

Etude par simulation thermique dynamique de l'intégration d'une installation de panneaux aérovoltaiques sur une maison dite passive.

Benoit LIEMANS^{1*}, Véronique FELDHEIM¹, Daniel BOUGEARD², Serge RUSSEIL²

¹ UMONS - Faculté polytechnique - Service de thermique et combustion
Rue de l'Épargne, 56 - 7000 Mons - Belgique

² IMT Nord Europe, Institut Mines-Telecom, Univ. Lille, CERI Energie Environnement,
59000 Lille, France

* (auteur correspondant : benoit.liemans@umons.ac.be)

Résumé - Cet article propose une étude par simulation thermique dynamique des apports d'une installation aéro-photovoltaïque améliorée sur une habitation unifamiliale à faibles besoins en chauffage située dans l'est de la Belgique. Nous y comparons les résultats obtenus avec les situations reprenant soit une installation photovoltaïque classique, soit une installation de panneaux solaires hybrides non améliorés. La comparaison est réalisée tant d'un point de vue des besoins de chauffage, de refroidissement et de la surchauffe que de la production électrique. Enfin, nous proposons quelques éléments sur la sensibilité vis-à-vis de la situation géographique.

Nomenclature

BNE	besoins nets en énergie, kW h m^{-2}	η	rendement, —
c_p	capacité thermique, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	ε	efficacité, —
I	Irradiation solaire sur la paroi, W m^{-2}	λ	conductivité thermique, $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
n_{50}	taux de renouvellement d'air par infiltration sous une différence de pression de 50 Pa, h^{-1}	τ	temps, s
Nu	nombre de Nusselt, —	<i>Indices et exposants</i>	
Re	nombre de Reynolds, —	<i>air</i>	lié à l'air
Q	quantité d'énergie, J	<i>elec</i>	électrique
q_m	débit massique, kg s^{-1}	<i>ext</i>	extérieur
PV/Ta	panneau hybride photovoltaïque et thermique à air	<i>in</i>	entrant
S	surface, m^2	<i>m</i>	moyen
U	coefficient de transfert thermique de la paroi, $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$	<i>op</i>	opaque
t	température, $^{\circ}\text{C}$	<i>out</i>	sortant
VG	vortex generator	<i>PV</i>	du panneau photovoltaïque
		<i>ref</i>	de référence
		<i>sol</i>	solaire
		<i>therm</i>	thermique
<i>Symboles grecs</i>			
β	coefficient de température, $\% \text{K}^{-1}$		

1. Introduction

Cette communication est réalisée dans le cadre d'un projet qui consiste à étudier et modéliser les interactions entre une installation aérovoltaique améliorée et un bâtiment énergétiquement performant afin d'optimiser l'utilisation des ressources renouvelables (électrique et thermique dans le cas de ces panneaux hybrides) en fonction des besoins de ce dernier. Dans le cadre de ce projet, nous avons déjà mis en avant les gains potentiels que nous pourrions obtenir par une intensification passive des échanges par générateur de vorticité dans le chenal des panneaux

