

Laura GUILLON<sup>1\*</sup>  
 Guillermo QUESADA<sup>1</sup>  
 Daniel ROUSSE<sup>1</sup>  
 Michel DROUIN<sup>2</sup>  
 Luis ABELLA<sup>3</sup>  
 Pierre-Luc PARADIS<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Chaire de recherche industrielle en technologies de l'énergie et en efficacité énergétique (t3e) (École de Technologie Supérieure, Montréal, Canada)

<sup>2</sup> Département de Génie Mécanique (École de Technologie Supérieure, Montréal, Canada)

<sup>3</sup> Entreprise Dyco solar (Hawkesbury, Canada)

\* Auteur correspondant  
 (laura.guillon.1@ens.etsmtl.ca)

## ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE L'INFLUENCE DE LA NÉBULOSITÉ SUR LA PERFORMANCE D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE AVEC SUIVEUR SOLAIRE

**Résumé :** Cette étude expérimentale porte sur des mesures de rayonnement solaire incident et de production d'énergie électrique de deux panneaux photovoltaïques (PV). L'un des panneaux PV est constamment orienté vers le zénith tandis que le second est doté d'un suiveur solaire biaxial. Les résultats obtenus montrent que, lors de conditions de forte nébulosité, la stratégie d'orienter les panneaux vers le zénith peut augmenter jusqu'à 25 % la production d'énergie électrique par rapport à un système qui traque le Soleil. Ce travail présente donc une stratégie pour optimiser et améliorer l'efficacité des systèmes de suivi solaire lors des journées nuageuses.

**Mots clés :** Énergie solaire, Énergie renouvelable, Photovoltaïque, Système de suiveur solaire

### Nomenclature

$E$  énergie électrique horaire produite, Wh  
 $I$  rayonnement solaire horaire, Wh/m<sup>2</sup>  
 $TA$  avantage du suivi solaire, %

### Indices / Exposants

$DST$  surface pointant directement vers le Soleil  
 $0^\circ$  surface orientée vers le zénith  
 $c$  critique

### 1. Introduction

Les mécanismes de suivi solaire permettent de maximiser l'irradiation solaire en orientant la surface des panneaux PV perpendiculairement aux rayons du Soleil en fonction des angles d'altitude (nord/sud) et d'azimut (est/ouest) du Soleil. De nombreuses études scientifiques [1] ont démontré qu'un système PV doté d'un suiveur solaire produit entre 20 et 50 % plus d'énergie que des systèmes fixes. En période ensoleillée, lorsque le rayonnement solaire direct représente environ 90% de l'énergie solaire totale, la stratégie de suivi solaire augmente donc considérablement la production d'énergie électrique. Cependant qu'advient-il lors de journées nuageuses où le rayonnement solaire global incident se compose majoritairement de rayonnement diffus?

De récentes études [2] [3] proposent d'orienter les modules photovoltaïques vers le zénith (position horizontale) en période de forte nébulosité afin de capter un maximum de rayonnement diffus.

Une étude réalisée par Kelly et Gibson [2] présente des mesures expérimentales de rayonnements solaires incidents sur une surface horizontale et sur une surface pointant le Soleil ( $DST$ ), durant des journées nuageuses à l'aide de six pyranomètres différents. Les auteurs y définissent  $TA$  l'avantage d'un dispositif de suivi solaire tel que :

$$TA = \frac{1 - \frac{I_{0^\circ}}{I_{DST}}}{\frac{I_{0^\circ}}{I_{DST}}} \quad (1)$$

En période nuageuse, les valeurs d'avantage obtenues sont négatives (entre -0,17 et -0,45, avec une valeur moyenne de -0,31). La conclusion de l'étude suggérait de fixer la surface des panneaux PV vers le zénith dans de telles conditions météorologiques.

Une seconde étude des mêmes auteurs [3] visait à mesurer le rayonnement solaire incident sur quatre panneaux PV identiques inclinés à différents angles (57 °, 42 °, 27 ° et 0 °) sur une période d'une heure autour de midi (heure civile). Finalement, selon leurs estimations [3], un panneau PV en position horizontale générerait jusqu'à 50 % plus d'énergie qu'un suiveur solaire au cours d'une journée complètement nuageuse.

