.
  
- Mode opératoire

Il faudra pour cela deux bacs de mêmes caractéristiques géométriques (1,75m de rayon, et 1m de hauteur) dotés de tubes en PVC et marqués à 5 cm du bord. Ces bacs seront remplis à un égal niveau d'eau et exposés aux mêmes conditions climatiques.

- Le premier bac contiendra l'îlot plateforme NENU-PV.
- Le second bac sera un bac témoin.
- Un récipient gradué permettra d'apporter un appoint en eau chaque soir pour ramener les niveaux des bacs d'eau à l'état initial.
- Cette quantité d'eau d'appoint mesurable permettra de définir la quantité d'eau évaporée des bacs en l/jour.
- On répétera l'expérience sur 10 jours

Le tableau suivant résume le procédé d'évaluation de l'évaporation.

Jours d'exp.	1 <sup>er</sup> jour	2 <sup>ème</sup> jour	3 <sup>ème</sup> jour	...	10 <sup>ème</sup> jour
Quantité d'eau évaporée du 1 <sup>er</sup> bac					
Quantité d'eau évaporée du bac témoin					



*Figure 15: Image du tube PVC dans le bac*

- Estimation des hauteurs d'eau évaporées à travers la plateforme

Soit

- **S** la section des deux bacs.
- L'îlot NENU occupe une partie couverte  $S_c$  de la surface du bac
- La hauteur d'eau évaporée sera donc la résultante de l'eau non couverte par les NENU-PV et de l'eau ayant réussi à passer au travers des modules NENU-PV :

Ainsi en désignant par  $V_1$  et  $V_2$  les volumes d'eau évaporée du bac contenant respectivement les modules NENU et du bac témoin :

$$V_1 = h_1 S_{NC} + h S_c \quad (6)$$

$$\text{Et } V_2 = h_2 S \quad (7)$$

## Conception, montage et expérimentation du 1er pilote technologique des modules PV flottants et anti-évaporatifs : les NENU-PV

---

- En émettant l'hypothèse que les phénomènes d'ombrage à la surface de l'eau sont négligeables il vient que :

$$h_1 = h_2 \quad (8)$$

Par la suite,  $h$  la hauteur d'eau évaporée à travers les modules NENU-PV s'exprime comme suit :

$$h = (V_1 - h_2 S N C) / S c \quad (9) \text{ et donc}$$

$$h = (V_1 - V_2 S N C / S) / S c \quad (10)$$

## V. Evaluation des performances du pilote NENU

### 1. Performances électriques

#### a) Mesure :

Les données permettant de dresser le profil de la courbe caractéristique de l'îlot ont été recueillies sur une dizaine de jours. Ces données recueillies pour des charges résistives différentes (5 ohms, 10 ohms, 15 ohms...60 ohms, 100 ohms) sont consignées en annexe et ont permis d'avoir pour la même valeur d'ensoleillement une quinzaine de point. La résultante étant la courbe caractéristique ci-dessous :

Cette courbe sera utilisée pour l'estimation des puissances maximales du pilote.

