

Amélioration des performances d'un panneau solaire photovoltaïque-thermique en utilisant des générateurs de vortex et un modèle de contrôle prédictif économique.

Ugo PELAY^{1*}, Lucien ETIENNE², Daniel BOUGEARD¹, Serge RUSSEIL¹, Hassan KARKABA¹, Jules SIMO TALA¹, Jacques BOONAERT², Stéphane LECOEUICHE²

¹IMT Nord Europe, Institut Mines-Télécom, Univ. Lille, CERI Energie et Environnement
59500 Douai, France

² IMT Nord Europe, Institut Mines-Télécom, Univ. Lille, CERI Systèmes Numériques
59500 Douai, France

*(auteur correspondant : ugo.pelay@imt-nord-europe.fr)

Résumé

L'étude explore l'optimisation des systèmes Photo-Voltaïque/Thermique (PVT) via une stratégie de Contrôle Prédictif Économique (EMPC). Elle développe un modèle dynamique du système en Modelica/DYMOLA et définit le contrôleur EMPC dans Matlab/Simulink. Différentes géométries de canaux sont testées pour intensifier le transfert de chaleur, avec des simulations basées sur des conditions climatiques réelles. L'utilisation de l'EMPC avec récupération de chaleur entraîne des gains significatifs (jusqu'à 234%), illustrant son potentiel pour optimiser l'efficacité énergétique des PVT.

Nomenclature

<i>PV</i>	Photovoltaïque	<i>HR</i>	Récupération Chaleur
<i>PVT</i>	Photovoltaïque Thermique	<i>NHR</i>	Non Récupération Chaleur
<i>MPC</i>	Model Predictive Control	<i>I</i>	Intensifié
<i>SOO</i>	Simple On/Off	<i>NI</i>	Non-Intensifié

1. Introduction

L'utilisation croissante de sources d'énergie renouvelables est cruciale pour répondre aux besoins mondiaux actuels en énergie. Les gouvernements sont de plus en plus tenus d'adopter des sources d'énergie alternatives à faible émission de carbone, notamment l'hydroélectricité, l'éolien, la biomasse et le solaire [1-3]. Les chercheurs se sont fortement investis dans l'étude de différentes techniques visant à exploiter efficacement ces énergies renouvelables. Bien que l'énergie solaire soit caractérisée par sa variabilité, elle demeure une source abondante disponible dans le monde entier [4], considérée comme très efficace pour la production d'électricité via des modules photovoltaïques (PV) [5] et pour la production de chaleur à travers des chauffe-eau solaires [6]. Les modules PV sont désormais intégrés dans divers secteurs tels que les bâtiments commerciaux et diverses activités industrielles, attirant l'attention des chercheurs en raison de la possibilité d'augmenter leur efficacité [7-10]. Cependant, un défi majeur réside dans la surchauffe des modules PV due à des températures cellulaires excessives, entraînant une diminution d'efficacité. Cette surchauffe est particulièrement préoccupante dans les pays connaissant des températures élevées et des niveaux de rayonnement solaire importants en été [11-12]. Diverses études ont été menées pour accroître l'efficacité des modules PV, certaines se concentrant sur la réduction du coefficient de température de puissance dans les cellules PV, tandis que d'autres explorent l'utilisation de matériaux spécifiques. Les résultats montrent que les anciens modules PV peuvent avoir des coefficients d'environ $-0,5\%/^{\circ}\text{C}$, soit

presque le double des nouveaux modules PV qui affichent $-0,27\%/^{\circ}\text{C}$ [13]. D'autres études comparent les performances de cellules PV composées de différents matériaux sous diverses conditions d'ombrage partiel [14]. Une approche significative pour augmenter l'efficacité électrique des modules PV consiste à les refroidir [15]. Cette méthode, réalisée en extrayant la chaleur de la face inférieure du module par un fluide, donne lieu à des systèmes hybrides photovoltaïques/thermiques (PVT). Ces PVT peuvent être utilisés dans diverses applications, notamment pour les bâtiments [16] ou la désalinisation [17], en fonction de leur géométrie et du fluide utilisé pour refroidir le panneau [18]. L'utilisation de différentes formes géométriques à la surface inférieure du canal de refroidissement est également explorée pour améliorer le refroidissement, s'inspirant de techniques utilisées dans les chauffe-eaux solaires.