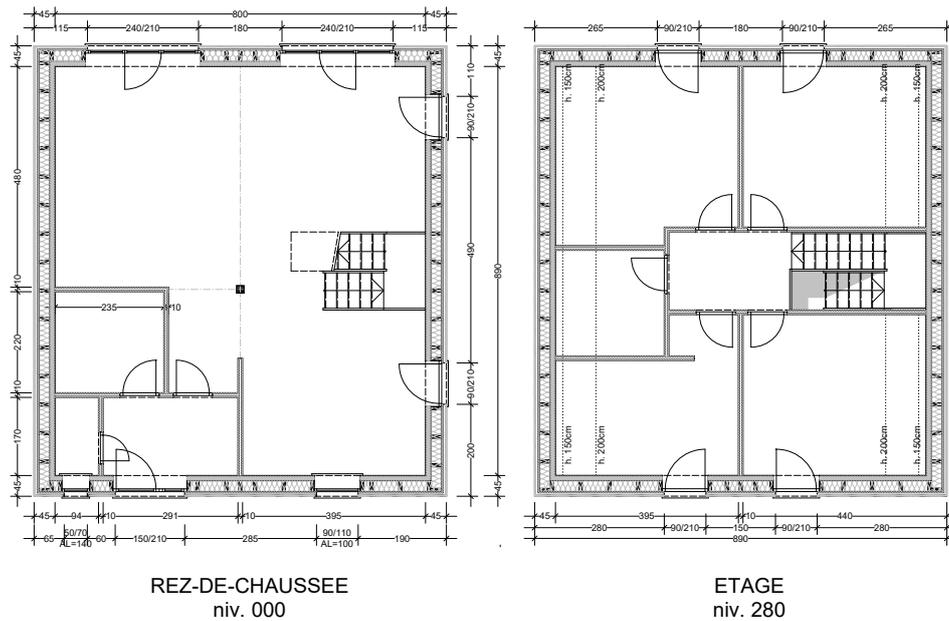


Figure 1 : Plans des différents niveaux de l'habitation

PV/Ta permettant d'améliorer les échanges thermiques convectifs [1]. La véritable question est de savoir si ces gains potentiels sont exploitables pour une habitation dite passive.

2. Méthodologie

2.1. Simulation thermique dynamique

La simulation thermique dynamique, ou STD, permet d'étudier l'évolution temporelle des grandeurs physiques liées à la thermique, d'un composant, d'un système énergétique ou dans notre cas d'un bâtiment, en résolvant des équations différentielles ordinaires. Les simulations réalisées pour cette étude ont toutes été établies avec le logiciel TRNSYS.

2.2. Le bâtiment

La maison modélisée est un bâtiment, orienté selon un axe faisant un angle de 60° par rapport au nord, de plan rectangulaire de $9.80\text{ m} \times 8.90\text{ m}$ en dimensions extérieures érigé sur 2 niveaux et couvert d'une toiture à double pan présentant une inclinaison de 35° . Le rez-de-chaussée est composé d'un hall d'entrée (5 m^2) donnant accès à un WC (1.6 m^2), un local technique (5.25 m^2) et un espace de vie composé d'une cuisine ouverte (14 m^2) et d'un séjour (40 m^2). A l'étage, nous trouvons un hall de nuit (4.5 m^2) distribuant les accès vers 3 chambres (14.75 m^2 , 13.8 m^2 , 13.8 m^2), une salle de bain (11.5 m^2) et une buanderie (5.4 m^2) (voir figure 1).

Il s'agit d'une construction en ossature bois fortement isolée ($U_{m,op} = 0.123\text{ W/m}^2\text{K}$), et équipée de fenêtres à triple vitrage (voir tableau 1), n'offrant que peu d'inertie thermique mais disposant d'une excellente étanchéité à l'air ($n_{50} = 0.6\text{ h}^{-1}$).

Le bâtiment est équipé d'un groupe de ventilation mécanique à double flux muni d'un récupérateur de chaleur présentant une efficacité ϵ de 80% et muni d'un bypass permettant de court-circuiter l'échangeur pour éviter d'accentuer la surchauffe lorsque la température de

Type	U
	W/m ² K
mur	0.125
toit	0.108
plancher	0.152
fenêtres	0.6

Tableau 1 : Composition des parois

Lu → Ve	Sa - Di
6 h à 8 h	7 h
	↓
16 h à 22 h	22 h

Tableau 2 : Horaire d'occupation

l'air extérieur est supérieure à celle de l'intérieur par exemple.