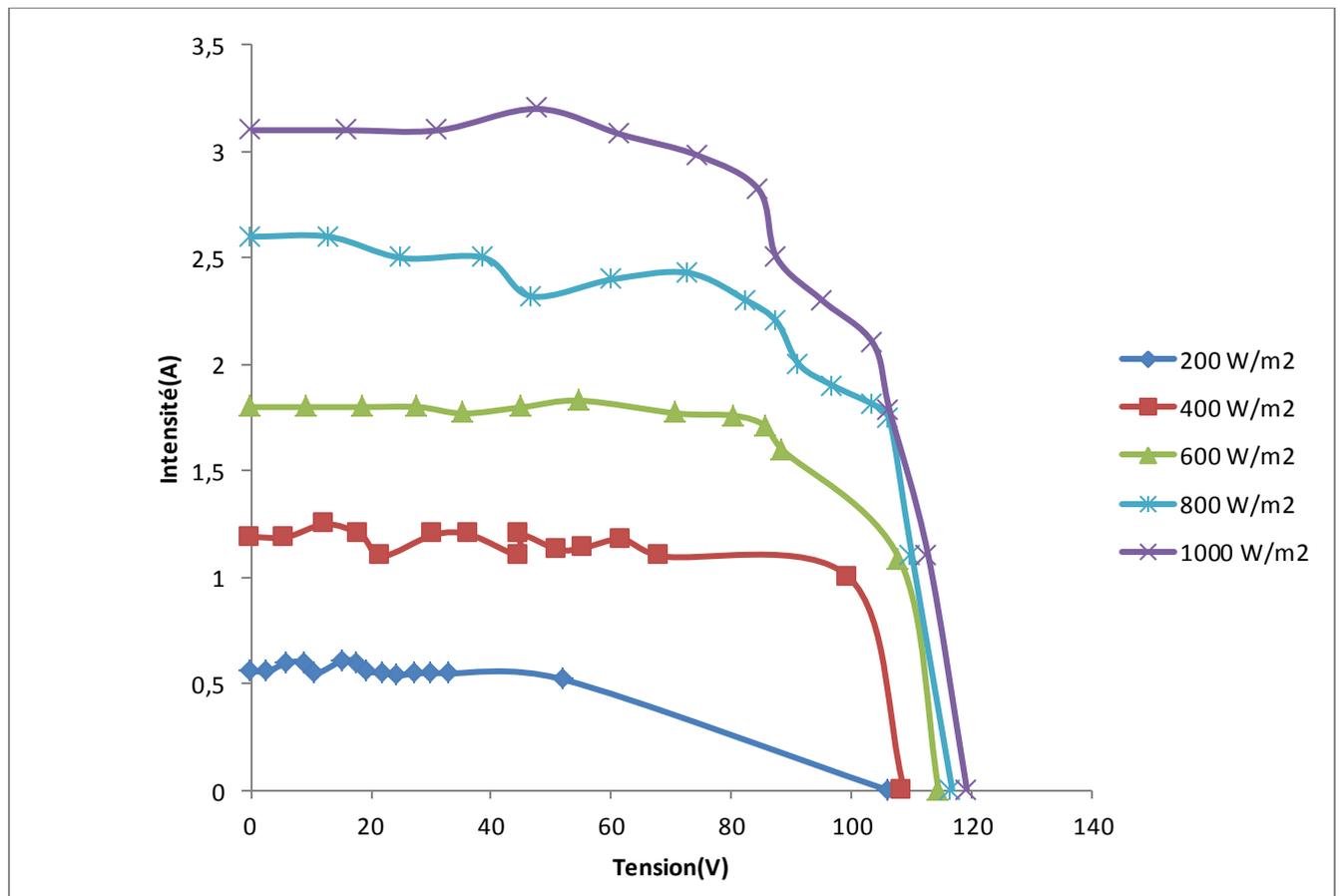


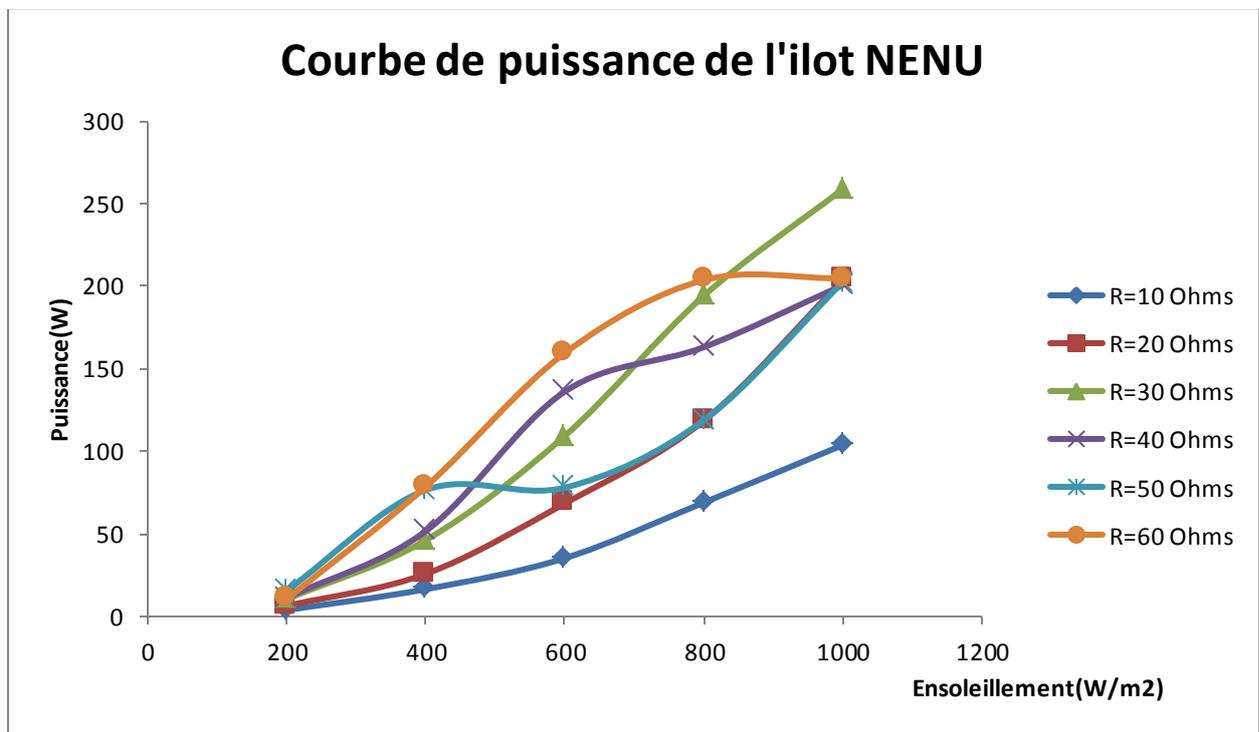
Figure 16: Courbe caractéristique de l'îlot NENU

**b) Résultat**

La courbe caractéristique témoigne pour chaque ensoleillement un couple de points tension, intensité (U, I).

*Tableau 5: Puissances normalisées de l'îlot*

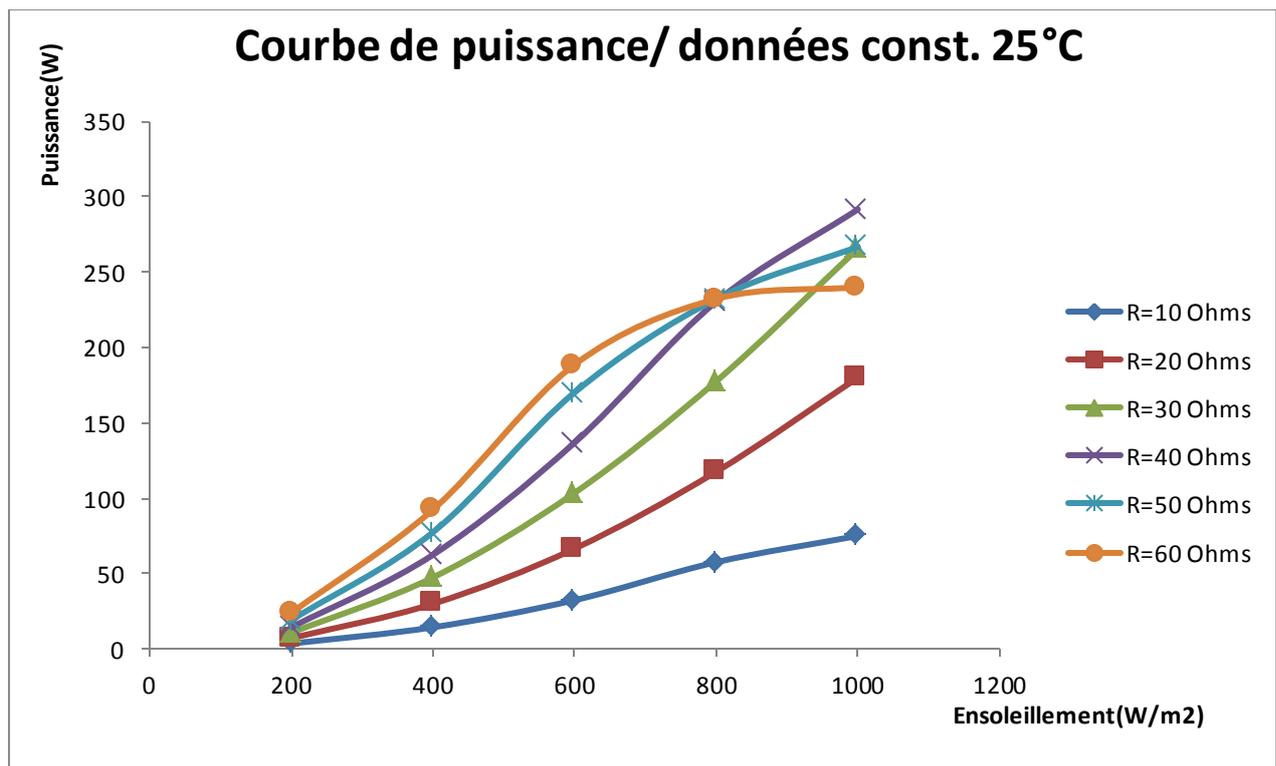
Ensol(W/m2)	Tableau des puissances max (W) normalisées à 25 °C					
Ensol(W/m2)	R=10 Ohms	R=20 Ohms	R=30 Ohms	R=40 Ohms	R=50 Ohms	R=60 Ohms
200	3,8216961	6,37394395	10,4223556	11,248692	15,636918	10,50702
400	16,4648438	25,7196132	46,141605	51,6624339	76,5260916	78,5867313
600	35,228196	68,3705104	109,236764	136,099353	77,97528	159,416128
800	68,9033188	118,406991	194,019462	163,004448	118,686518	203,591241
1000	103,705664	203,597117	258,680475	200,503326	202,28083	204,672784



*Figure 17: Courbe de puissance de l'îlot NENU*

*Tableau 6: Puissances max./données constructeur*

Tableau des puissances max (W)						
Ensol(W/m <sup>2</sup> )	R=10 Ohms	R=20 Ohms	R=30 Ohms	R=40 Ohms	R=50 Ohms	R=60 Ohms
200	3,6	7,2	10,8	14,4	19,2	24
400	14,4	30	47,5	62,5	77,5	92,5
600	32,4	66,6	103,6	136,9	170,2	188,68
800	57,6	117,6	177,6	230,4	232,2	232,2
1000	75	180	265,5	291,6	266,8	240



*Figure 18: Courbe de puissance/ données du constructeur*

c) Discussion et analyse

La courbe de puissance indique clairement que dans la configuration de caractérisation de l'îlot, la puissance maximale atteinte est **258,7 Watt** et ce pour une charge de **30 Ohms**. Cette valeur de puissance est inférieure à celle fournie par les données du constructeur qui indiquent une puissance maximum atteinte de l'ordre de **291,36 Watts** pour une charge résistive de **40 Ohms**.