Le recours à des modèles dynamiques pour étudier ces systèmes PVT avec refroidissement permet de les réguler efficacement. Les chercheurs ont expérimenté diverses méthodes de contrôle, dont le contrôle prédictif économique (MPC), pour optimiser les performances des modules PV et des chauffe-eau solaires [19-21]. Des résultats de différentes études montrent une augmentation significative de la production d'énergie renouvelable avec l'utilisation de contrôleurs MPC [22].

L'objectif de cette étude est de développer un contrôleur MPC pour réguler la température des modules PVT en ajustant le débit du fluide de refroidissement, avec pour résultat une amélioration globale de l'efficacité énergétique du système PVT. Deux géométries différentes du côté refroidissement sont considérées, l'une sans intensification et l'autre avec insertion de générateurs de vortex afin d'améliorer le refroidissement. Les modèles dynamiques obtenus sont ensuite utilisés pour appliquer une stratégie de contrôle MPC visant à optimiser les performances du système PVT. Les simulations, réalisées dans des conditions estivales et hivernales, prennent en compte deux scénarios d'utilisation de l'énergie du système PVT : avec ou sans récupération de chaleur. Les résultats obtenus sont enfin discutés pour une meilleure compréhension du comportement du système.

2. Géométrie du système

Le système Photo-Voltaïque/Thermique (PVT) est composé d'un module PV sur la surface supérieure et d'un conduit monté en dessous pour assurer le refroidissement du système. L'air extérieur est utilisé comme fluide de transfert de chaleur. Dans cette étude, deux conceptions sont considérées : conduit vide (Figure 2 (a)) et avec générateur de vortex (VG) (Figure 2 (b)).

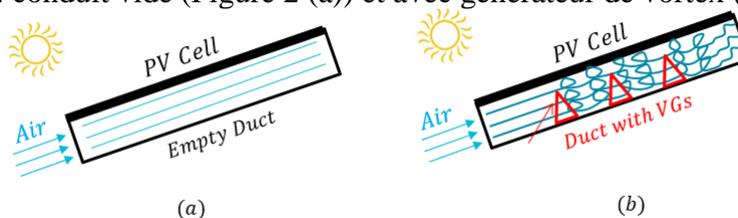


Figure 2 : (a) PVT avec conduit vide, (b) PVT avec VG

2.1. Modèle dynamique de PVT

Dans cette partie, le système PVT est modélisé dynamiquement sous Dymola (langage Modelica) puis le mécanisme de contrôle, d'identification et les fonction coûts des contrôleurs MPC sont définis. La figure 2 représente le modèle dynamique de PVT (inertie thermique) couplé à un système de pompage sous Dymola avec ses variables d'entrée et de sortie.

Les équations bilan de conservation d'énergie et de masse sont définies comme (1) et (2).

$$P_{elect} = P_{solar} - Q_{losses} - Q_{stored} - Q_{conv} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{air\ entrée} = \dot{m}_{air\ sortie} \quad (2)$$

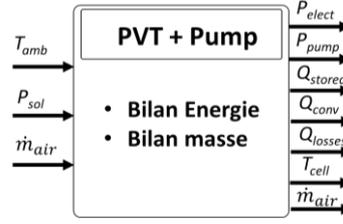


Figure 2 : Modèle (PVT+Pompe) sous Dymola

Les définitions des principales variables sont regroupées dans le tableau 1.

