

# Couplage des énergies photovoltaïque et thermique

*Principe, application, évolution, rendement*



Etudiants :

Nathan Bengaouer

Paul Donckele

Valeria Goian

Yann Gressier

Ambdoul-Hafydhou Attoumani

Clément Pontieux

Enseignant responsable du projet :

Bruno Croquette



**Date de remise du rapport : 18/06/2018**

**Référence du projet : STPI/P6/2018 - 007**

**Intitulé du projet : Couplage des énergies photovoltaïque et thermique : principe, applications, évolutions, rendement.**

**Type de projet :** Expérimental

**Objectifs du projet :**

L'objectif principal de ce projet était de réussir à coupler les deux modes de production d'énergie grâce à l'énergie solaire, c'est-à-dire le photovoltaïque et le thermique. L'enjeu principal était de réussir à refroidir le panneau avec un circuit d'eau pour limiter sa perte de rendement due à la hausse de température. Le but de ce projet est a été la réalisation d'une maquette d'un panneau solaire photovoltaïque pour réaliser des expériences afin de déterminer si notre système de refroidissement était performant ou non.

**Mots clés du projet :**

- Expérience
- Maquette
- Puissances électrique et thermique
- Rendement

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>5</b>
<b>Répartition du travail</b>	<b>6</b>
<b>I. Etat de l'art et analyse théorique</b>	<b>6</b>
1.1. Etat de l'art : qu'existe-t-il en matière de couplage des énergies photovoltaïques et thermiques?	6
1.2. Description du mécanisme physique	7
<b>II. Fabrication de la maquette</b>	<b>8</b>
<b>III Analyse des résultats</b>	<b>11</b>
3.1 Analyse Electrique	11
3.2 Analyse thermique de l'expérience	17
3.3 Comment améliorer le rendement ?	19
<b>Conclusion générale :</b>	<b>20</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>21</b>
<b>Annexes</b>	<b>21</b>

## Introduction

L'un des enjeux majeurs de notre ère est celui de l'énergie. Nous devons à la fois éviter l'épuisement de nos énergies fossiles et préserver la couche d'ozone. Pour cela nous devons améliorer le rendement de nos énergies renouvelables, et l'une de ces solutions réside dans l'énergie solaire. Aujourd'hui il existe deux façons de transformer l'énergie lumineuse produite par le soleil en énergie utile : les panneaux solaires photovoltaïques et les panneaux solaires thermiques.

Le panneau photovoltaïque tient son nom aux cellules qui le composent et qui ont la capacité de transformer l'énergie solaire en courant électrique. L'électricité ainsi produite peut soit être utilisée immédiatement ou elle sera stockée dans des batteries prévues à cet effet. Quant au thermique, son but est simplement de chauffer un fluide caloporteur.

L'objectif de notre projet est de réussir à mettre en place un système qui combine ces deux technologies. L'idée étant de rentabiliser la surface occupée par un panneau photovoltaïque en se servant de la chaleur qu'il récupère pour chauffer un fluide. Nous verrons par la suite qu'une telle installation peut directement impacter le rendement électrique du panneau PV.

Dans un premier temps nous verrons quelles sont les technologies déjà présentes sur le marché et quel est le mécanisme utilisé, puis nous développerons pas à pas l'élaboration de notre installation. Enfin nous détaillerons nos expériences en apportant des résultats concrets, tout en gardant un oeil critique sur le bon déroulement d'un tel projet.

## Répartition du travail

Valéria et Ambdoul se sont occupés de la conception du montage électrique, Nathan a quant à lui établi le protocole expérimental. Clément, Paul et Yann ont travaillé sur la conception de la maquette. La mise en commun régulière de nos avancées nous a permis de commencer assez rapidement la construction de la maquette à laquelle nous avons tous participé : Nathan, Ambdoul et Valéria sur l'assemblage des canettes. Clément, Paul et Yann sur l'aménagement du panneau et de la structure en bois. Les expériences ont été effectuées par Nathan, Clément, Paul et Yann. Valéria et Ambdoul se sont chargés d'exploiter les résultats.