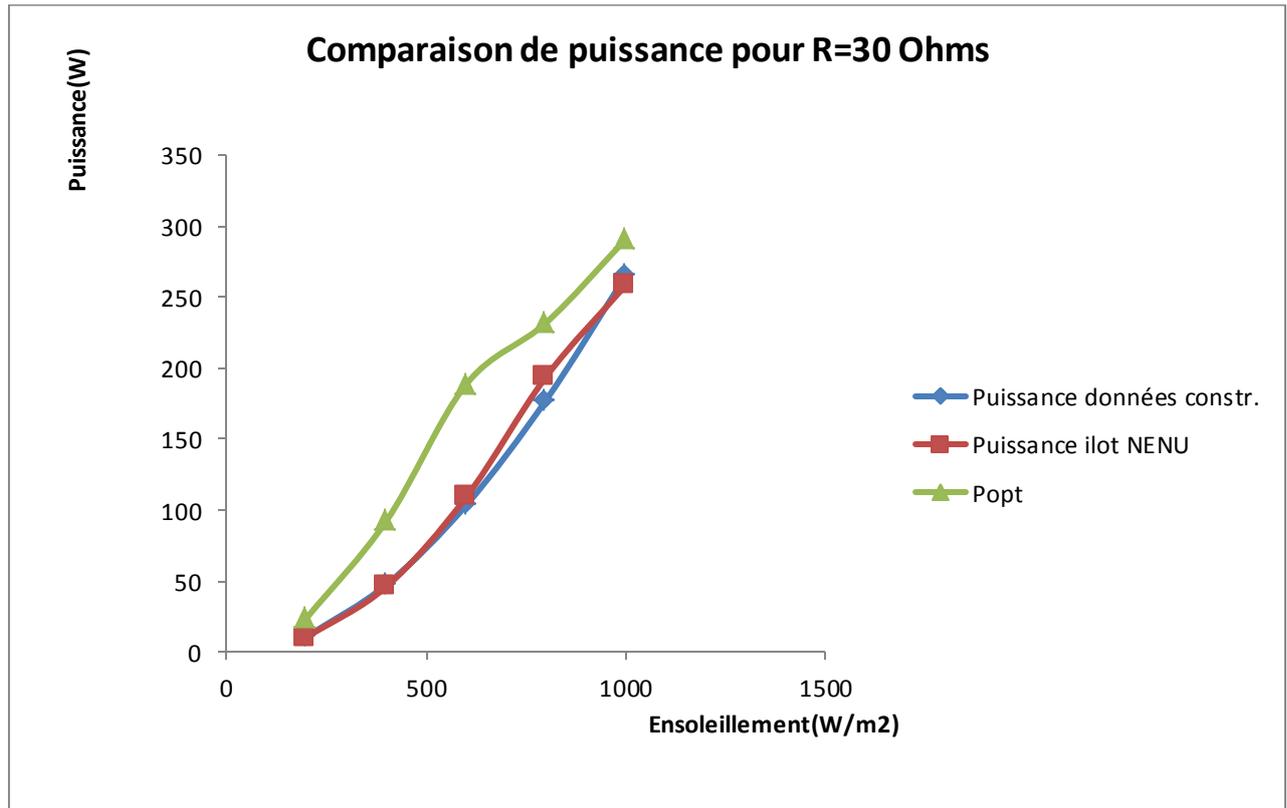


Figure 19: Comparaison de puissance pour R=30 ohms

La comparaison des puissances indique clairement des courbes de puissances quasi-confondues. Cela témoigne de la faible perte de puissance enregistrée par le pilote NENU et cela en dépit de sa configuration horizontale ; c'est-à-dire sans inclinaison. Même pour un ensoleillement de **1000 W/m²** sous une température standard de **25°C**, la perte observée par le pilote NENU est minime.

Cependant ces deux valeurs de puissance restent inférieures à la puissance optimale schématisée en vert.

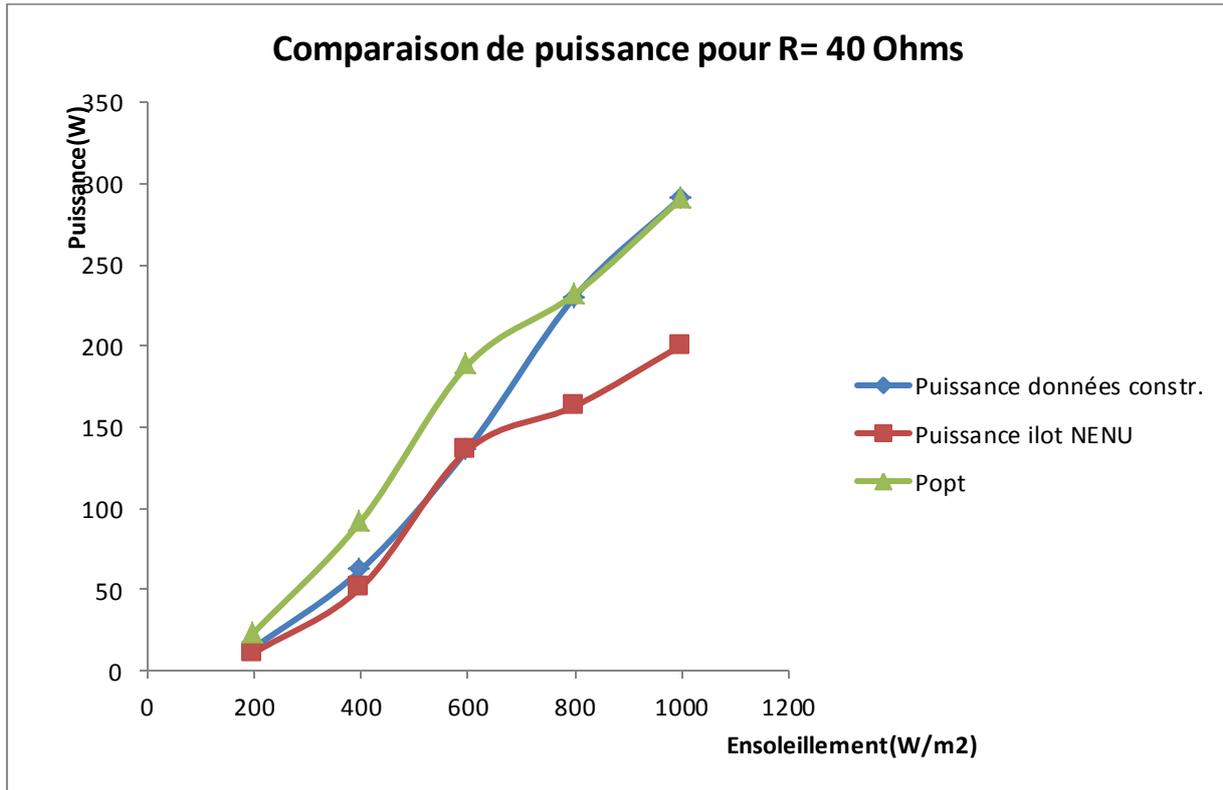


Figure 20: Comparaison de puissance pour R= 40 Ohms

Aussi l'allure des courbes de comparaison indique que les deux puissances sont similaires jusqu'à environ  $600 \text{ W/m}^2$ . Ensuite la différence de puissance est plus prononcée en défaveur du pilote NENU. Par contre, la courbe de la puissance optimale est superposée à celle des données du constructeur à partir de  $600 \text{ W/m}^2$ ; cela indique que la charge nominale prévue par le constructeur est de **40 ohms**. Par ailleurs La comparaison des points de puissance maximale permettra de caractériser de façon concrète l'écart entre les données du fournisseur et celles enregistrées sur le terrain. Le tableau suivant dresse cette comparaison