Toujours afin d'optimiser la production d'énergie d'un suiveur solaire, une méthodologie théorique a été développée par Quesada et al. [4] afin de déterminer le rayonnement solaire incident critique «  $I_c$  » en dessous duquel un panneau horizontal reçoit plus d'irradiation qu'un panneau suiveur.

L'objectif principal du présent travail est de déterminer si la stratégie d'orienter les panneaux PV vers le zénith en période de forte nébulosité augmente effectivement la performance énergétique d'un suiveur solaire bi-axial. Dans un premier temps, ce travail consiste à s'assurer que des résultats expérimentaux similaires aux précédentes études expérimentales [2] [3] pourraient être obtenus pour la ville de Montréal, puis à valider la méthodologie théorique [4] qui évalue la disponibilité en énergie solaire pour une localité de l'hémisphère nord.

## 2. Étude expérimentale

Le montage expérimental utilisé dans cette étude est situé à Montréal (latitude = 45 ° 29 ' N, longitude = 73 ° 33 ' O). Il est composé de deux panneaux photovoltaïques polycristallins dont les caractéristiques, dans les conditions standard, sont résumées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques des panneaux PV.

Type	SG210P
Puissance nominale	210 W
Courant de court-circuit	7,9 A
Tension à vide	36,8 V
Tension nominale	28,7 V

Comme présenté sur la Figure 1a, le panneau à gauche est fixe et en position horizontale alors que le second, à droite, est doté d'un suiveur solaire bi-axial « SDE3B-62MHC-24H01-RC » de l'entreprise Kinematics.



Figure 1 : Photographie du montage expérimental à Montréal (a) vue d'ensemble avec le panneau fixe horizontal à gauche et le suiveur solaire à droite (b) agrandissement illustrant les moteurs du suiveur solaire

Le rayonnement solaire incident sur les surfaces des panneaux PV est mesuré à l'aide de deux pyranomètres Kipp & Zonen SP Lite 2, installés sur la structure de chaque panneau PV.

Afin de protéger le mécanisme du suiveur solaire, un anémomètre Davis Vantage Pro2 6410 mesure continuellement la vitesse du vent à proximité du montage expérimental. Si cette vitesse devient supérieure à 60 km/h, le système de contrôle reçoit l'ordre de placer le panneau PV en position horizontale par mesure de sécurité.

Les mesures de tension et de courant généré par les panneaux se font, respectivement, à l'aide de circuits diviseurs de tension et de transducteurs de courant CR5210-10.

Le système d'acquisition de données est composé d'une carte National Instruments USB-6218 connectée à un ordinateur par un port USB et du logiciel LabVIEW. Ce système est utilisé à la fois pour l'acquisition et le traitement de données, mais aussi pour l'exploitation et le contrôle du mécanisme de poursuite solaire. Toutes les données acquises sont enregistrées chaque seconde. Cette fréquence d'acquisition permet d'observer le mouvement des moteurs et de déterminer leur consommation électrique.

Pour analyser les données expérimentales obtenues ainsi que pour présenter les résultats, le logiciel MATLAB a été utilisé. Pour faciliter la comparaison des résultats quelque soit la situation géographique, ceux-ci sont exprimés en heure solaire plutôt qu'en heure civile.

Un sous-programme LabVIEW calcule en tout temps les angles d'altitude et d'azimut du soleil à partir de l'emplacement géographique, de la date et de l'heure civile. Les formules utilisées dans ce programme proviennent du classique de Duffie et Beckman [5]. En mode automatique, lors du suivi

solaire, les deux moteurs ont pour consigne d'ajuster leur angle afin qu'ils correspondent à celui du soleil.

Les mesures expérimentales se sont déroulées entre le 6 et le 26 mai 2013 puis entre le 10 juin et le 3 juillet 2013. Afin de s'approcher des conditions réelles d'utilisation des panneaux PV, des charges électriques résistives Vishay Dale type HLZ30007Z8R000KJ de 8  $\Omega$  et 300 W (Tolérance  $\pm 10$ ) ont été installées.