## I. Etat de l'art et analyse théorique

### 1.1. Etat de l'art : qu'existe-t-il en matière de couplage des énergies photovoltaïques et thermiques?

Le développement du solaire photovoltaïque est un des principaux enjeux en terme d'énergie renouvelable. Bien que ce procédé soit encore peu utilisé à l'échelle mondiale, en dépit de son coût de production et de sa rentabilité, les recherches menées afin d'améliorer ce système se sont intensifiées au cours de ces dernières années. Le but à long terme est de permettre à cet outil écologique et économique de remplacer les technologies actuelles qui nuisent à l'environnement de part leur pollution et l'épuisement des énergies fossiles dont elles sont la cause. À titre d'exemple, l'Agence Internationale de l'Énergie, une organisation internationale très reconnue pour son rapport annuel concernant l'avenir des énergies, présentait dans son rapport de 2017 la perspective suivante : “Le déploiement rapide du solaire photovoltaïque (PV), tiré par l'Inde et la Chine, permet à l'énergie solaire de devenir la plus importante source bas carbone, en capacité installée, d'ici 2040, date à laquelle l'ensemble des énergies renouvelables atteint 40% de la production totale d'électricité”.

L'intérêt principal du couplage des énergies photovoltaïques et thermiques est de bénéficier des apports en énergie à la fois liés à la chaleur et la lumière, tout en limitant les inconvénients présentés par ces deux énergies prises séparément. Cela nécessite donc la mise en place d'un produit présentant à la fois les caractéristiques d'un panneau thermique et celles d'un panneau photovoltaïque mais de telle sorte que ces deux sources d'énergie “s'assemblent” afin d'améliorer leur rendement.

L'une des illustrations actuelles les plus concrètes que nous avons trouvée en terme d'innovations de couplage d'énergie est le "panneau solaire hybride intelligent" proposé par DualSun, une entreprise innovante fondée en 2010 par deux ingénieurs de l'école Centrale Paris.

"Elle propose une solution solaire compétitive qui fournit localement l'essentiel des énergies du quotidien : l'eau chaude et l'électricité." Il est essentiel de noter que la chaleur emmagasinée par le panneau diminue fortement son rendement.

Pour contrer ces difficultés, DualSun propose alors une solution innovante : utiliser la chaleur dégagée par les cellules photovoltaïques pour chauffer de l'eau (une énergie thermique) mais aussi améliorer le rendement des cellules refroidies grâce à la captation de la chaleur par l'eau. Le diagramme suivant présente de manière approximative les apports de ce couplage d'énergie.



À l'image de DualSun, nous avons décidé de créer notre propre système de refroidissement pour le panneau solaire en y intégrant un stockage d'eau.

## 1.2. Description du mécanisme physique

Mais avant de continuer une petite explication du mécanisme photovoltaïque s'impose. Les cellules sont composées de matériaux semi-conducteurs comme le silicium. Ces matériaux ont la propriété de libérer des électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. Dans notre cas, l'énergie lumineuse apporte des photons qui vont heurter les électrons et les libérer, ce qui crée un courant électrique.

En plus de ne dégager aucun gaz à effet de serre ou agent toxique, le panneau solaire photovoltaïque est composé de matériaux recyclables et sa durée de vie est d'environ 30 ans.

De l'autre côté le panneau solaire thermique utilise la chaleur dégagée par les rayons du soleil. Cette chaleur sera alors transférée à l'aide d'un fluide caloporteur. Le transfert thermique se fait via un matériau conducteur qui va venir chauffer le fluide. De façon générale le panneau solaire thermique sert à produire de l'eau chaude.