Au niveau des hypothèses, nous avons considéré des gains internes constants pour l'ensemble de l'habitation (3 W/m^2 , ce qui se trouve dans entre les 4 W/m^2 de la *FEBY*¹ et les 2.1 W/m^2 du *Passive House Institute* [2]), une température constante pour le vide technique sous le plancher du rez-de-chaussée ($10 \text{ }^\circ\text{C}$) et un taux de renouvellement d'air par ventilation volontaire de 1 vol/h (soit environ $335 \text{ m}^3/\text{h}$). En ce qui concerne les consignes de chauffage, le rez est en régime $20 \text{ }^\circ\text{C}/16 \text{ }^\circ\text{C}$ et l'étage en $18 \text{ }^\circ\text{C}/15 \text{ }^\circ\text{C}$ en fonction de l'occupation ou non du bâtiment (voir tableau 2). Le modèle sera donc multizone avec une zone par niveau.

2.3. Le panneau aéro-photovoltaïque

Un panneau aéro-photovoltaïque (PV/Ta) est un panneau solaire hybride [3] qui vise à produire aussi bien de l'électricité (solaire photovoltaïque) qu'à récupérer de la chaleur (solaire thermique) et dont le fluide caloporteur est l'air [4]. Ce dernier présente certains avantages vis-à-vis d'autres fluides plus efficaces thermiquement (les faibles conductibilité et chaleur massique de l'air ne jouent pas en sa faveur). Citons par exemple le fait que les installations sont technologiquement plus simples et moins onéreuses dans leur conception mais aussi le fait que l'air soit disponible gratuitement, en abondance et indispensable à la bonne ventilation des bâtiments [7].

La forme la plus simple d'un panneau PV/Ta consiste à venir créer un chenal pour le passage de l'air sous le panneau photovoltaïque au moyen d'une plaque parallèle à ce dernier [5] comme le montre la figure 2. Dans une précédente publication [6], nous avons présenté un modèle thermique 1-D de ce type de système. Nous avons donc développé en FORTRAN un nouveau composant de panneau solaire hybride dans TRNSYS, nous permettant ainsi de composer une installation solaire que nous pouvons relier à un modèle de bâtiment.

L'intérêt est de disposer d'un objet paramétrable individuellement permettant à l'avenir des études de sensibilité paramétrique et d'éventuelles optimisations. Parmi ces paramètres, citons les dimensions du panneau, la hauteur du chenal, le rendement électrique, la composition des différentes couches et la présence ou non d'ailettes génératrices de vorticité visant à améliorer les échanges convectifs au sein du chenal.

En entrées, le module reçoit les informations du flux solaire incident, du débit et de la température d'air entrant, les conditions climatiques extérieures (température sèche de l'air et température effective du ciel, vitesse du vent) et fournit en sorties la température de l'air issu du panneau ($t_{air,out,i}$), les productions électrique ($Q_{elec,i}$) et thermique ($Q_{therm,i}$), le rendement photovolta  ique corrigé en fonction de la température moyenne des cellules PV (η_i), les températures moyennes au niveau des différentes couches ($t_{air,i}, t_{pv,i}, \dots$), ...

1. "Forum für Energieeffektivt Byggande", organisme suédois de certification des bâtiments énergétiquement performants

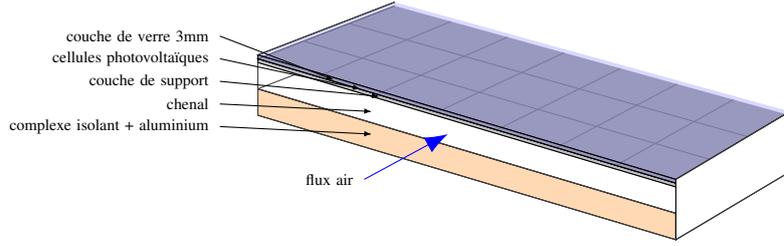


Figure 2 : exemple de composition d'un panneau PV/Ta simple

$$t_{air,out,i} = f(\text{conditions météo}_i, \text{propriétés du panneau}, q_{m,air,i}, \dots) \quad (1)$$

