

Simulation d'une installation solaire aérovoltaique sur un bâtiment non résidentiel existant via TRNSYS

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

¹ UMONS - Faculté polytechnique - Service de thermique et combustion
Rue de l'Epargne, 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 de sensibilité par simulation thermique dynamique des apports d'une installation aéro-photovoltaïque sur un bâtiment non résidentiel datant du début des années 70 situé en Belgique. Nous comparons 3 types d'installations : photovoltaïque classique, panneaux solaires hybrides non améliorés et panneaux solaires hybrides équipés de générateurs de vorticité. Nous analysons l'impact de divers paramètres tels que l'orientation de l'installation, son inclinaison mais également l'impact de la réduction des déperditions du bâtiment.

Nomenclature

BNE besoins nets en énergie, kW h m^{-2}

c_p capacité thermique, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

CSTC Centre Scientifique et Technique de la Construction, -

I Irradiation solaire sur la paroi, W m^{-2}

K coefficient de transfert, $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$

n_{50} taux de renouvellement d'air par infiltration sous une différence de pression de 50 Pa, h^{-1}

Nu nombre de Nusselt, -

Pr nombre de Prandtl, -

PV/Ta panneau hybride photovoltaïque et thermique à air

Q quantité d'énergie, J

q_m débit massique, kg s^{-1}

q_v débit volumique, $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$

Re nombre de Reynolds, -

S surface, m^2

t température, $^\circ\text{C}$

U coefficient de transfert thermique de la paroi,

$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$

VG vortex generator

Symboles grecs

β coefficient de température, K^{-1}

η rendement, -

ε efficacité, -

λ conductivité thermique, $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$

τ temps, s

Indices et exposants

air lié à l'air

CF de convection forcée

cond de conduction

cool de refroidissement

elec électrique

env d'environnement

exch de l'échangeur

ext extérieur

fan du ventilateur

heat de chauffage

in entrant

m moyen

op opaque

out sortant

PV du panneau photovoltaïque

ray de rayonnement

ref de référence

sol solaire

therm thermique

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

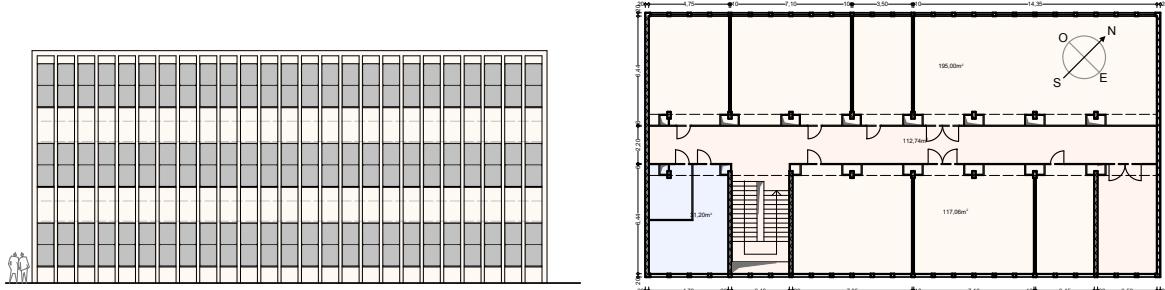


Figure 1 : Façade sud-est et plan type du bâtiment étudié

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 en intégrant des générateurs de vorticité dans le chenal des panneaux PV/Ta permettant d'améliorer les échanges thermiques convectifs [1] mais nous avions dû nous rendre à l'évidence que ces gains potentiels ne sont que peu exploitables pour une habitation passive [2]. Parmi les pistes évoquées quant à ce faible impact sur les consommations, nous mettions en avant d'une part le fait que la production de chaleur ne coïncidait pas avec la consommation dans le cas d'un logement et d'autre part que, par définition, la maison passive utilisait déjà pleinement les apports solaires quand ils étaient présents. Nous avons donc fait le choix de modéliser un bâtiment plus grand, non résidentiel et de faible qualité énergétique.

2. Méthodologie

2.1. Simulation thermique dynamique

La simulation thermique dynamique (STD) permet d'étudier l'évolution temporelle des grandeurs physiques liées à la thermique d'un modèle numérique représentant un objet réel, que ce soit un composant, un système énergétique ou dans notre cas un bâtiment, en résolvant des équations différentielles ordinaires. Les simulations réalisées pour cette étude ont toutes été menées avec le logiciel TRNSYS[3].