La production électrique d'un panneau photovoltaïque dépend de l'intensité du rayonnement solaire qu'il reçoit. Cela nécessite donc de bénéficier de conditions météorologiques favorables. En effet, nous pouvons remarquer que le rendement du panneau diminue de 90% quand il pleut. En revanche, la température n'est pas facteur de production, bien au contraire, l'augmentation de la température à la surface du panneau induit une diminution de son rendement. Plus la température est élevée, plus la tension créée par les cellules aura tendance à baisser. A titre d'exemple, si on a une élévation de température de 20°C la puissance absorbée est réduite d'environ 8%. Il est donc impératif de prévoir un système de refroidissement.

L'enjeu de notre projet est donc de réussir à coupler les deux méthodes de production d'énergie solaire en limitant les baisses de rendement du photovoltaïque.

## II. Fabrication de la maquette

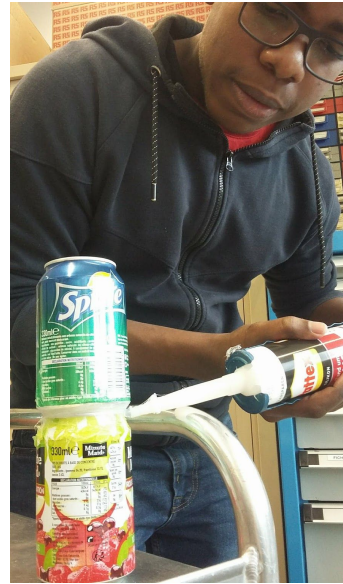
Nous nous sommes d'abord intéressés à mettre en place un système de refroidissement constitué d'un circuit d'eau mais nous nous sommes vite rendus compte de la complexité d'une telle structure. Ne voulant pas acheter un circuit déjà tout fait, nous avons cherché une alternative visant à coupler l'énergie thermique et photovoltaïque tout en refroidissant le panneau, de manière à avoir le meilleur rendement possible. Dans une démarche s'inscrivant dans le développement durable, nous nous sommes vite penchés sur l'utilisation de canettes afin de réaliser une réserve d'eau. Constituées d'aluminium, elles s'avèrent optimales pour combiner une bonne conductivité thermique tout en restant accessibles.



C'est à ce moment que s'est posée la question de l'assemblage de ces canettes et de leur disposition. Nous avons essayé de relancer l'idée du circuit mais les canettes imposaient trop de contraintes quant à l'assemblage. Nous nous sommes finalement positionné sur l'idée de réaliser des colonnes d'eau en perçant et en fixant les canettes les unes aux autres à l'aide de joints en silicone. C'est une tâche longue nécessitant de la minutie puisque nous pouvions tester l'étanchéité de nos assemblages de canettes que la semaine d'après, le temps que la jointure soit sèche.



Perçage des canettes



Pose du joint entre les canettes

Nous avons des doutes quant à la fiabilité de cette mise en oeuvre, en effet nous ne savions pas si un tel joint, déposé sur de l'aluminium, pouvait supporter une certaine pression d'eau. Les tests de solidité et d'imperméabilité s'avèrent convaincants puisque plus de la moitié des colonnes ne présentaient pas de fuites, les autres nécessitant que de simples retouches.

Dans la continuité du raisonnement, nous avons songé à répartir les canettes sur toute la surface du panneau, mais cela implique d'en avoir un nombre conséquent, de plus nous voulions séparer la partie thermique et électrique pour ne pas être encombré lors des manipulations. Les canettes étant trop épaisses par rapport à la profondeur du panneau, nous avons créé une surépaisseur à l'aide de cales en bois afin de pouvoir les disposer convenablement. Le problème ici était de trouver un système pratique, démontable, dans l'objectif de pouvoir réaliser plusieurs expériences sans encombres.

Nous avons donc vissé les tasseaux de bois sur le cadre du panneau photovoltaïque, en formant un rectangle dimensionné à la hauteur des colonnes pour avoir un ensemble compact. Une fois les colonnes en place il fallait trouver un moyen simple de les maintenir, nous avons donc découpé puis vissé une plaque de plexiglas sur le cadre en bois. Ce système nous offre la possibilité d'accéder aux canettes facilement à l'aide d'un simple tournevis.