\dot{m}_{air} (kg/s)	Débit d'air dans la conduite du PVT
T_{amb} (°C)	Température ambiante
T_{cell} (°C)	Température des cellules du PVT
P_{solar} (W)	Puissance solaire absorbée par le PVT
P_{elect} (W)	Puissance électrique produite par le PVT
Q_{losses} (W)	Puissance thermique perdue par le PVT (convection + rayonnement)
Q_{stored} (W)	Puissance thermique inertielle du PVT (sensible)
Q_{conv} (W)	Puissance thermique échangée entre le PVT et le fluide de transfert

Tableau 1 : Variables principales et définitions

Les modèles de production électriques sont issus de la librairie de composants modelica Building [23]. Toutes les équations dynamiques prenant en compte la variabilité des entrant et l'inertie thermiques des composants permettant de calculer les variables du tableau précédent peuvent être retrouvée dans la publication de Karkaba & al. [24]. Concernant le cas où des générateurs de vortex sont intégrés dans une conduite, des simulations CFD ont été réalisées en faisant varier le nombre de Reynolds afin de déterminer les corrélations de transfert thermiques et de pertes de charges [25]. La géométrie des VG et leur disposition optimale ayant été au préalable effectué.

2.2. Méthodologie de contrôle

Le contrôleur MPC visant à contrôler et optimiser les performances du système PVT, doit être construit en utilisant les données simulées à partir du modèle dynamique de PVT précédent. Le MPC doit être aussi simple que possible tout en capturant toujours le comportement essentiel du système. Dans ce travail, en utilisant des considérations physiques, un modèle bilinéaire discret en « boîte grise » a été choisi adapté aux échangeurs de chaleur (3). Le débit massique du fluide de refroidissement est pris comme variable de contrôle (voir par exemple [26] ou [27] dans le contexte des systèmes de CVC).

$$T_{cell}(k+1) = T_{cell}(k) + a \cdot (T_{amb}(k) - T_{cell}(k)) + b \cdot \dot{m}_{air}(k) \cdot (T_{amb}(k) - T_{cell}(k)) + c \cdot P_{solar}(k) \quad (3)$$

« a » modélise le taux de refroidissement du panneau sans convection forcée, « b » lorsqu'il y a convection forcée et « c » le chauffage induit par l'irradiance solaire. Le modèle discrétisé de la température du module T_{cell} est modifié selon les paramètres constants identifiés (a,b,c) et les conditions de fonctionnement à savoir la température ambiante T_{amb} , le débit d'air (refroidissement) \dot{m}_{air} , et la puissance solaire absorbée P_{solar} . L'objectif principal du contrôleur MPC est d'augmenter le gain d'énergie dans le système PVT en augmentant la puissance électrique en diminuant la température des cellules. Ce mécanisme est activé en pompant de l'air supplémentaire sur la surface inférieure du module PV, ce qui augmente la puissance de pompage. La fonction de coût à cette fin est définie dans l'équation (4). Pour le cas de récupération de chaleur, une autre fonction de coût est définie en ajoutant un terme supplémentaire à l'équation précédente pour former l'équation (5).

$$\sum_{k=1}^N P_{solar}(k) \cdot \beta \cdot T_{cell}(k) + \alpha \cdot \dot{m}_{air}(k) \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^N P_{solar}(k) \cdot \beta \cdot T_{cell}(k) + \alpha \cdot \dot{m}_{air}(k) - \dot{m}_{air}(k) \cdot C_{p_{air}} \cdot (T_{amb}(k) - T_{out}(k)) \quad (5)$$

$$T_{out}(k) = T_{amb}(k) - (T_{amb}(k) - T_{cell}(k)) \cdot (1 - e^{-\vartheta}) \quad \text{avec } \vartheta = \Delta \dot{m}_{air}(k)^\lambda \quad (6)$$

Ces fonctions coût à minimiser ont globalement pour but d'augmenter la production électrique du panneau tout en réduisant la consommation de la pompe et en tenant compte de la récupération de chaleur le cas échéant. Le processus d'identification du système PVT vise à déterminer les paramètres du modèle de contrôle et les fonctions de coût à partir de données synthétiques issues des simulations DYMOLA. Des simulations numériques sont effectuées en faisant varier les paramètres d'entrée, tels que l'irradiance solaire, la température ambiante et le débit d'air. Ensuite, un problème d'optimisation est résolu dans Matlab pour estimer les paramètres du modèle, en minimisant l'erreur entre les données synthétiques et la prédiction du modèle de contrôle. Les équations et fonction d'identification peuvent être retrouvées dans l'article de Karkaba & al. [24].