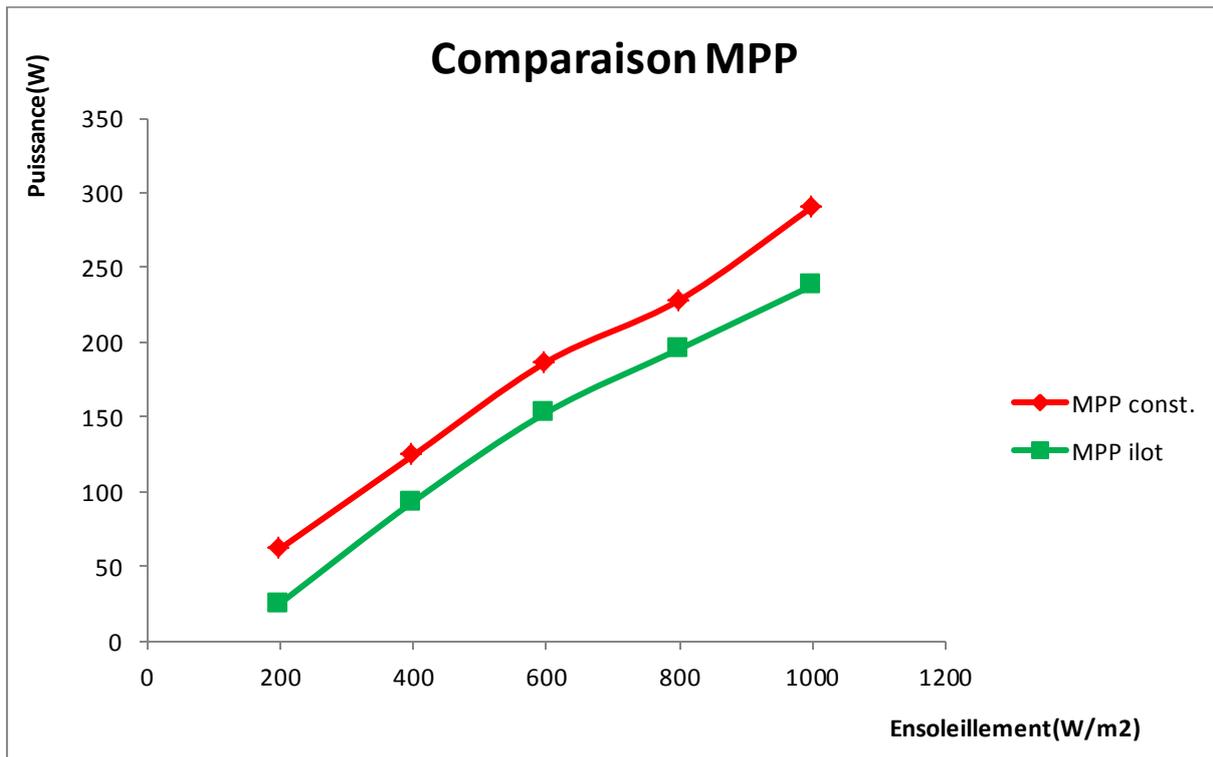


Figure 21: Comparaison des puissances maximales

Les courbes de puissances maximales indiquent que l'ilot NENU-PV dans sa configuration expérimentale, est moins performante que celle prévue par le constructeur. Les écarts enregistrés entre les deux courbes se situent entre **10% et 17%** de la puissance prescrite par le fournisseur.

## 2. Performances anti-évaporatives

### a) Mesure

Initialement prévu pour une dizaine de jours comme pour l'évaluation des performances électriques, les mesures ont finalement été interrompues à cause de fuites constatées sur les bacs d'eau. C'est alors que les mesures ont été opérées sur cinq jours et ont donné les résultats qui suivent :

*Tableau 7: Volume d'eau évaporé*

Jours d'exp.	1 <sup>er</sup> jour	2 <sup>ème</sup> jour	3 <sup>ème</sup> jour	4 <sup>ème</sup> jour	5 <sup>ème</sup> jour
Quantité d'eau évaporée du 1 <sup>er</sup> bac NENU (l)	50	75	75	80	45
Qtité d'eau évaporée du bac témoin(l)	90	110	105	120	115

***b) Résultat***

$S_{NC}$  la part de surface non couverte par les modules = **45% de S**

$S_C$  la part de surface couverte par les modules = **55% de S**

En utilisant la formule (8) les valeurs de h mesurées sont :

*Tableau 8: quantité d'eau gagnée*

Jours d'exp.	1 <sup>er</sup> jour	2 <sup>ème</sup> jour	3 <sup>ème</sup> jour	4 <sup>ème</sup> jour	5 <sup>ème</sup> jour
hauteur d'eau en mm	1,8	4,8	5,2	4,9	-1,276
h2 mm (bac témoin)	9,36280884	11,443433	10,923277	12,4837451	11,9635891
% d'eau gagnée	<b>80,775</b>	58,0545455	52,3952381	60,7489583	<b>110,665696</b>

***c) Discussion et analyse***

Les résultats de ces mesures donnent 3 séries de résultat dont la première valeur de h tourne autour de **2 mm**. Par contre les trois jours de mesure qui ont suivi ont permis de tabler sur des valeurs tournant autour de **5 mm** ; ce qui correspond à un gain d'eau de 52% par rapport au bac témoin. Ensuite le dernier résultat qui est celui le plus improbable a été mesuré le 5<sup>ème</sup> et

dernier jour de mesure qui situe le gain d'eau à **110%** ; ce qui semble aberrant. Ce résultat stipule qu'il n'y a point d'évaporation au travers des modules NENU et même qu'il y'a eu un gain d'eau contrairement aux quatre premiers jours de mesure. Ce résultat aberrant trouve sa justification dans le fait que la fuite d'eau constatée au niveau du bac témoin était conséquente. La déduction qui en résulte est que les modules NENU tels qu'ils sont conçus permettent de réaliser des gains minima d'eau se situant autour de **50%**. Cependant des mesures plus approfondies sont nécessaires pour confirmer ou infirmer cette assertion.

## **VI. CONCLUSION**

En définitive, l'étude ressort clairement que les NENU-PV, pilote en phase d'expérimentation augurent déjà de lendemains prometteurs suite à la caractérisation qui a été effectuée. Il est indéniable que le pilote NENU, tel qu'il est pensé est plus qu'opportun dans un contexte social marqué par une évaporation intensive et une carence sans cesse répétée en énergie électrique des industries minières. Aussi cette caractérisation aura permis de montrer qu'à condition d'effectuer un choix judicieux de la charge à alimenter, les pertes inhérentes à la configuration horizontale des modules PV peuvent être négligeables : c'est-à-dire de l'ordre de 3%. Mais dans les pires cas, ces pertes peuvent tourner autour de 18%. Les performances anti-évaporatives évaluées convergent vers **50%** de gain d'eau quoique des mesures plus approfondies soient nécessaires.

Par ailleurs il convient de noter que les résultats de caractérisation des performances électriques, bien qu'ayant été pris dans de bonnes conditions, sont à relativiser du fait d'une grande fluctuation de l'ensoleillement. Cela déteint forcément sur l'exactitude des valeurs mesurées. Aussi dans la suite des travaux, il sera judicieux d'envisager un enregistreur automatique (un datalogger) qui prendrait les valeurs avec un minimum d'erreur possible.

## **VII. PERSPECTIVES**

Au regard de la nature actuelle des NENU-PV et des contraintes rencontrées sur le terrain, il y a lieu de faire des propositions allant dans le sens de l'amélioration du produit.

En premier lieu, il convient de récuser le matériau de conception des modules NENU qu'est la résine du fait de nombreux désavantages énumérés dans le tableau 1 par rapport à la matière plastique.

Ensuite la dégradation constatée des éléments de liaison sur les modules NENU laisse présager qu'il serait préférable de concevoir ces éléments de liaison indépendamment des modules de sorte à pouvoir les monter dessus.

Puis le cadre métallique qui reçoit le module photovoltaïque sur le NENU est exposé au phénomène de la rouille et cela même étant recouvert d'une peinture à huile. Pour cela il sera intéressant d'envisager l'utilisation d'une structure en aluminium en lieu et place d'une structure en fer.

Par ailleurs il sera intéressant de quantifier dans la suite de la caractérisation la part de gain de puissance due à l'action de refroidissement des panneaux photovoltaïques par la proximité de l'eau.

Aussi, il convient de noter que le côté le moins reluisant des installations solaires photovoltaïques est la nécessité de grandes surfaces. Cela crée souvent des conflits avec les terres agricoles. L'installation des NENU-PV étant prévue sur des surfaces aquatiques alors le problème de conflit foncier ne se posera pas à priori ; cela permettra de tabler sur des modules photovoltaïques amorphes qui occupent de plus grandes surfaces contrairement aux modules cristallins qui ont été utilisés pour le premier prototype du premier pilote technologique des modules PV flottants et anti-évaporatifs : les NENU-PV.

Enfin le barrage de kamboinsé offrant des conditions naturelles pour la caractérisation du produit, il serait intéressant de chercher des financements pour évaluer les performances du produit à grande échelle.