Structure en bois fixée au panneau

La réalisation de ce système thermique nous a permis de nous rendre compte de la complexité de l'élaboration de notre maquette, même si elle pouvait paraître simple au premier abord. En effet, la phase de conception et de réflexion est sans doute la plus longue, il faut réussir à s'imaginer le système final en fonctionnement, avec un oeil critique, afin de ne pas surestimer la fiabilité de la structure qui n'est encore que fictive. De plus, il ne faut pas se focaliser que sur une méthode dans la mesure où il faut pouvoir rebondir rapidement si le système ne fonctionne pas une fois réalisé.

## III Analyse des résultats

### 3.1 Analyse Electrique

#### 3.1.1 Installation du panneau hybride

Nous avons choisi, pour effectuer les mesures, de placer le panneau photovoltaïque dans un endroit accessible et dépourvu de zones d'ombre. Nous avons donc installé celui-ci sur une zone d'herbe à l'entrée Est du Bâtiment Dumont d'Urville. Ce choix d'emplacement a été fait pour différentes raisons.

Premièrement, c'est un terrain accessible puisque le transport du panneau et des colonnes de canettes y est facilité, grâce à sa proximité avec l'atelier et l'utilisation possible de l'ascenseur. De plus, une zone herbacée offre de meilleures conditions pour réaliser des mesures. En effet, la température de l'air situé entre le sol et un mètre au dessus de celui-ci est fortement influencée par la nature des premières couches du sol. Plutôt qu'un sol minéral, nous avons donc opté pour cette zone végétale, dans un objectif d'obtenir une température la plus basse possible et ainsi d'améliorer le rendement électrique du panneau.

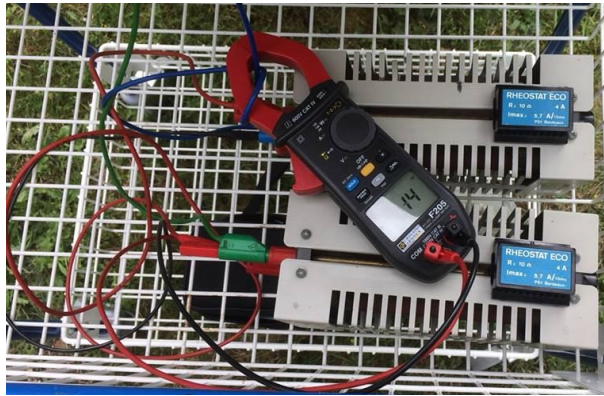
Ensuite, nous avons posé le panneau sur le chariot afin de le maintenir orienté vers le soleil, avec un inclinaison d'environ  $30^\circ$ , ce qui correspond à l'inclinaison optimale.

#### 3.1.2 Liste du matériel utilisé

Pour réaliser l'expérience, nous avons utilisé :

- **Panneau photovoltaïque** ( $54\text{cm} \times 140\text{cm} = 0,76\text{m}^2$ ) - Puissance constructeur 110W pour  $P_{lum} = 1100\text{W}$
- **1 Wattmètre** et **2 rhéostats** (4A, 5,4A/15min)

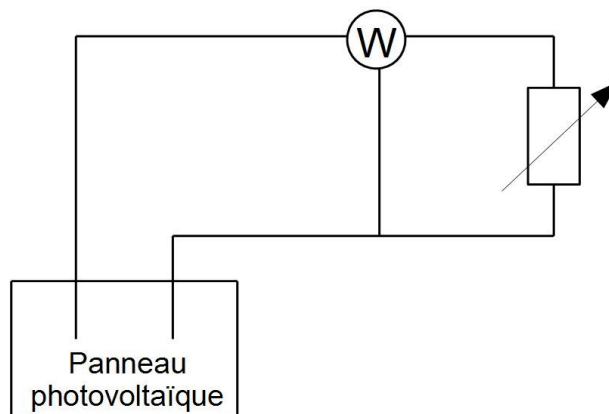
L'intensité maximale qui peut traverser un des deux rhéostats est de 4A, avec un pic admissible à 5,7A/15min. Or l'intensité constructeur du panneau photovoltaïque est de 7A, c'est pourquoi nous avons choisi, afin de s'assurer de la protection des appareils électriques, de placer 2 rhéostats en dérivation. Ainsi, un pont diviseur de courant est créé et l'intensité du courant traversant un rhéostat est bien inférieure à l'intensité théorique du panneau photovoltaïque.