3. Paramètres et scénarios de simulation

3.1. Paramètres

Les paramètres utilisés dans les simulations sont rassemblés dans le tableau 2. On y retrouve les caractéristiques du panneau solaire PV choisi (LONGI (Hi-MO5) [28] ainsi que les paramètres de réglage du contrôleur MPC.

	Paramètre	Valeur	Unité
Panneau PV	Dimension LxWxH	2073x1133x35	mm
	Orientation des cellules	132(6x22)	-
	Masse	30,6	(kg)
	Tension à vide	45,55	V
	Courant de court-circuit	13,90	A
	Coefficient de température (tension / courant)	-0,284 / 0.05	%/°C
Contrôleur MPC	Temps d'échantillonnage	30	s
	Prediction Horizon	25	-
	Control Horizon	25	-
	\dot{m}_{air} valeur max	0,2	kg.s ⁻¹
	\dot{m}_{air} variation min / max	-0,001 / 0.01	kg.s ⁻¹

Tableau 2 : Paramètres de simulation

3.2. Scénarios

Les systèmes PVT peuvent avoir plusieurs secteurs d'applications telles que les bâtiments commerciaux, maisons individuelles, industries, voire même les centrales solaires. Deux scénarios principaux sont appliqués pour consommer l'énergie produite par le système PVT. Dans le premier, l'énergie thermique extraite du module n'est pas utilisée (No Heat Recovery « NHR »). Dans le second, l'énergie thermique est utilisée selon des conditions définies dans les fonctions de coût de ce scénario, à savoir : une fois que la température de sortie est supérieure à la température ambiante ($T_{out} > T_{amb}$), le système utilise la chaleur extraite du module (Heat Recovery « HR »). Dans les deux cas, les systèmes PVT Intensifiés (I) et Non-Intensifiés (NI) sont étudiés. Au final, 4 scénarios d'utilisation sont investigués : NI-NHR, I-NHR, NI-HR, I-HR. En plus des scénarios d'utilisation, les simulations sont réalisées avec trois différents types de contrôles :

- Pas de refroidissement (cas de référence)
- Simple On/Off (SOO)
- Modèle Prédicatif de Contrôle (MPC)

Comme il est prévu par la suite de réaliser des expériences dans le laboratoire d'IMT Nord Europe, les simulations ont été réalisées pour des données d'ensoleillement et de températures

correspondant à cet emplacement géographique (lat. 3.0807° et long. 50.3708°) pour un jour « été » et un jour « hiver » (Figure 3). Les données sont extraites du site web « power data access viewer » [29].

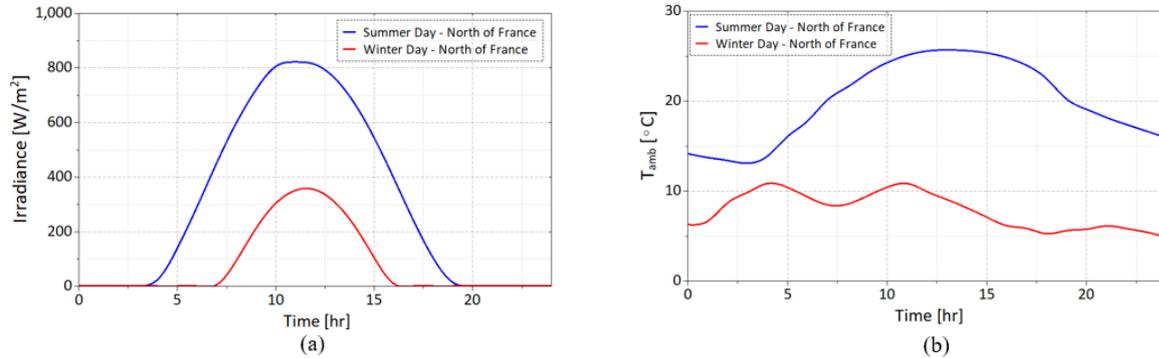


Figure 3 : Journée été/hiver Nord France : (a) Irradiance (b) Température ambiante [29]