$$Q_{therm,i} = q_{m,air,i} \cdot c_{p,i} \cdot (t_{air,out,i} - t_{air,in,i}) \cdot d\tau \quad (2)$$

$$Q_{elec,i} = \eta_i \cdot I_i \cdot S_{PV} \cdot d\tau \quad (3)$$

$$\eta_i = \eta_{ref} \cdot (1 + \beta \cdot (t_{pv,i} - 25)) \quad (4)$$

$$(t_{air,i}, t_{pv,i}, \dots) = f(\text{conditions météo}_i, \text{propriétés du panneau}, q_{m,air,i}, \dots) \quad (5)$$

L'amélioration des échanges convectifs dans le chenal au moyen d'ailettes génératrices de vorticité a été considérée en utilisant la formule de Chamoli [8].

$$Nu = 0.2365 Re^{0.6689} \left(1 + \frac{c}{a}\right)^{0.1866} \left(\frac{\alpha}{60}\right)^{-0.3227} e^{(-0.076 \ln(1 + \frac{c}{a}))^2} e^{(-0.9576 \ln(\frac{\alpha}{60}))^2} \quad (6)$$

avec α , a et c illustrés sur la figure 3.

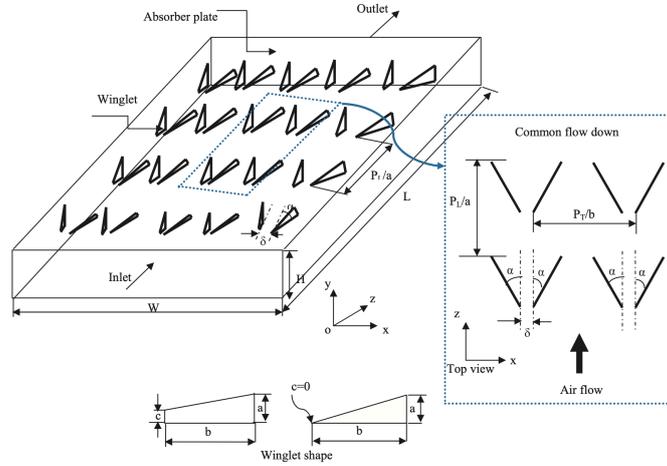


Figure 3 : Forme et distribution des ailettes selon Chamoli [8]

2.4. L'installation

L'installation aéro-photovolta ique modélisée est composée de 12 panneaux PV/Ta de 1.68 m de long par 1.02 m de large, avec un rendement PV de 19.62 % ($\beta = -0.369 \text{ \%/K}$), disposant d'un chenal de 35 mm de hauteur sous lequel se trouve un panneau isolant de type polystyrène extrudé ($\lambda = 0.035 \text{ W/mK}$) de 50 mm d'épaisseur. Le tout est posé sur le pan de toiture orienté sud-ouest (inclinaison 35° , azimut 30° par rapport au sud).