- 1 solarimètre (Ref : SL200)



### Schéma du circuit électrique



### 3.1.3 Mesure de $P_{lum}$

Pour mesurer la puissance lumineuse reçue par le panneau photovoltaïque, nous avons disposé la surface réceptrice du solarimètre dans le même plan que celui des cellules photovoltaïques, accolées à celles-ci. Le jour de nos mesures, le temps était très ensoleillé et l'intensité lumineuse du soleil a été globalement constante. Nous avons relevé les valeurs de puissance lumineuse ( $P_{lum}$ ) indiquées par le solarimètre à intervalles réguliers (4 min), qui sont indiquées ci-dessous.

### 3.1.4 Recherche de $W_{max}$

Pour que la puissance produite par le panneau photovoltaïque soit la plus proche possible de la puissance annoncée par le constructeur, il est nécessaire de faire des réglages précis concernant la tension et l'intensité aux bornes de celui-ci. Dans notre cas, il est judicieux d'utiliser un système de rhéostats dans le but d'ajuster la résistance du circuit, donc la tension aux bornes du panneau. À intervalles réguliers, on recherche cette résistance optimale en faisant varier les deux rhéostats. Une fois déterminée, on garde ces réglages jusqu'à la prochaine mesure.

### 3.1.5 Résultats et analyse des mesures

Ces mesures ont été réalisées plusieurs fois sur deux installations différentes. Premièrement, nous les avons effectuées sur une installation « à vide », c'est-à-dire sans avoir apposé les colonnes de canettes derrière le panneau.

Les résultats sont les suivants :

Temps (min)	0	4	8	12	16	20	24
$P_{lum}$ (W)	1014	998	1008	1023	1011	1003	995
$P_{elec1}$ (W)	72,1	68,4	66,5	64,8	61,2	58,6	57,3
Rendement électrique RE1 (%)	7,11	6,85	6,60	6,33	6,05	5,84	5,76

Tableau présentant  $P_{lum}$ ,  $P_{elec1}$  et RE1 en fonction du temps dans le cas du panneau à vide

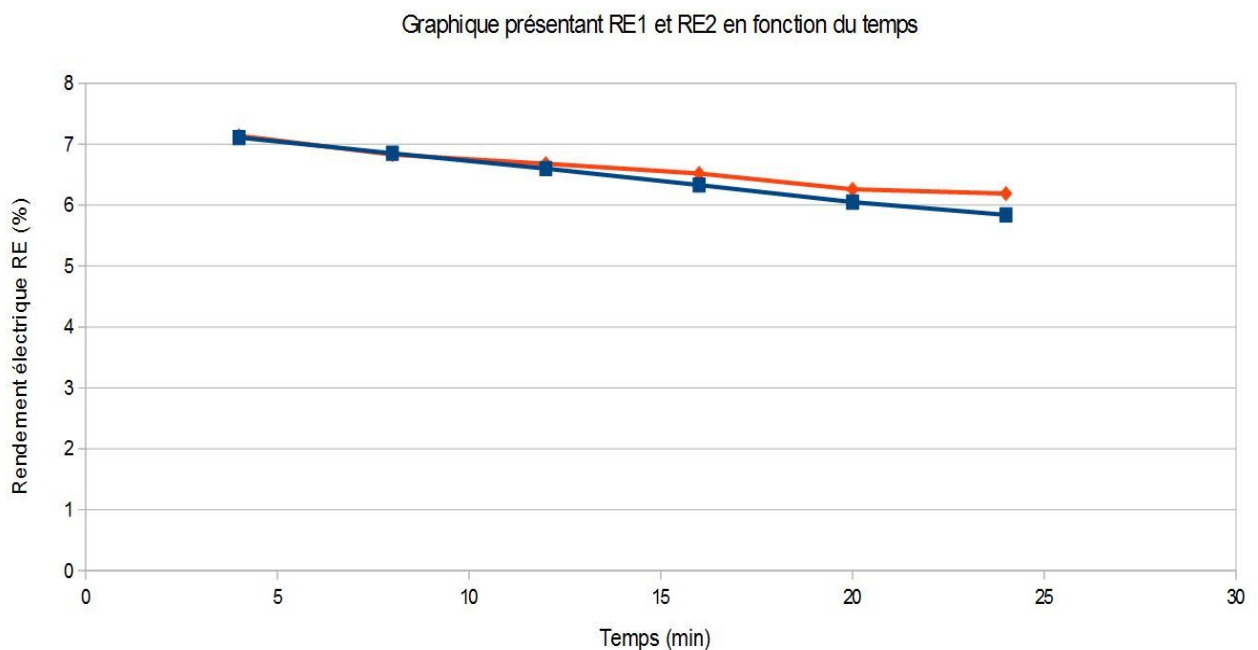
Ensuite, nous avons répété l'opération avec le système complet, c'est-à-dire avec les canettes.