4. Résultat et discussion

Les simulations sont effectuées pour tous les scénarios précédemment explicités avec les 3 types de contrôle. Afin de mesurer les performances des systèmes le gain énergétique est déterminé (Equation 7). Il est composé de l'énergie électrique générée par le panneau PV (P_{elect} , consommée par la pompe P_{pump} et l'énergie thermique récupérée (dans certains cas) Q_{therm} .

$$EnergyGain(t) = \int_0^t (P_{elect}(s) - P_{pump}(s) + Q_{therm}(s)) ds \quad (7)$$

4.1. Résultat pour un jour « été »

Le Tableau 3 montre le gain énergétique (Wh) du système PVT pendant une journée d'été pour les scénarios simulés. Sans refroidissement, la valeur de référence obtenue est 3105 [Wh]. Pour le premier cas, (NI-NHR), l'utilisation du contrôleur SOO a un effet négatif et diminue le gain énergétique de 1,6 %, dû à son manque de flexibilité et au débit constant de pompage. Lorsque le contrôleur MPC est utilisé, le même gain énergétique est obtenu car le contrôleur détermine qu'il est inutile de refroidir le module PV dans ces conditions (voir débit nul Figure 4 (b)). On le constate sur la figure 4 (a), l'évolution de la température des cellules est coordonnée avec l'irradiance.

Scénario de contrôle	No Int.-No Heat Reco. NI-NHR	Int.-No Heat Reco. I-NHR	No Int.-Heat Reco. NI-HR	Int.-Heat Reco. I-HR
Zéro		3105		
SOO	3053	2993	6044	7807
MPC	3105	3112	8532	10382

Tableau 3 : Energy Gain (Wh) pour un jour « été »

Dans le cas de l'intensification sans récupération de chaleur (I-NHR), le gain est diminué avec un contrôleur SOO pour les mêmes raisons que le cas précédent (NI-NHR). Lors de l'utilisation du contrôleur MPC, le gain augmente de 0,22 % pour atteindre une valeur de 3112 [Wh]. Pour les deux scénarios de récupération de chaleur sans intensification (NI-HR) et avec intensification (I-HR), le gain énergétique est augmenté de 94,65 % et 151,43 % respectivement par l'utilisation du contrôleur SOO et augmenté de 174,78 % et 234,36 % par l'utilisation du contrôleur MPC. Les contrôleurs MPC sont plus efficaces que les contrôleurs SOO. En ce qui concerne l'intensification des échanges, lors de l'utilisation de générateurs de vortex (I) le gain énergétique augmente de 21 % par rapport à celui du canal vide (NI). Cette amélioration permet de mieux refroidir le module PV et de réduire la température des cellules, générant ainsi plus de puissance électrique. Dans le cas de (I-HR), la température des cellules diminue davantage

par rapport au cas de (NI-HR). En effet, les débits massiques, pour les deux scénarios NI-HR et I-HR (courbes noire et verte confondues figure 4 (b)), sont similaires, mais la température des cellules est nettement inférieure lorsque le système possède des VG.