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] **Special congress issue**, International journal of refrigeration volume 6, 5-6 September –November 1983, Pages 319-328, Special congress issue.
- [2] **KOKOTOV Yuri, YOSSI Fisher**, Solaris, Floating solar power plant, Scopus, WO Patent 2011/024597, Application number PCT US /2011/024597.
- [3] **SUNENGY**, Collector for solar radiation, Scopus, WO Patent 2004/106817, Application number PCT/AU/2004/000699.
- [4] **GEORGES Jaroslav**, Waterborn solar generators, Scopus, WO Patent 2010/1449555/A1, Application number PCT/AU/000741
- [5] **YEKUTIELY DAVID**, Solar cell geomembrane, Scopus, WO Patent 2007/141773A1, Application number PCT/IL2007/000566.
- [6] **PAN Ge**, Special platform for generating electricity using solar energy, Scopus, WO patent 2008/025234A1, Application number PCT/CN/2007/002478.
- [7] **YEOMANS Allan James**, Buoyant platform for radiant energy collection apparatus, Scopus, WO Patent 99/4646543, Application number PCT AU99/00140.
- [8] **LAING Johannes**, Platform for the utilization of solar power, Scopus, WO Patent 99/46543, Application number PCT AU99/00140
- [9] **NOLARIS**, Steam storage system for artificial island, Scopus, US Patent 2010/0307153 A1, Application number PCT/IB2009/000223.
- [10] **Webinet.blogspot.com/2010/09/lois-physiques1-abeilles-O.html** (12/05/2012)  
Mathématiques, Médailles Fiel, Terence Tao, Conjectures de Kakeya, Besicovitch, Fractals, Dimension fractale, Nombre premiers en progression arithmétique, Analyse harmonique.
- [11] **B. Pouyaud**, Cah. ORSTOM. XVI n°2, 1979

## ANNEXES

### ANNEXE 1: Protocole de caractérisation des performances des NENU-PV

---

#### PROTOCOLE DE CARACTERISATION DES NENU-PV

Le pilote Nenu-PV que nous avons développé est un assemblage de 7 nénuphars (flotteurs hexagonaux) de même dimension superposé chacun d'un module photovoltaïque. Il sera disposé sur une surface d'eau. Ce protocole vise à déterminer les performances électriques et anti-évaporatives de ce pilote.

##### A. Caractérisation performances électriques

La caractérisation électrique de notre pilote va consister dans un premier temps à :

- Déterminer son rendement de conversion électrique
- Tracer sa courbe caractéristique U/I.

Nous pourrons par la suite, évaluer les effets sur les performances électriques du positionnement horizontal et du positionnement sur l'eau des panneaux PV.

##### I. Formules de calcul

###### ➤ Puissance solaire reçue à la surface par les modules PV : P<sub>sol</sub>

$$P_{sol} = E \times S$$

E (W/m<sup>2</sup>) : éclairement solaire à la surface des modules  
S (m<sup>2</sup>) : surface totale des cellules photovoltaïques

###### ➤ Puissance électrique en courant continu

$$P_{él} = U \times I$$

U(V) la tension ; I(A) le courant

###### ➤ Rendement du système

$$\eta_{pv} = P_{él} / P_{sol}$$

P<sub>él</sub> (W) : puissance électrique délivrée par les modules  
P<sub>sol</sub> (W) : puissance de l'ensoleillement sur les modules.

## II. Liste des équipements

DESIGNATION	NOMBRE
Pilote Nenu-PV	1
Panneaux solaires	2
Multimètre	2
Onde à température	1
Rhéostat	2
Solarimètre	1

## III. Acquisition des données

### 1) Lecture d'informations

Après avoir examiné la plaque signalétique d'un module, remplissez le paragraphe « Données de la plaque signalétique du module ».

#### Données de la plaque signalétique du module

Marque \_\_\_\_\_ ; Type \_\_\_\_\_ ;  $P_{max}$  (Wc) ;  $I_{sc}$  (A) ;  
 $I_N$  (A) ;  $V_{oc}$  (V) ;  $V_m$  (V) ;

### 2) Mesures de la tension en circuit-ouvert $V_{oc}$



**NB** : LES MULTIMETRES ET AUTRES AFFICHEURS NUMERIQUES NE DOIVENT JAMAIS ETRE EXPOSES LONGTEMPS AU SOLEIL.

- Disposer le pilote sur le bac à eau
- Sélectionnez sur le multimètre le calibre « TENSION CONTINUE .....V ».

- c) Branchez un cordon à pointe noir sur la borne « COM » du multimètre et un cordon à pointe rouge sur la borne «  $V\Omega mA$  ».
- d) Placez les pointes des fiches du multimètre sur les bornes extrêmes de la plaque à bornes de la plateforme, en respectant les polarités : la borne « COM » du multimètre sur la borne « - » de la plateforme. La valeur affichée doit être positive.
- e) Si la valeur affichée est inférieure à ....., sélectionnez sur le multimètre le calibre « TENSION CONTINUE ..... » pour faire une lecture plus précise.
- f) Notez la valeur lue sur la fiche de résultats.

### 3) Mesure du courant de court-circuit



**NB : CETTE MESURE NE DOIT JAMAIS DEPASSER 5 SECONDES ; LA MISE EN COURT-CIRCUIT PROLONGÉ ENDOMMAGE LE GENERATEUR.**

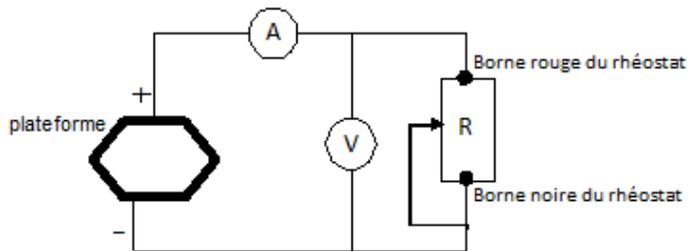
- a) Disposer le pilote NENU- PV sur le bac à eau
- b) Sélectionnez sur le multimètre le calibre « INTENSITE CONTINUE 10A ».
- c) Branchez un cordon à pointe noir sur la borne « COM » du multimètre et un cordon à pointe rouge sur la borne « ....ADC ».
- d) Placez les pointes des fiches du multimètre sur les bornes extrêmes de la plaque à bornes du module, en respectant les polarités et sans dépasser 5s : la borne « COM » du multimètre sur la borne « - » du module. La valeur affichée doit être positive.
- e) Notez la valeur lue sur la fiche de résultats.

### 4) Elaboration du banc d'essai

## Conception, montage et expérimentation du 1er pilote technologique des modules PV flottants et anti-évaporatifs : les NENU-PV

---

- L'ensemble des six modules de la plateforme sera monté en série. Pour cela la borne « + » d'un module à la borne « - » d'un autre module. La borne « - » de la plateforme sera la borne « - » du 1<sup>er</sup> module PV et la borne « + » de la plateforme sera la borne « + » du dernier module de la chaîne.
- Le schéma électrique de l'installation sera le suivant :



- Le calibre de l'ampèremètre doit être de :10A
- Le calibre du voltmètre doit être de : 200 V

### 5) Mesures

Le but de ces mesures est de dresser la courbe caractéristique du pilote dont les panneaux photovoltaïques sont dans une configuration horizontale. Cette courbe fera ensuite l'objet d'une comparaison avec la courbe des données du constructeur.

La courbe caractéristique du constructeur donne une allure de courbe pour les ensoleillements que sont 200, 400, ..., 1000 W/m<sup>2</sup>.

Pour cela une journée type de manipulation se fera comme suit :

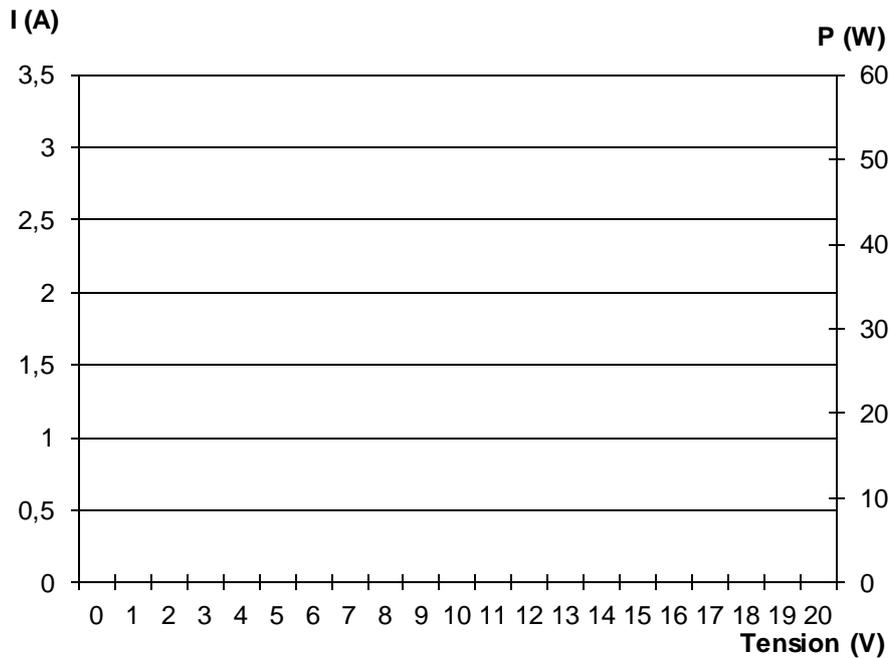
- Brancher une charge résistive aux bornes du pilote
- Chercher chacune des valeurs d'ensoleillement précédemment cités
- Pour chacune de ces valeurs d'ensoleillement, noter la tension, l'intensité et la température
- Brancher une autre charge et reprendre les mêmes mesures
- Recommencer pour avoir le maximum de couple de points (au moins 12) pour tracer la courbe caractéristique du pilote.
- Dresser la courbe caractéristique du pilote