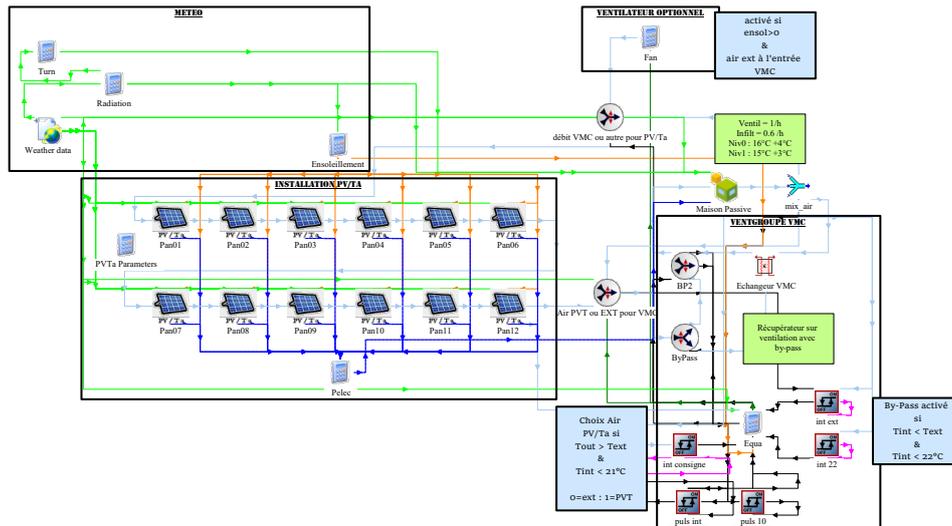


Figure 4 : Schéma du couplage dans TRNSYS

Le débit d'air sous les panneaux est assuré soit par le groupe de ventilation de l'habitation dans le cas où cet air est utilisé pour alimenter le logement en air neuf, soit par un ventilateur indépendant, et offrant le même débit, dans le cas contraire et si il y a ensoleillement. La consommation de ce dernier sera comptabilisée au niveau des bilans annuels.

L'air en sortie d'installation solaire est dirigé vers le système de ventilation soit si il est plus chaud que l'air extérieur et l'air intérieur du logement est inférieur à 20 °C , soit si il est plus froid que l'air extérieur et l'air intérieur du logement est supérieur à 23 °C (eq. 7).

$$\text{air ventilation} = \text{air sortie installation solaire si} \left\{ \begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} t_{int} < 20^{\circ}\text{C} \\ \text{et} \\ t_{ext} < t_{solar,out} \end{array} \right\} \text{ou} \\ \left. \begin{array}{l} t_{int} > 23^{\circ}\text{C} \\ \text{et} \\ t_{ext} > t_{solar,out} \end{array} \right\} \end{array} \right. \quad (7)$$

3. Résultats

3.1. Maison et installation photovoltaïque

Afin de disposer d'une situation de départ simple, nous avons effectué une simulation en considérant une installation photovoltaïque classique sur le bâtiment passif. Sur base d'un fichier climatique Meteonorm pour la région de Uccle en Belgique et pour une étude par pas de temps d'une heure s'étendant sur une année (8760 h), nous obtenons des besoins nets en chauffage de 13.74 kWh/m² an, des surchauffes au-dessus de 23 °C de 2064 Kh pour le rez-de-chaussée et de 2455 Kh pour l'étage. La production électrique annuelle est de 3215.19 kWh. Sur la figure 5, nous pouvons constater la présence de 3 périodes de surchauffe sévère (température intérieure > 27 °C plusieurs jours consécutifs) en été, ce qui risque, dans le cas d'une récurrence sur plusieurs années, d'amener les propriétaires à se tourner vers des solutions de refroidissement actives.

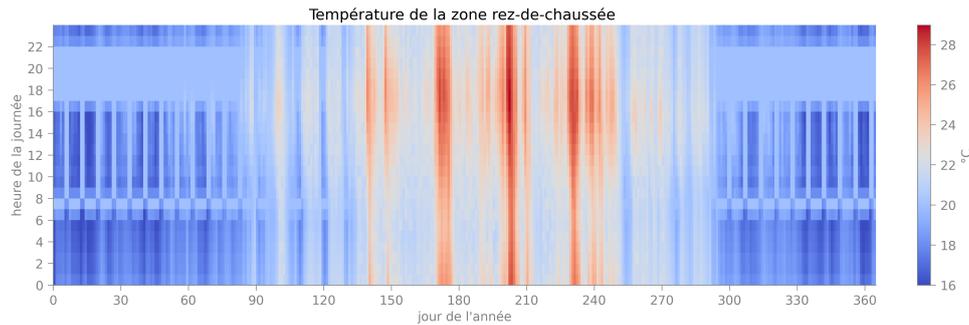


Figure 5 : Température du rez-de-chaussée en fonction du jour de l'année et de l'heure de la journée