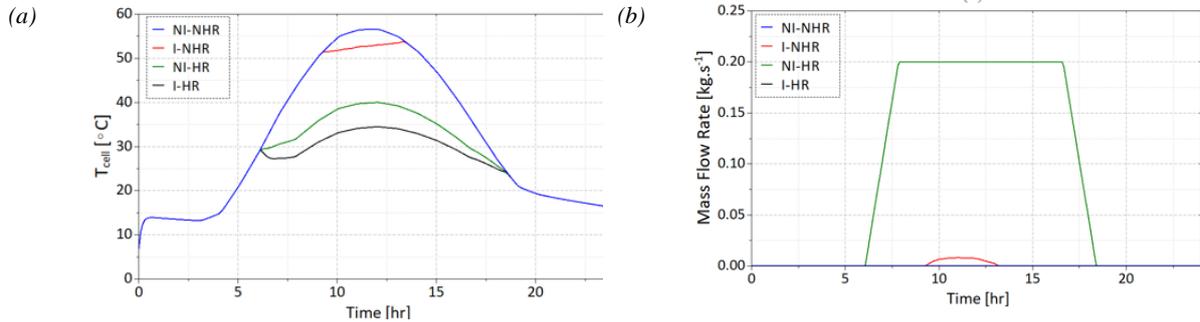


Figure 4 : Journée été avec contrôleur MPC : (a) Température de cellule (b) Débit d'air

4.2. Résultat pour un jour « hiver »

Une étude similaire à celle menée pour un jour « été » a été réalisée pour un jour « hiver ». Les simulations, avec dans des scénarios sans récupération de chaleur, ont montré un contrôleur SOO pénalisant le gain énergétique et un contrôleur MPC limitant la circulation d'air à zéro (graphique de la température de cellules et débit disponible dans la publication [24]) (Tableau 4). Comme précédemment, l'utilisation d'un contrôleur MCP et de générateur de vortex permet d'obtenir le meilleur gain énergétique dans le cas de récupération de chaleur.

Scénario de contrôle	No Int.-No Heat Reco. NI-NHR	Int.-No Heat Reco. I-NHR	No Int.-Heat Reco. NI-HR	Int.-Heat Reco. I-HR
Zéro			887	
SOO	847	830	1545	1949
MPC	887	887	1822	2194

Tableau 4 : Energy Gain (Wh) pour un jour « hiver »

4.3. Etude pour une variation d'irradiance

Il a été démontré précédemment qu'il n'est pas intéressant de refroidir le panneau simplement pour augmenter l'efficacité électrique pour des valeurs moyennes d'irradiance. Ainsi, pour mieux distinguer à quelles valeurs d'irradiation il est intéressant de refroidir le système PVT, la différence entre la production du PV et la consommation de la pompe est tracée en fonction de l'irradiance et présentée dans la figure 5 (a). Le débit d'air est tracé dans la figure 5 (b). Pour la géométrie du canal vide, le refroidissement est efficace uniquement lorsque l'irradiance dépasse 1000 $W.m^{-2}$ (c'est le maximum d'irradiance à la surface de la terre sans concentration solaire). Alors que pour le cas géométrique avec générateurs de vortex, le refroidissement est considéré comme efficace à partir d'une valeur de 750 $W.m^{-2}$.

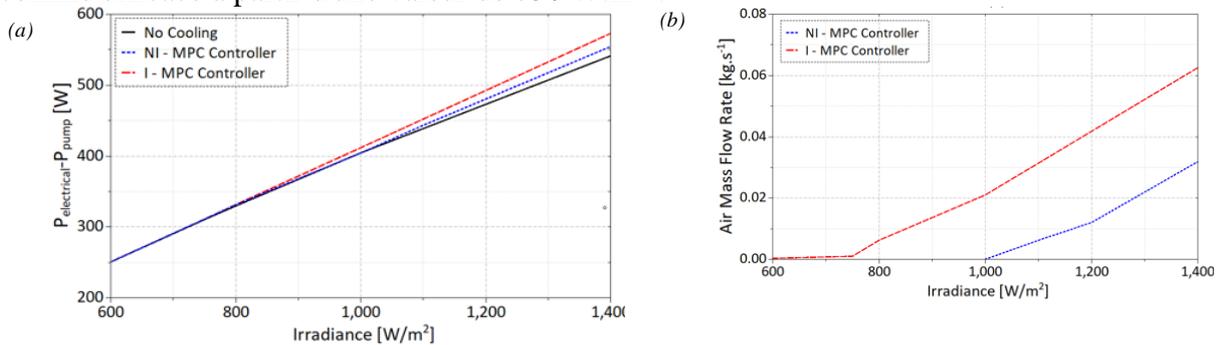


Figure 5 : (a) Production électrique nette ; (b) débit d'air en fonction de l'irradiance