**Conception, montage et expérimentation du 1er pilote technologique des modules PV flottants et anti-évaporatifs : les NENU-PV**

---

E (W/m <sup>2</sup> )	0											I <sub>cc</sub> =
U(V)	V <sub>oc</sub> =											0
I(A)												
T(°C)												

**I = f(U) / P=f(U)**



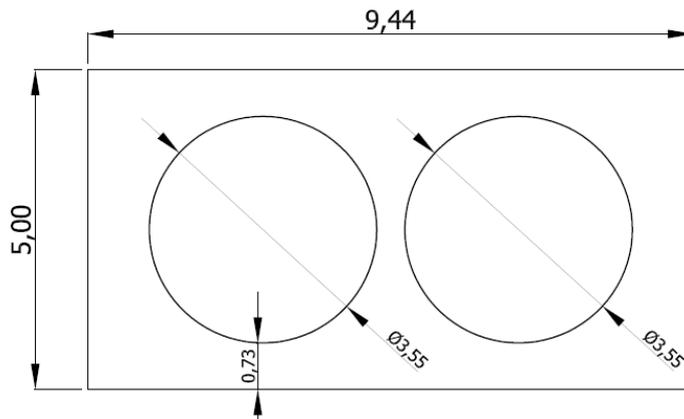
- Définir les coefficients de correction liés à la température
- Tracer la nouvelle courbe caractéristique standardisée à 25°C.
- Comparer la courbe de l'ilot avec celle du constructeur.

**B. caractérisation des performances anti-évaporatives**

## Conception, montage et expérimentation du 1er pilote technologique des modules PV flottants et anti-évaporatifs : les NENU-PV

Les pertes d'eau par évaporation dépendent des caractéristiques de la retenue: profondeur-surface, exposition aux vents, végétation aquatique, etc.

Nous utiliserons la méthode des bilans d'eau dans les bacs d'évaporation qui permettent d'avoir une bonne approximation des phénomènes d'évaporation. Nous construirons donc deux bacs de même section : un bac avec les Nenu-PV et un bac témoin.



Soit

- $V1$  et  $V2$  les volumes d'eau évaporés du bac 1 contenant les pilote NENU et le volume d'eau évaporé du bac témoin.
  - $Sc$  la portion de la surface du bac couverte par le pilote NENU
  - $SNC$  la portion de la surface du bac non couverte par le pilote NENU
  - $h1$  et  $h2$  les hauteurs d'eau évaporées du bac 1 et du bac témoin.
  -
- La hauteur d'eau évaporée  $h$  à travers les modules NENU-PV s'exprime comme suit :

$$V1 = h1S_{NC} + hSc \quad (4)$$

Et  $V2 = h2S \quad (5)$

En émettant l'hypothèse que les phénomènes d'ombrage à la surface de l'eau sont négligeables il vient que :

$$h1 = h2 \quad (6)$$

Par la suite,  $h$  la hauteur d'eau évaporée à travers les modules NENU-PV s'exprime comme suit :

$$h = (V1 - h2S_{NC})/Sc \quad (7) \text{ et donc}$$

$$h = (V1 - V2S_{NC}/S)/Sc$$

**Conception, montage et expérimentation du 1er pilote technologique des modules PV flottants et anti-évaporatifs : les NENU-PV**

---

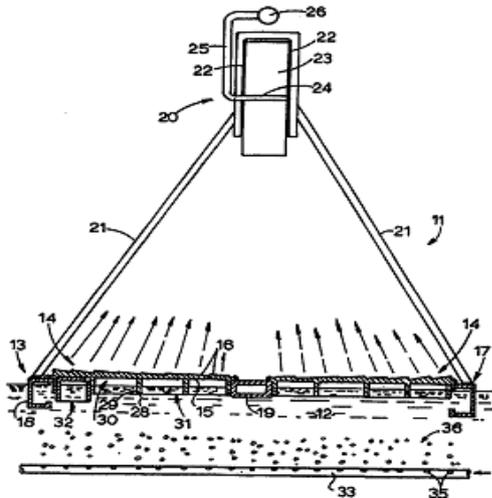
---

Jours d'exp.	1 <sup>er</sup> jour	2 <sup>ème</sup> jour	3 <sup>ème</sup> jour	4 <sup>ème</sup> jour	5 <sup>ème</sup> jour
Qtité d'eau évaporée du 1 <sup>er</sup> bac NENU(l)					
Qtité d'eau évaporée du bac témoin(l)					

**.Estimer la performance des produits**

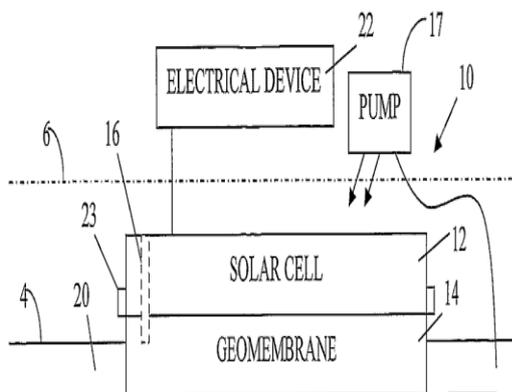
## ANNEXES 2 : Autres Pilotes aquatiques

### 1) Pilote développé par ALLAN J. YEOMANS



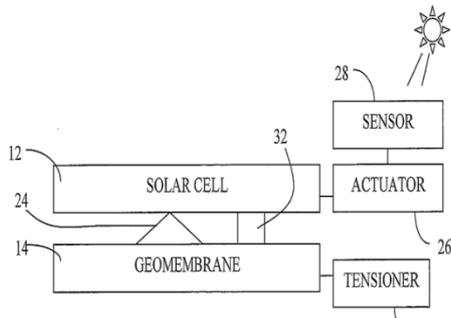
Plateforme ayant des réflecteurs à la face supérieure et des compartiments remplis d'air à la face inférieure. Ce pilote est doté d'un concentrateur constitué d'une pluralité de miroirs disposés le long d'une courbe parabolique et suspendu à un corps qui suit la course du soleil.

### 2) Pilotes développés par YEKUTIELY David

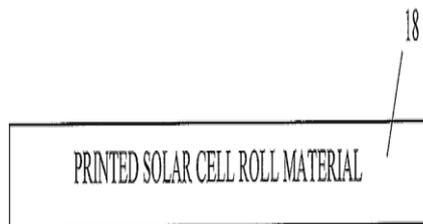


Pilote constitué d'une géo-membrane portant des cellules photovoltaïques. Il se caractérise par une pompe de refroidissement et d'une auto adaptation à plusieurs modes de fonctionnement. Par contre il nécessite une certaine qualité d'eau pour être optimal.

## Conception, montage et expérimentation du 1er pilote technologique des modules PV flottants et anti-évaporatifs : les NENU-PV

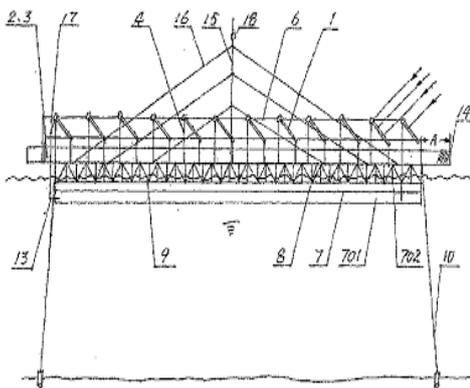


Ce dernier pilote est constitué d'une géomembrane qui porte des cellules PV à pivotement. Il est pourvu d'un ensemble capteur, actionneur et tendeur qui sert à suivre la course du soleil.