Des mesures de courants et de tensions aux bornes de ces résistances ont permis de calculer la puissance dissipée dans chacune d'entre elles. En intégrant ces valeurs sur une période d'une heure, il a été possible de déterminer l'énergie produite par chacun des deux panneaux. Enfin, l'avantage du suiveur solaire par rapport à un système fixe et horizontal est estimé à l'aide d'une équation similaire à celle proposée par Kelly et Gibson [2].

$$TA = \frac{1 - \frac{E_{0^\circ}}{E_{DST}}}{\frac{E_{0^\circ}}{E_{DST}}} \quad (2)$$

### 3. Résultats et discussions

Dans le Tableau 2, la colonne  $I_c$  présente le rayonnement solaire horaire critique calculé à l'aide de la méthodologie théorique développée par Quesada et al. [4]. La colonne  $I_{0^\circ}$  indique le rayonnement solaire incident sur la surface horizontale mesuré pour chaque heure solaire de la journée. L'avantage du suivi solaire  $TA$  présenté dans la dernière colonne est calculé à partir des énergies dissipées dans les deux charges électriques résistives à l'aide de l'équation (2).

Tableau 2 : Résultats théoriques et expérimentaux pour le 11 Juin 2013 en fonction de l'heure solaire (phase 3)

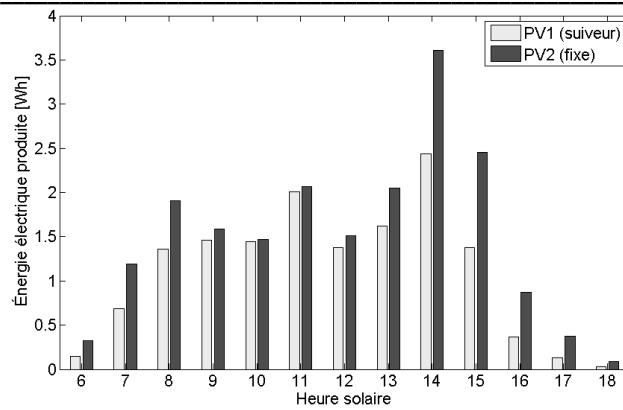
Heure solaire	$I_c$ (Wh/m <sup>2</sup> )	$I_{0^\circ}$ (Wh/m <sup>2</sup> )	$TA$ (%)
6h	130,6	27,4 $\pm$ 1,4	-54,0 $\pm$ 2,7
7h	223,5	47,3 $\pm$ 1,4	-42,4 $\pm$ 1,7
8h	317,9	56,4 $\pm$ 1,4	-28,5 $\pm$ 1,7
9h	404,0	51,0 $\pm$ 1,4	-7,8 $\pm$ 2,3
10h	472,8	50,0 $\pm$ 1,4	-1,9 $\pm$ 2,5
11h	517,1	59,5 $\pm$ 1,4	-3,1 $\pm$ 2,2
12h	532,4	48,8 $\pm$ 1,4	-9,2 $\pm$ 2,3
13h	517,1	57,0 $\pm$ 1,4	-20,9 $\pm$ 1,9
14h	472,8	77,1 $\pm$ 1,4	-32,4 $\pm$ 1,4
15h	404,0	64,8 $\pm$ 1,4	-43,8 $\pm$ 1,3
16h	317,9	40,2 $\pm$ 1,4	-58,3 $\pm$ 1,6
17h	223,5	28,2 $\pm$ 1,4	-65,1 $\pm$ 2,0
18h	130,6	16,4 $\pm$ 1,4	-67,0 $\pm$ 3,9
Total	4664,2	639,7 $\pm$ 19,6	-27,37 $\pm$ 0,15

Comme présenté dans le Tableau 2, lors de la journée nuageuse du 11 Juin 2013, il a été désavantageux de suivre le soleil puisque le panneau PV orienté vers le zénith a produit 27,37 % plus d'énergie que le suiveur solaire sur la journée complète.

Le désavantage horaire le plus important (67,0 %) a été obtenu entre 18 h et 19 h et le plus faible (3,1 %) entre 11 h et 12 h. Entre 10 h et 11 h, la valeur obtenue (-1,9  $\pm$  2,5 %) ne permet pas de conclure s'il y a un avantage ou un désavantage puisque l'incertitude est plus importante que la valeur mesurée. Lors de journées entièrement nuageuses, les désavantages les plus importants sont obtenus durant le lever et le coucher du soleil lorsque le panneau suiveur a une forte inclinaison et ne « voit » qu'une faible partie du ciel. Inversement, les valeurs minimales du désavantage se situent proche du midi solaire.