5. Conclusion

Dans cet article, une étude sur le contrôle photovoltaïque/thermique à l'aide d'un Contrôleur Prédicatif Modélisé a été menée. Les résultats suivants peuvent être mis en évidence :

- Pour une irradiance moyenne, sans scénario de récupération de chaleur, l'utilisation de générateurs de vortex et du contrôleur MPC n'augmente pas le gain d'énergie du système PVT (moins de 1% d'augmentation pour les deux cas).
- Pour une irradiance moyenne en été (France septentrionale) avec scénario de récupération de chaleur, l'utilisation de générateurs de vortex avec le contrôleur MPC augmente le gain d'énergie à 234 % par rapport à une augmentation de 151 % lors de l'utilisation de générateurs de vortex avec un contrôleur simple on/off (SOO).
- L'utilisation de générateurs de vortex comme technique d'intensification dans le système PVT augmente le gain d'énergie d'environ 21 % par rapport à la configuration de conduit vide pour une irradiance moyenne et élevée.
- L'utilisation de VGs sans valorisation de la chaleur permet une amélioration du rendement globale des panneaux PVT pour de plus faibles irradiances ($>750 \text{ W.m}^{-2}$ avec VGs contre $>1000 \text{ W.m}^{-2}$ sans VGs).

Dans cette étude, seul le débit de fluide transfert était contrôlé. D'autres études à venir dans lesquelles l'orientation des générateurs de vortex sera elle aussi pilotée permettra d'augmenter le rendement de l'installation et de la rendre compétitive pour des niveaux d'irradiation encore plus faibles.

Références

- [1] LR. Amjith, B. Bavanish. A review on biomass and wind as renewable energy for sustainable environment, *Chemosphere*, Volume 293, 2022, 133579, ISSN 0045-6535.
- [2] S. Jin, D. Greaves, Wave energy in the UK: Status review and future perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 143, 2021, 110932, ISSN 1364-0321.
- [3] W. Pang, Y. Zhang, B. C. Duck, H Yu, X Song, H. Yan, Cross sectional geometries effect on the energy efficiency of a photovoltaic thermal module: Numerical simulation and experimental validation, *Energy*, Volume 209, 2020, 118439, ISSN 0360-5442.
- [4] A. Zahedi, Maximizing solar PV energy penetration using energy storage technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 15, Issue 1, 2011, Pages 866-870, ISSN 1364-0321.
- [5] S. Thotakura, S. C. Kondamudi, J. F. Xavier, M. Quanjin, G. R. Reddy, P. Gangwar, S. L. Davuluri, Operational performance of megawatt-scale grid integrated rooftop solar PV system in tropical wet and dry climates of India, *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 18, 2020, 100602, ISSN 2214-157X, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100602>.
- [6] R. Narayanan, P. Parthkumar, R. Pippia, Solar energy utilization in Australian homes: A case study, *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 28, 2021, 101603, ISSN 2214-157X,
- [7] F. F. Ahmad, C. Ghenai, A. K. Hamid, O. Rejeb, M. Bettayeb, Performance enhancement and infra-red (IR) thermography of solar photovoltaic panel using back cooling from the waste air of building centralized air conditioning system, *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 24, 2021, 100840.
- [8] H. A. Kazem, Evaluation and analysis of water-based photovoltaic/thermal (PV/T) system, *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 13, 2019, 100401, ISSN 2214-157X.
- [9] B. Ramkiran, C.K. Sundarabalan, K. Sudhakar, Performance evaluation of solar PV module with filters in an outdoor environment, *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 21, 2020, 100700.