Pilote constitué de cellules PV imprimés sur un matériel flottant. Ce dispositif a l'avantage d'être très simple et est doté d'un système pour traquer la position du soleil.

### 3) Pilote développé par Pilote développé par PAN GE



Pilote constitué d'une plateforme flottante portant des cellules PV et d'un ensemble de miroirs permettant d'optimiser la captation de rayonnement solaire. Aussi, il est pourvu d'un système de refroidissement à circulation.

### ANNEXES 3 : Tableaux et courbes intermédiaires pour les mesures

**Conception, montage et expérimentation du 1er pilote technologique des modules PV flottants et anti-évaporatifs : les NENU-PV**

---

Ensoleil=400W/m2	U	I
	108,7	0
	99,5	1
	68,3	1,1
	62	1,18
	55,5	1,14
	51,2	1,13
	44,9	1,2
	44,9	1,1
	36,49	1,2
	30,38	1,2
	21,85	1,1
	18,3	1,2
	12,5	1,25
	5,97	1,19
0	1,19	

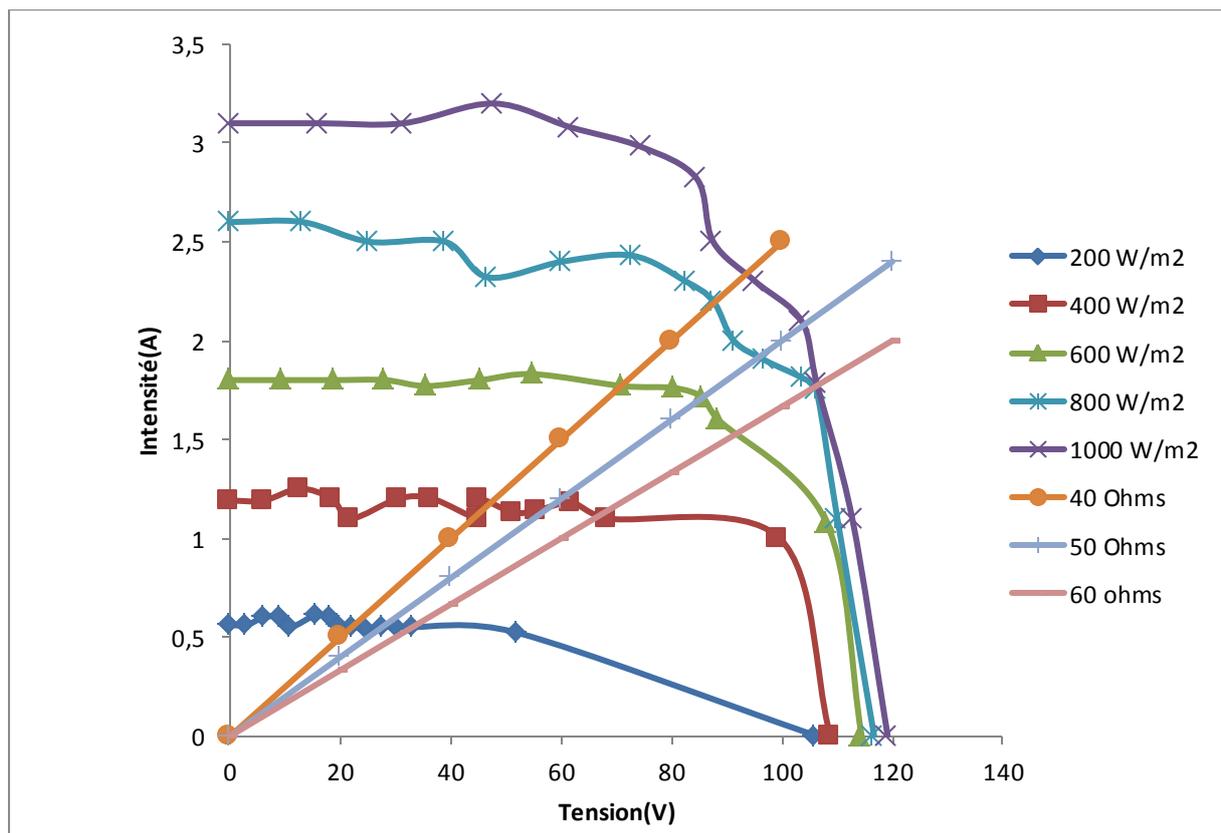
Ensoleil=200W/m2	U	I
	106,09	0
	52,1	0,52
	33,1	0,55
	30,1	0,55
	27,6	0,55
	24,5	0,54
	22,1	0,55
	19,5	0,56
	17,97	0,6
	15,38	0,61
	10,9	0,55
	9,09	0,6
	6,15	0,6
	2,8	0,56
0	0,56	

Ensoleil=600W/m2	U	I
	114,4	0
	108	1,08
	88,4	1,6
	85,7	1,71
	80,4	1,76
	71	1,77
	54,9	1,83
	45,3	1,8
	35,45	1,77
	27,95	1,8
	18,8	1,8
	9,5	1,8
	0	1,8

Ensoleil=800W/m2	U	I
	116,67	0
	110	1,1
	106,2	1,75
	103,7	1,81
	96,9	1,9
	91,2	2
	87,5	2,2
	82,5	2,3
	72,8	2,43
	60,2	2,4
	46,7	2,32
	38,91	2,5
	25,13	2,5
	13	2,6
0	2,6	

**Conception, montage et expérimentation du 1er pilote technologique des modules PV flottants et anti-évaporatifs : les NENU-PV**

Ensoleil=1000W/m2	U	I
	119,12	0
	112,7	1,1
	106,3	1,78
	103,5	2,1
	95,1	2,3
	87,5	2,5
	84,5	2,82
	74,5	2,98
	61,6	3,08
	47,7	3,2
	31,3	3,1
	16	3,1
	0	3,1



**Conception, montage et expérimentation du 1er pilote technologique des modules PV flottants et anti-évaporatifs : les NENU-PV**

---

Couple de points (U,I) : U(V); I(A)						
Ensoleillement	R=10Ohms	R=20Ohms	R=30Ohms	R=40Ohms	R=50Ohms	R=60Ohms
200 W/m <sup>2</sup>	(6,15;0,6)	(10,9;0,55)	(17,97;0,56)	(19,5;0,56)	(27,6;0,55)	(17;0,6)
400 W/m <sup>2</sup>	(12,5;1,25)	(21,85;1,1)	(36,49;1,2)	(44,9;1,1)	(62;1,18)	(68,3;1,1)
600 W/m <sup>2</sup>	(18;1,8)	(34,45;1,77)	(54,9;1,83)	(71;1,77)	(60;1,2)	(92;1,6)
800 W/m <sup>2</sup>	(25,13;2,5)	(46,7;2,32)	(72,8;2,43)	(93;1,6)	(46,7;2,32)	(106,2;1,75)
1000 W/m <sup>2</sup>	(31,3;3,1)	(61,6;3,08)	(84,5;2,82)	(106,3;1,75)	(61,3;3,08)	(106,3;1,78)

Tableau des puissances max (W)						
Ensoleillement	R=10Ohms	R=20Ohms	R=30ohms	R=40Ohms	R=50ohms	R=60Ohms
200 W/m <sup>2</sup>	3,69	5,995	10,0632	10,92	15,18	10,2
400 W/m <sup>2</sup>	15,625	24,035	43,788	49,39	73,16	75,13
600 W/m <sup>2</sup>	32,4	60,9765	100,467	125,67	72	147,2
800 W/m <sup>2</sup>	62,825	108,344	176,904	148,8	108,344	185,85
1000 W/m <sup>2</sup>	97,03	189,728	238,29	186,025	188,804	189,214

**Conception, montage et expérimentation du 1er pilote technologique des modules PV flottants et anti-évaporatifs : les NENU-PV**