De plus, pour chaque heure, le rayonnement solaire incident critique est toujours supérieur au rayonnement solaire incident sur la surface horizontale. Cette journée permet donc de valider la méthodologie théorique.

La Figure 2 représente l'énergie électrique produite par chacun des panneaux. Tout au long de la journée, le panneau fixe et horizontal (barres verticales foncées) a produit plus d'énergie électrique que le panneau suivant le Soleil. C'est pour cette raison que seulement des valeurs négatives d'avantage de suivi solaire ont été obtenues pour cette journée typiquement nuageuse.

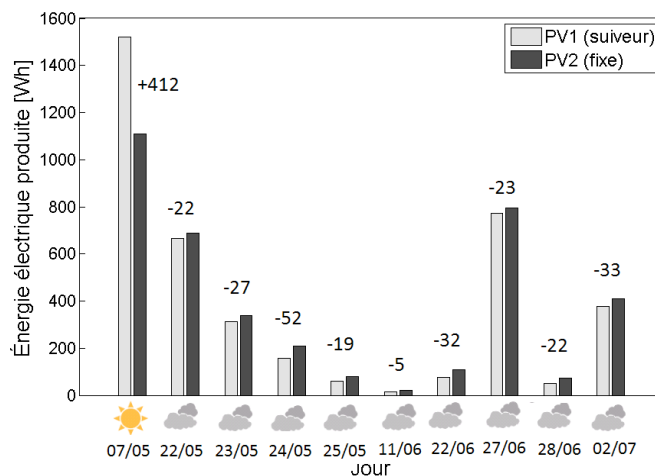


**Figure 2 :** Énergie produite par les panneaux PV pour une journée typiquement nuageuse (11/06/2013)

Ce test comprenait huit journées entièrement nuageuses, au cours desquelles pendant 90 heures, la valeur du rayonnement solaire global incident critique a été supérieure à celle du rayonnement solaire global incident sur la surface horizontale ( $I_c > I_{0^\circ}$ ). En accord avec la méthodologie théorique, 96 % de cette proportion coïncide avec une valeur négative pronostiquée de l'avantage de suivi solaire.

L'étude des mesures de rayonnement a permis de constater que les erreurs de la méthode théorique (4 % des mesures) ont lieu essentiellement tôt le matin ou tard l'après-midi. Celles-ci pourraient être dues au fait que la méthode théorique suppose que l'heure entière soit nuageuse (ciel isotrope), alors qu'en réalité des périodes d'éclaircies ont été observées. Ces percées de soleil ont une forte influence durant le lever et le coucher du soleil en raison de la différence entre les angles d'incidence du rayonnement solaire direct sur les deux surfaces des panneaux. Il sera nécessaire d'effectuer des tests supplémentaires afin de valider cette hypothèse.

La Figure 3 présente la quantité d'énergie électrique produite par les deux panneaux ainsi que la différence entre celles-ci pour différentes journées et pour les caractéristiques des panneaux utilisés dans cette étude.



**Figure 3 :** Énergie électrique produite par les deux panneaux et différence entre ces deux productions pour différentes journées

La journée du 7 Mai 2013 a été entièrement ensoleillée et le suiveur solaire a produit 1521 Wh. Cela correspond à 412 Wh de plus que la production du panneau fixe et horizontal. Ces valeurs donnent un aperçu de l'ordre de grandeur de la différence de production d'énergie électrique en journée ensoleillée cependant, en général, les panneaux fixes sont inclinés, et non horizontaux ce qui devrait réduire la différence observée pour le 7 Mai. Les autres journées présentées sur la Figure 3 sont toutes nuageuses. Lors de certaines d'entre elles (22/05 et 27/06), la quantité d'énergie produite représente la moitié de celle produite en journée ensoleillée (07/05), tandis que pour d'autres cette quantité est très faible. L'analyse des résultats a mis en avant le fait, qu'une production d'énergie supérieure à 200 Wh par jour est due à l'existence de périodes d'éclaircies. Pour les journées de très faibles productions (24/05, 25/05, 11/06, 22/06, 28/06), il s'agit plutôt de journées sans aucune percée de soleil. Lors des journées nuageuses, le panneau horizontal a produit entre 5 Wh et 52 Wh plus d'électricité que le suiveur solaire. D'après les premières observations, cette variation semble liée aux types de nuages présents lors des mesures.