Temps (min)	0	4	8	12	16	20	24
$P_{lum}$ (W)	991	1005	993	998	1012	1003	998
$P_{elec2}$ (W)	70,8	68,6	66,3	65,1	63,4	62,1	60,0
Rendement électrique RE2 (%)	7,14	6,83	6,68	6,52	6,26	6,19	6,01

Tableau présentant  $P_{lum}$ ,  $P_{elec1}$  et RE2 en fonction du temps dans le cas du panneau chargé

En comparant les courbes d'évolution du rendement électrique de ces deux systèmes, nous pourrions ainsi déterminer l'effet de l'apposition de ces colonnes d'eau au panneau photovoltaïque.

Le graphique ci-dessous présente l'évolution des rendements électriques RE1 (à vide, en bleu) et RE2 (système chargé avec les colonnes de canettes, en rouge) au cours du temps.



Ces résultats permettent de déduire de cette expérience plusieurs conclusions concernant l'efficacité électrique d'un tel système.

Premièrement, nous pouvons observer, de manière évidente, que les rendements des deux systèmes sont décroissants au cours du temps. Cela s'explique, comme développé par ailleurs, par le simple fait que la température du panneau soit croissante au cours du temps.

Ainsi, notre système ne permet pas d'obtenir un rendement constant voire croissante. Cependant, il influe sur la diminution de celui-ci. En effet, nous pouvons observer que la fonction RE2-RE1 est croissante au cours du temps. Autrement dit, au cours du temps, la différence entre RE2 et RE1 augmente, ce qui signifie qu'à un instant suffisamment retardé par rapport à l'origine temporel, le rendement du panneau chargé de canettes est supérieure à celui du panneau à vide.

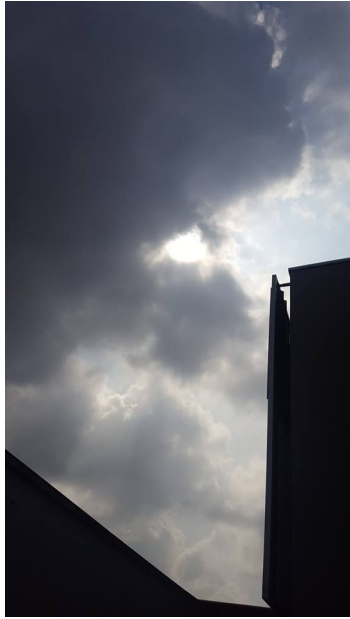
Cependant, nous avons réalisé l'expérience pendant une durée relativement courte par rapport à une installation domestique, dans laquelle le panneau serait exposé environ 12h. Par conséquent, nous pouvons seulement calculer la différence de rendement jusqu'à 24 min.