	Pas de temps de simulation de 1h				Pas de temps de simulation de 1/4h				
	BNE chauffage kWh/m ²	Surchauffe T > 23 °C Kh	Production PV kWh	Consommation ventilateur kWh	BNE chauffage kWh/m ²	Surchauffe T > 23 °C Kh	Production PV kWh	Consommation ventilateur kWh	
PV	13.74	2064	3215.19	-	13.95	2057	3212.43	-	
une rangée de panneaux	PV/Ta	13.61	1604	3238.88	31.66	13.85	1560	3236.24	31.59
	PV/Ta + VG	13.59	1642	3246.13	31.70	13.82	1604	3243.54	31.57
panneaux en deux rangées	PV/Ta	13.63	1581	3235.35	31.66	13.86	1529	3232.69	31.59
	PV/Ta + VG	13.59	1640	3245.65	31.70	13.82	1605	3243.07	31.58

Tableau 3 : Résultats pour l'installation solaire sur la maison pour des pas de temps de 1 h et 0.25 h

3.2. Maison et installation aéro-photovoltaïque

Nous avons ensuite 4 cas utilisant les 12 panneaux PV/Ta. La distinction est réalisée sur base de l'organisation des panneaux, soit 12 en série soit 2 rangées parallèles de 6 et d'autre part sur la présence ou non d'ailettes génératrices de vorticités au niveau du chenal.

L'installation en série des panneaux non améliorés conduit à des besoins nets en chauffage de 13.61 kWh/m² an, des surchauffes de 1604 Kh pour le rez-de-chaussée et de 1959 Kh pour l'étage, soit une réduction de ~1 % des besoins de chauffage mais de 22.3 % de la surchauffe au-dessus de 23 °C. La production électrique annuelle est de 3238.88 kWh, soit une augmentation de 0.74 % mais qui est effacée par la consommation liée au ventilateur 31.66 kWh puisque si nous établissons un bilan simple en soustrayant cette consommation à la production, nous obtenons 3238.88 kWh – 31.66 kWh = 3207.22 kWh soit 8 kWh de moins que la situation initiale.

Les résultats des différentes simulations sont repris dans le tableau 3. Nous pouvons constater que les gains sont relativement faibles tant d'un point de vue des besoins en chauffage que de la production photovoltaïque. L'amélioration des échanges convectifs dans le chenal nous permet tout au plus de gagner un peu moins de 1 % sur la production électrique annuelle, ce qui ne couvre même pas la consommation du ventilateur ajouté. Il est par contre intéressant de noter une réduction significative des degrés-heures de surchauffe, en particulier pour l'installation de 2 séries de 6 panneaux standards (-500 Kh). En creusant un peu, nous pouvons observer que le système utilise peu l'air en provenance de l'installation solaire pour le chauffage mais beaucoup plus en revanche la nuit en été (voir figure 6) et les écarts de température intérieure par rapport au cas de base restent limités dans une fourchette de 2 °C (voir figure 7). Le fait que l'air sous les panneaux soit plus frais que l'air extérieur ambiant la nuit s'explique par l'inversion des flux thermiques au niveau de la vitre. L'absence de flux solaire incident et une température apparente du ciel bien plus faible que la température au sol conduisent à un refroidissement de

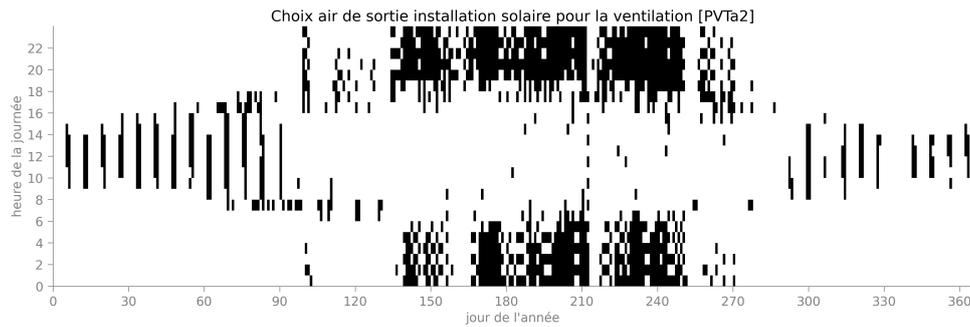


Figure 6 : Utilisation de l'air issu des PV/Ta en fonction du jour de l'année et de l'heure de la journée