De plus, étant donné que la différence de production des deux panneaux PV ne tient pas compte de la consommation électrique des deux moteurs, celle-ci devrait être plus élevée. Enfin, ces résultats sont valables uniquement pour les panneaux PV utilisés (voir le Tableau 1) néanmoins dans le cadre de systèmes solaires composés de plusieurs modules, la stratégie de placer les panneaux PV en position horizontale durant les journées nuageuses devrait augmenter considérablement la production d'énergie électrique.

## 5. Conclusion

L'objectif principal de ce travail était de déterminer si la stratégie d'orienter les panneaux PV vers le zénith en période de forte nébulosité augmenterait la performance énergétique d'un suiveur solaire bi-axial. Pour cela, une campagne de mesures a été réalisée à Montréal afin de mesurer le rayonnement solaire incident et la production d'énergie électrique de deux panneaux PV (l'un suivant le Soleil et le second horizontal).

Les résultats ont montré qu'un panneau suiveur solaire peut produire jusqu'à 25 % moins d'énergie électrique qu'un panneau horizontal lors de journées nuageuses durant les journées de printemps étudiées. En période hivernale, on peut s'attendre à obtenir des désavantages plus importants puisque le Soleil a une altitude moins importante et que le panneau suiveur est fortement incliné. La stratégie d'orienter les modules PV vers le zénith permet à la fois de produire plus, mais aussi de consommer moins d'énergie électrique pour déplacer les panneaux PV.

Ensuite, lors des tests avec le suiveur solaire, les données ont validé la méthodologie développée par Quesada et al. [4], puisque lorsque le rayonnement solaire incident réel était inférieur au rayonnement critique  $I_c$ , l'avantage du suivi solaire était négatif dans 96 % des cas. Cependant, il existe des limites à l'utilisation de cette méthode puisqu'elle ne s'applique que dans les cas où, pendant une heure, le ciel pourrait être considéré comme isotrope (ciel complètement nuageux). Il faudrait vérifier son application lors de l'apparition de périodes d'éclaircies où des désavantages de suivi solaire ont aussi été constatés.

Actuellement, des tests similaires sont poursuivis par les auteurs de ce travail afin de compléter la base de données existante. Et à l'avenir, des expériences seront réalisées sur des panneaux PV avec et sans suiveur solaire branchés sur le réseau d'Hydro-Québec. Celles-ci permettront de déterminer, sur une base annuelle, si la stratégie proposée augmente de façon significative la quantité d'énergie électrique produite.

## Remerciements :

Les auteurs désirent remercier les partenaires de la Chaire de recherche t3e : Ville de Lévis, Ecosystem, Ultramar, CRE-CA, SDE-Lévis and Roche. De plus, les auteurs souhaitent remercier Alain Grimard et Patrick Sheridan, membres du Département de Génie Mécanique de l'École de technologie supérieure pour leur contribution à l'élaboration du système d'acquisition et du banc d'essai.

## Références

- [1] H. MOUSAZADEH, A. KEYHANI, A. JAVADI, H. MOBILI, K.ABRINIA, A.SHARIFI A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output, *Renewable and Sustainable Energy Reviews Journal*, Vol. 13, No 8, pp. 1800-1818, 2009.
- [2] N.A. KELLY, T.L. GIBSON, Improved photovoltaic energy output for cloudy conditions with a solar tracking system, *Solar Energy*, Vol. 83, No 11, pp. 2092-2102, 2009.
- [3] N.A. KELLY, T.L. GIBSON, Increasing the solar photovoltaic energy capture on sunny and cloudy days, *Solar Energy*, Vol. 85, No 1, pp. 111-125, 2011.
- [4] G. QUESADA, D.R. ROUSSE, Y. DUTIL, M. MEHRTASH, L.GUILLON, P.L. PARADIS, Numerical study of tracking strategies for a photovoltaic solar system operating in Canada in cloudy days, *Solar Energy*, (Soumis, Novembre 2013).
- [5] J.A. DUFFIE, W.A. BECKMAN, *Solar engineering of thermal processes*, John Wiley & Sons Inc., 2006.