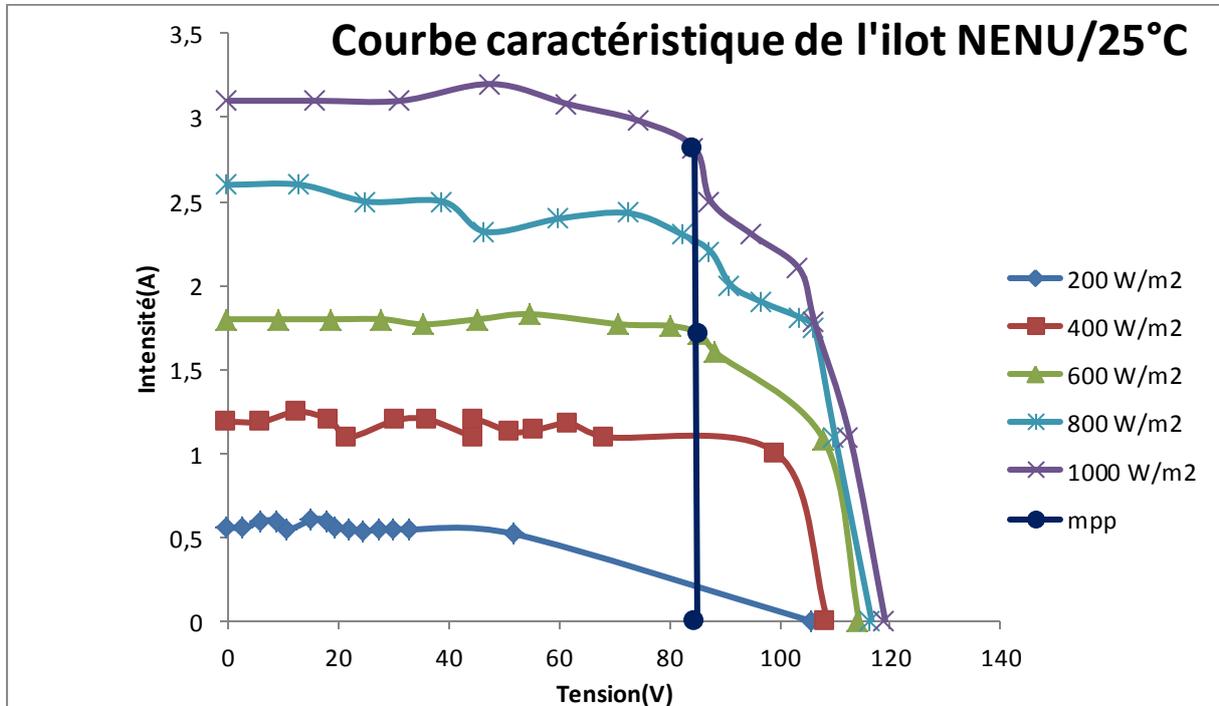
---

Tableau des températures (°C)						
Ensoleil.	R=10 Ohms	R=20 Ohms	R=30 Ohms	R=40 Ohms	R=50 ohms	R=60 ohms
200 W/m <sup>2</sup>	33,3	39,7	33,3	32	32	32
400 W/m <sup>2</sup>	37,5	41,3	37,5	35,7	35,7	35,7
600 W/m <sup>2</sup>	45,3	53,2	45,3	44,3	44,3	44,3
800 W/m <sup>2</sup>	47,5	46,6	47,5	47,2	47,2	47,2
1000 W/m <sup>2</sup>	41	42	44,9	43,1	41,6	44

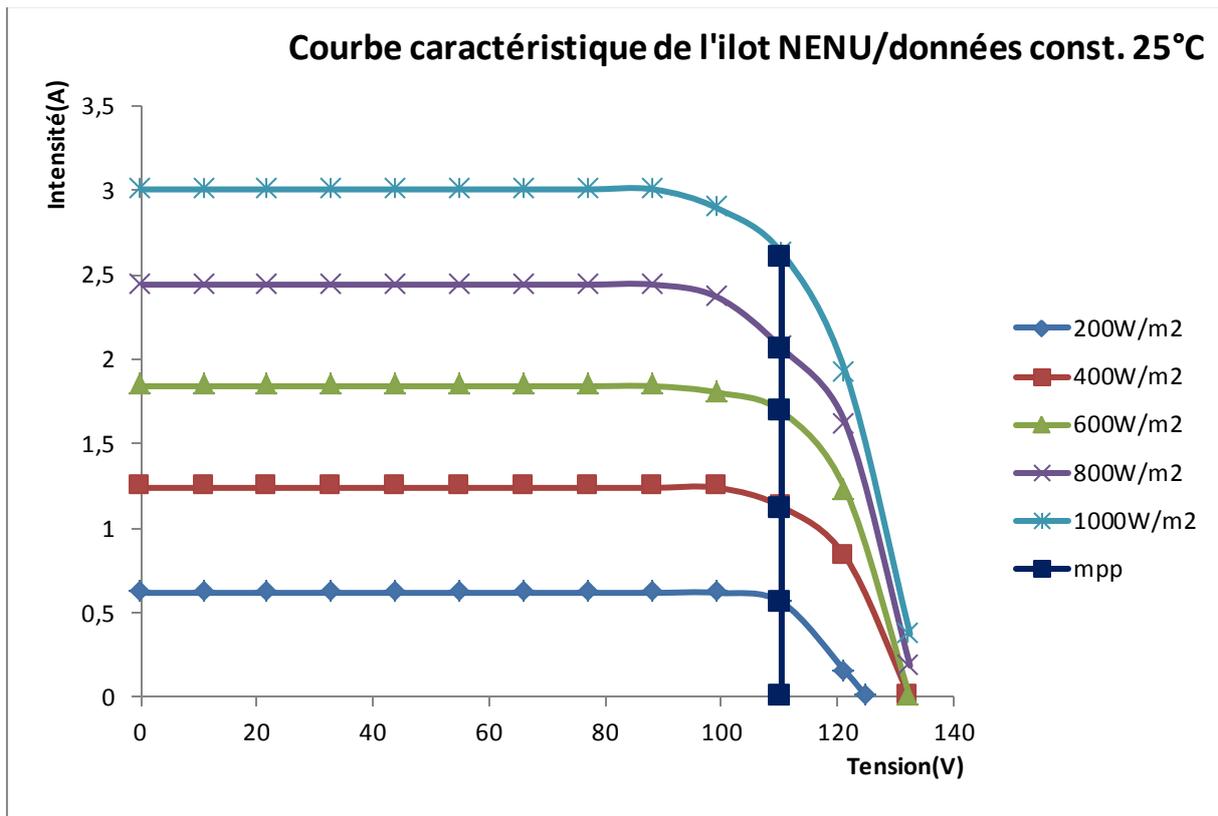
Tableau des différences de température/ 25°C						
Ensoleil.	R=10 ohms	R=20 Ohms	R=30 Ohms	R=40 Ohms	R=50 Ohms	R=60 Ohms
200 W/m <sup>2</sup>	8,3	14,7	8,3	7	7	7
400 W/m <sup>2</sup>	12,5	16,3	12,5	10,7	10,7	10,7
600 W/m <sup>2</sup>	20,3	28,2	20,3	19,3	19,3	19,3
800 W/m <sup>2</sup>	22,5	21,6	22,5	22,2	22,2	22,2
1000 W/m <sup>2</sup>	16	17	19,9	18,1	16,6	19

Ensol(W/m <sup>2</sup> )	Tableau des puissances max (W) normalisées à 25 °C					
	R=10 Ohms	R=20 Ohms	R=30 Ohms	R=40 Ohms	R=50 Ohms	R=60 Ohms
200	3,8216961	6,37394395	10,4223556	11,248692	15,636918	10,50702
400	16,4648438	25,7196132	46,141605	51,6624339	76,5260916	78,5867313
600	35,228196	68,3705104	109,236764	136,099353	77,97528	159,416128
800	68,9033188	118,406991	194,019462	163,004448	118,686518	203,591241
1000	103,705664	203,597117	258,680475	200,503326	202,28083	204,672784

ANNEXES 4 : Tracé des courbes de puissances optimales



donnés recueillies			
ensol	puiss	i	u
200	25,5	0,3	85
400	93,5	1,1	85
600	153	1,8	85
800	195,5	2,3	85
1000	238	2,8	85



données const.			
ensol	puiss	inten	tension
200	62,13	0,56	110,4
400	124,5	1,12	110,4
600	186,8	1,7	110,4
800	228,3	2,06	110,4
1000	290,6	2,6	110,4
		0	110,4