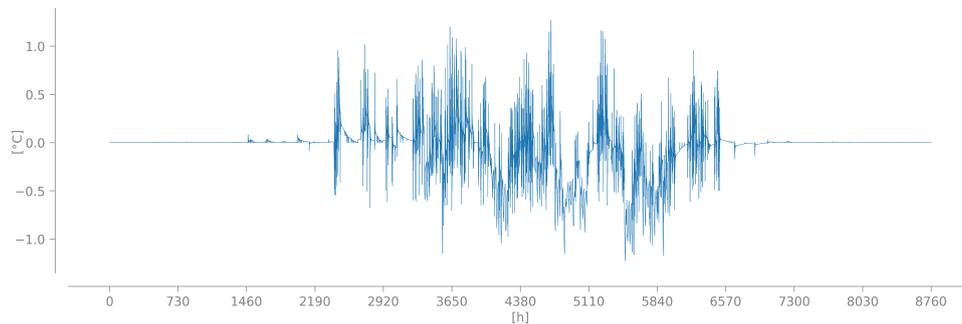


Figure 7 : Différence de température intérieure entre le cas PV/Ta sur 2 rangées et le cas de base PV

l'air circulant dans le chenal.

3.3. Sensibilité à la situation géographique

Les conditions de température et d'ensoleillement intervenant tant au niveau du comportement du bâtiment que de celui des panneaux, nous avons fait l'exercice de transposer notre bâtiment vers différentes localisations en France et d'observer l'influence sur les résultats afin de voir si certaines régions étaient plus propices à accueillir ce type de technologie. Les résultats sont repris au tableau 4. Pour Strasbourg, nous observons une réduction des besoins de chauffe de 1.14 %, jusqu'à 18.5 % de degrés-heures de surchauffe en moins et un peu plus de 1.19 % de gain sur la production PV pour une installation améliorée. Pour Dijon, les tendances sont sensiblement les mêmes avec jusqu'à -1.37 % sur les besoins de chauffage et 1.08 % sur la production électrique. Bien que Brest reçoive la même quantité d'ensoleillement que Dijon, les valeurs que nous pouvons voir sont assez étonnantes : 7.2 kWh/m² an pour les besoins nets en chaud, moins de 800 Kh pour la surchauffe au-dessus de 23 °C mais le bilan électrique est à peine à l'équilibre. Les résultats pour Marseille nous montrent rapidement que la construction n'est pas du tout adaptée au climat méditerranéen. Les besoins en chauffage sont quasi inexistantes mais la surchauffe est infernale avec une valeur proche de 15 000 Kh et des températures intérieures qui atteignent les 34 °C. Le bilan électrique annuel de l'installation, qui est la production photovoltaïque (5127 kWh) moins la consommation électrique (31.61 kWh), est toujours supérieur à la production des panneaux PV seuls (5077.20 kWh) mais la plus-value reste maigre de l'ordre de 18 kWh.