A  $t=24\text{min}$ , on a  $RE1= 5,76\%$  et  $RE2=6,01\%$  donc  $RE2/RE1 = 1,04$ .

Nous pouvons donc en déduire que le rendement électrique au terme de 24 min d'exposition est augmenté de 4% en utilisant le système de refroidissement que nous avons conçu.

Il serait cependant intéressant, en réalisant la même expérience sur une durée beaucoup plus longue, d'étudier l'instant à partir duquel notre système devient inefficace, ou au contraire de voir à partir de combien de temps notre système s'avère optimal par rapport à une installations classique.

Nous voyons là l'inconvénient d'un projet dépendant de la météo, en effet, nous n'avons pas été en mesure d'effectuer une manipulation de plus de 30min, par conséquent nous sommes dans l'incapacité de fournir des résultats très flatteurs, cependant nous pouvons noter une différence de rendement, ce qui est essentiel. Voici des clichés pris à un intervalle de 10 minutes illustrant la plus grande contrainte à laquelle on a dû faire face:



Puissance lumineuse:  $60\text{W.m}^2$



Puissance lumineuse:  $1000\text{W.m}^2$



## 3.2 Analyse thermique de l'expérience

Nous voulions au départ créer un système d'eau pour refroidir le panneau afin d'améliorer son rendement. Cependant nous nous sommes rendus compte que nous pouvions nous servir de la chaleur dégagée par les cellules pour, par exemple, alimenter une réserve d'eau. Nous procédons donc à une analyse qualitative de notre système afin d'évaluer le rendement de cette manoeuvre. L'expérience était menée à 27.2 +/- 2°C.

### 3.2.1 Réalisation des mesures de la température des canettes

Nous avons d'abord relevé les températures de chaque colonne composée de 5 canettes avant et après l'expérience. Les résultats sont indiqués ci-dessous :

	Colonne 1	Colonne 2	Colonne 3	Colonne 4
T1 (en °C)	23,5	22,5	20,7	20,4
T2 (en °C)	26,6	26	24,6	25
$\Delta T$	3,1	3,5	3,9	4,6

### 3.2.2 Calcul de la masse d'eau par colonne de canettes

Avant toute chose, il nous faut calculer la masse d'eau utilisée pour l'expérience, calcul peu compliqué car il suffit de multiplier le volume par le nombre de canettes et par la masse volumique de l'eau qui est égale à 1000g/L ce qui revient à multiplier par 1 pour avoir le résultat en kg. Ce calcul nous donne le résultat suivant :

$$V_{eau/colonne} = 5 \times 0,330 = 1,65L \Rightarrow m_{eau} = 1,65kg$$

### 3.2.3 Détermination de l'énergie thermique utile

Par la suite nous souhaitons calculer l'énergie thermique utile, il faut faire la

somme du produit de chaque  $\Delta T$  par la masse et la capacité thermique massique de l'eau. Encore une fois le résultat est donné ci-dessous :

$$\begin{aligned}
 E_{th} &= \sum m \times C_{eau} \Delta T = \\
 &= 4180 \times 1,65 \times [(26,6 - 23,5) + (26 - 22,5) + (24,6 - 20,1) + (26,0 - 24,4)] \approx \\
 &\approx 115.10^3 J \approx 32W.h
 \end{aligned}$$

### 3.2.4 Détermination du rendement

Mais dans notre étude c'est le rendement qui nous intéresse, nous devons faire le quotient de l'énergie utile thermique par l'énergie totale absorbée par le panneau. Pour calculer l'énergie totale absorbée par le panneau, nous pouvons considérer que la puissance lumineuse surfacique absorbée ( $P_{lums}$ ) est constante et égale à  $1000W/m^2$ . Etant donnée que la surface du panneau est de  $0,76m^2$ , nous pouvons en déduire que :

$$E_{lum} = P_{lum} * 24/60 = P_{lums} * 0,76 * 24/60 = 300 W.h$$

On obtient donc :

$$\frac{E_{th}}{E_{abs}} = \frac{32W.h}{300W.h} = 0,106$$

Plusieurs conclusions ressortent de cette analyse; premièrement il est impératif de mettre en place un système pour récupérer l'énergie thermique de l'eau contenue dans les canettes. Nous pouvons par exemple mettre en place un système de valves permettant de remplacer l'eau assez régulièrement. Ensuite, si on veut aller encore plus loin, on peut envisager de créer un circuit d'eau réparti sur toute la surface des panneaux, afin que l'eau soit chauffé de manière plus homogène. Mais dans notre démarche d'analyse énergétique, le système que nous avons conçu est convenable.