- [10] S. M. Kiwan, A. M. Khlefat, Thermal cooling of photovoltaic panels using porous material, *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 24, 2021.
- [11] W. Xiao, N. Ozog, W.G. Dunford, Topology study of photovoltaic interface for maximum power point tracking (2007) IEEE Transactions on Industrial Electronics.
- [12] H. Patel, V. Agarwal, Maximum power point tracking scheme for PV systems operating under partially shaded conditions (2008) IEEE Transactions on Industrial Electronics.
- [13] SUNPOWER, Maxeon solar technologies, sunpower.maxeon.com, 539975 REV B, Publication Date: September 2021
- [14] S. Vunnam, M. Vanitha Sri, A. Rama Koteswara Rao, Performance analysis of mono crystalline, poly crystalline and thin film material based 6×6 T-C-T PV array under different partial shading situations, *Optik*, Volume 248, 2021.
- [15] H.G. Teo, P.S. Lee, M.N.A. Hawlader, An active cooling system for photovoltaic modules, *Applied Energy*, Volume 90, Issue 1, 2012, Pages 309-315.
- [16] Y. Elaouzy, A. El Fadar, Investigation of building-integrated photovoltaic, photovoltaic thermal, ground source heat pump and green roof systems. *Energy Conversion and Management*, 2023.
- [17] M. Abdelgaied, A. S. Abdullah, A. E. Kabeel, H. F. Abosheisha, Assessment of an innovative hybrid system of PVT-driven RO desalination unit integrated with solar dish concentrator as preheating unit. *Energy Conversion and Management* 258 (2022).
- [18] E. Bisengimana, Y. Yanping, M. Binama, G. Nyiranzeyimana, Z. Jinzhi, A review on the influence of the components on the performance of PVT modules, *Solar Energy*, Volume 226, 2021.
- [19] S. A. Putrayudha, E. C. Kang, E. Evgeniy, Y. Libing, E. J. Lee, A study of photovoltaic/thermal (PVT)-ground source heat pump hybrid system by using fuzzy logic control, *Applied Thermal Engineering*, Volume 89, 2015, Pages 578-586, ISSN 1359-4311.
- [20] A. N. Ozakin, F. Kaya, Experimental thermodynamic analysis of air-based PVT system using fins in different materials: Optimization of control parameters by Taguchi method and ANOVA, *Solar Energy*, Volume 197, 2020, Pages 199-211, ISSN 0038-092X
- [21] M. Fiorentini, P. Cooper, Z. Ma, D. A. Robinson, Hybrid Model Predictive Control of a Residential HVAC System with PVT Energy Generation and PCM Thermal Storage, *Energy Procedia*, Volume 83, 2015, Pages 21-30.
- [22] D. Kumar and A. K. Tangirala, Adaptive model predictive control of module temperature in photovoltaic systems, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60, 11, 4351-4365, 2021.
- [23] M. Wetter, W. Zuo, T. S. Noudui, and X. Pang. Modelica buildings library. *Journal of Building Performance Simulation*, 7(4), 253–270, 2014.
- [24] H. Karkaba, L. Etinne, U. Pelay, S. Russeil, J. Simo Tala, J. Boonaert, S. Lecoeuche, D. Bougeard. Performance improvement of air cooled photo-voltaic thermal panel using economic model predictive control and vortex generator. *Renewable Energy*. Volume 218, 2023.
- [25] H. Karkaba, S. Russeil, J. Simo Tala, D. Bougeard, J. Boonaert, L. Etienne, U. Pelay, S. Lecoeuche. Effect of using multiple vortex generator rows on heat transfer enhancement inside an asymmetrically heated rectangular channel. *Applied Thermal Engineering*. Volume 227, 2023.
- [26] B. Zitte, B. Hamroun, D. Astolfi, & F. Couenne. Robust Control of a Class of Bilinear Systems by Forwarding: Application to Counter Current Heat Exchanger. 21st IFAC World Congress, Jul 2020, Berlin, Germany.
- [27] A. Kelman, F. Borrelli, Bilinear model predictive control of a HVAC system using sequential quadratic programming. *IFAC Proceedings Volumes*, 2011, Volume 44.
- [28] <https://www.longi.com/en/products/modules/hi-mo-5/>
- [29] <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>