		Strasbourg $\tau=1h$				Dijon $\tau=1h$			
		BNE chauffage kWh/m ²	Surchauffe $T > 23^\circ C$ Kh	Production PV kWh	Consommation ventilateur kWh	BNE chauffage kWh/m ²	Surchauffe $T > 23^\circ C$ Kh	Production PV kWh	Consommation ventilateur kWh
	PV	14.34	4643	3626.25	-	12.43	5646	3882.50	-
une rangée de panneaux	PV/Ta	14.21	3720	3659.77	31.38	12.29	4596	3914.72	31.60
	PV/Ta + VG	14.18	3782	3670.11	31.37	12.25	4683	3924.50	31.59
panneaux en deux rangées	PV/Ta	14.23	3683	3654.81	31.38	12.31	4490	3909.93	31.62
	PV/Ta + VG	14.18	3782	3669.47	31.36	12.25	4684	3923.83	31.59
		Brest $\tau=1h$				Marseille $\tau=1h$			
		BNE chauffage kWh/m ²	Surchauffe $T > 23^\circ C$ Kh	Production PV kWh	Consommation ventilateur kWh	BNE chauffage kWh/m ²	Surchauffe $T > 23^\circ C$ Kh	Production PV kWh	Consommation ventilateur kWh
	PV	7.32	769	3756.05	-	3.04	17049	5077.20	-
une rangée de panneaux	PV/Ta	7.21	633	3781.17	31.97	2.98	14752	5115.84	31.60
	PV/Ta + VG	7.21	657	3788.66	31.94	2.96	14980	5127.00	31.62
panneaux en deux rangées	PV/Ta	7.23	629	3777.39	32.00	2.98	14606	5110.10	31.62
	PV/Ta + VG	7.21	658	3788.08	31.95	2.96	14975	5126.04	31.61

Tableau 4 : Résultats de simulation pour Strasbourg, Dijon, Brest ou Marseille (pas de temps de 1 h)

4. Conclusion

Nous avons modélisé le comportement d'une installation aérovoltaïque, simple ou améliorée avec des générateurs de vorticité, liée à un bâtiment énergétiquement performant et comparé les résultats avec le bâtiment uniquement équipé de panneaux photovoltaïques standards. Nous n'avons malheureusement pas obtenu les gains espérés. Nous avons procédé à une étude de sensibilité liée à la localisation géographique qui ne nous a pas permis de déterminer une zone plus propice à accueillir cette technologie. Il serait intéressant de tester le dispositif sur un logement peut-être moins performant afin de pouvoir profiter un peu plus des gains thermiques au printemps et à l'automne. Nous pourrions également utiliser un mélange variable d'air extérieur et d'air issu de l'installation PV/Ta afin de pouvoir proposer une température de soufflage d'air qui éviterait certaines surchauffes (voir les valeurs positives sur la figure 7).

Références

- [1] B. Li mans et al., Etude comparative des corrélations qui régissent les échanges convectifs au sein du chenal d'un panneau a rovoltaïque., *Congrès Français de Thermique SFT 2023* (Reims, 30 mai – 2 juin 2023), 231–238.
- [2] A. Molin et al., Investigation of energy performance of newly built low-energy buildings in Sweden, *Energy and Buildings*, Vol. 43 (2011), 2822–283.
- [3] Evans, D.L., Florschuetz, L.W., Cost studies on terrestrial photovoltaic power systems with sunlight concentration, *Solar Energy*, Vol. 19 (1977), 255–262.
- [4] T.T. Chow, A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology, *Applied Energy*, Vol. 87 (2010), 365–379
- [5] A. Tiwari et al., Performance evaluation of photovoltaic thermal solar air collector for composite climate of India, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 90 (2006), 175–189
- [6] B. Li mans et al., Etude de la combinaison de panneaux a rovoltaïques améliorés et d'un bâtiment  nerg tiquement performant., *Congrès Français de Thermique SFT 2022* (Valenciennes, 31 mai – 3 juin 2022), 543–550.
- [7] L. M. Candanedo, Convective Heat Transfer Coefficients in a Building-Integrated Photovoltaic/Thermal System, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 133 (2011), 021002-1 - 021002-14
- [8] S. Chamoli et al. , Thermal performance improvement of a solar air heater fitted with winglet vortex generators, *Solar Energy*, Vol. 159 (2018), 966–983