De plus concernant le rendement, on s'aperçoit qu'en sommant l'électrique et le thermique on passe d'un rendement d'environ 5% à un rendement avoisinant les 15%, c'est significatif.

### 3.3 Comment améliorer le rendement ?

D'abord il est évident que l'acquisition d'un panneau photovoltaïque des plus performants du marché (environ 20% pour la partie électrique), le rendement serait déjà plus important. Ensuite pour améliorer de manière conséquente le rendement global, c'est-à-dire en prenant en compte la production d'énergie électrique mais aussi thermique, nous devons a priori diriger nos efforts vers une amélioration du système de stockage fluide. Autrement dit, il est facilement envisageable de modifier la conception et les matériaux du système de stockage afin d'optimiser la conductivité thermique. En revanche le système électrique n'est pas réellement modifiable. Cependant, nous avons pensé à deux améliorations possibles, qui concernent toutes deux le matériel électrique utilisé.

Premièrement, un wattmètre de qualité supérieure nous permettrait de prendre connaissance, à chaque instant, de la puissance produite par le panneau de manière plus précise. Ainsi, nous pourrions mieux ajuster la résistance optimale créée par le couple de rhéostats, et donc obtenir une puissance légèrement supérieure, donc un meilleur rendement. Deuxièmement, pour les mêmes raisons, des rhéostats plus précis nous permettraient d'avoir une meilleure approximation de la puissance maximale.

## Conclusion générale :

Ce projet nous a permis de développer notre autonomie et esprit d'équipe. De plus, nous avons vraiment pu nous rendre compte de la difficulté de réaliser une expérience de qualification d'un système. Comme évoqué précédemment le soleil n'était pas toujours au rendez-vous et c'est pourquoi nous avons dû être les plus efficaces possibles lorsque les conditions étaient optimales.

Par notre étude des panneaux solaires, nous sommes maintenant à même de répondre à la question suivante :

- En quoi une installation "thermo photovoltaïque" est-elle plus intéressante qu'une installation pv + installation thermique ?

### **Avantages du couplage**

- Augmentation du rendement du capteur photovoltaïque en stoppant l'augmentation de la température
- Optimisation de l'espace : on économise de l'espace en produisant de l'électricité et de la chaleur sur une même surface
- Génération d'économies + indépendance énergétique
- Le système est plus silencieux et plus économique que l'installation d'un système thermique simple (pompe à chaleur)

## Bibliographie

<http://forum-photovoltaique.fr/viewtopic.php?f=15&t=31755&sid=4a797475dbc31806bad04df8b68723c7&start=20>

[https://pedagogie.ac-orleans-tours.fr/fileadmin/user\\_upload/physique/accompagnement\\_personnalise/premiere/AP\\_1S\\_mesures\\_incertitudes\\_prof\\_DILUTION.pdf](https://pedagogie.ac-orleans-tours.fr/fileadmin/user_upload/physique/accompagnement_personnalise/premiere/AP_1S_mesures_incertitudes_prof_DILUTION.pdf)

## Annexes

### Remerciements

Nous voulons remercier M. Croquette pour avoir mis à disposition tout le matériel nécessaire pour notre projet et de plus pour avoir été attentif à nos demandes et investi dans le bon fonctionnement de nos expériences.

Nous voulons aussi remercier le personnel de l'atelier pour nous avoir laissé utiliser leur matériel et en avoir commandé quand c'était nécessaire.