2.2. Le bâtiment

Le bâtiment étudié est un immeuble de plan rectangulaire de 30.00 m x 15.20 m et d'une hauteur de 14.50 m en dimensions extérieures comprenant 3 étages de bureaux. Seules les façades sur la longueur disposent de fenêtres orientées soit au nord-ouest, soit au sud-est. Le bâtiment est adjacent à une halle d'essais non chauffée que nous considérerons à température constante de 10 °C tout comme les vides techniques sur lesquels il repose. D'architecture de style fonctionnaliste, l'enveloppe est rythmée par des colonnes de béton armé de 20 cm d'épaisseur séparées de 1.00 m les unes des autres par des fenêtres et des allèges (voir figure 1). Les seules parois isolées sont ces dernières et sont constituées de 8 cm de béton armé, de 4 cm de laine minérale et d'une plaque de fibrociment. Les coefficients de transfert thermique globaux U des différentes parois sont reprises au tableau 1. Le bâtiment présente une enveloppe peu étanche à l'air. Sur base d'une étude du CSTC[4] au cours de laquelle l'étanchéité de 45 écoles a été mesurée entre 1986 et 1987, nous avons utilisé un taux de renouvellement d'air par infiltration n_{50} de 12 h⁻¹. Pour les besoins de l'étude, nous avons considéré que le bâtiment était équipé d'un groupe de ventilation mécanique mais sans récupérateur de chaleur dans sa configuration ini-

Type	U W/m ² K			Surfaces m ²			
	1970	1996	2014	Couloirs	Sanitaires	Bureaux NO	Bureaux SE
mur	3.85	0.61	0.234	137.25	10.80	151.650	40.50
toit	4.10	0.4	0.235	112.80	31.20	195.00	117.00
plancher	3.02	0.76	0.29	144.00	31.20	163.80	117.00
allèges	0.78	0.61	0.237	44.00	24.00	142.00	90.00
fenêtres	2.7	2.2	1.5	55.00	30.00	177.50	112.50
n_{50}	12	8	3				
ϵ_{exch}	-	0.75	0.8				

Tableau 1 : Composition et surface des parois

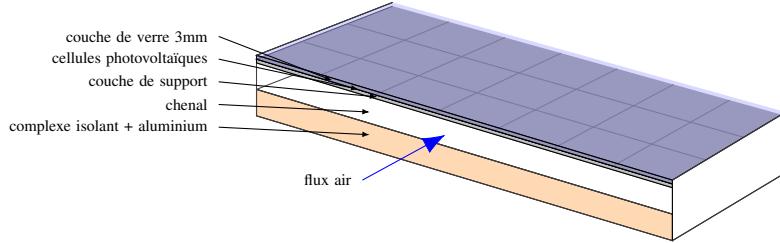


Figure 2 : exemple de composition d'un panneau PV/Ta simple

tiale. Afin de pouvoir déterminer les débits de ventilation, nous considérons qu'une personne occupe 15 m² de surface au sol[5] et a besoin de 30 m³/h d'air neuf. Les gains internes, regroupant les personnes, leur ordinateur et les équipements, sont de 10 W/m² et comme une partie de ces derniers fonctionnent en continu, nous avons introduit 1/6 des gains comme constants au cours du temps et 5/6 liés à l'occupation. En ce qui concerne les consignes de chauffage, nous utilisons un régime 20 °C/15 °C pour les bureaux et 18 °C/15 °C pour les couloirs et sanitaires en fonction de l'usage du bâtiment.

2.3. Le panneau aéro-photovoltaïque

Un panneau aéro-photovoltaïque (PV/Ta) est un dispositif solaire hybride qui combine la production d'électricité (photovoltaïque) et la récupération de chaleur (thermique), en utilisant l'air comme fluide caloporteur [6]. Bien que l'air ne soit pas le fluide le plus performant sur le plan thermique (en raison de sa faible conductivité et de sa faible capacité calorifique), il offre cependant certains avantages. Par exemple, les systèmes utilisant l'air sont plus simples et moins coûteux à installer. De plus, l'air est abondant, gratuit et surtout essentiel pour assurer une bonne ventilation des bâtiments[7]. Un panneau PV/Ta simple comprend un chenal d'air situé sous le panneau photovoltaïque délimité dans sa partie inférieure par une plaque plus ou moins isolée [8] (voir figure 2). Dans une précédente publication [9], nous avons présenté un modèle thermique 1-D de ce type de système. Nous avons ensuite développé un nouveau composant de panneau solaire hybride dans le logiciel de simulation TRNSYS, nous permettant ainsi d'équiper n'importe quel modèle de bâtiment d'une ou plusieurs installations solaires aérovoltaiques où chaque panneau est paramétrable individuellement tant au niveau des aspects géométriques et technologiques que des modèles de transfert de chaleur par convection. Les figures 3 et 4 et les équations (1) à (5) nous montrent comment le module réalisé reçoit les informations du flux d'air entrant (débit massique et température d'air) et du fichier météo (température sèche de l'air extérieur, température effective du ciel, vitesse du vent, flux solaire incident) et, sur base d'une série de paramètres intrinsèques au panneau, calcule en sortie la température de l'air à l'extrémité du chenal ($t_{air,out,i}$), les productions électrique ($Q_{elec,i}$) et thermique ($Q_{therm,i}$), le rendement photovoltaïque corrigé en fonction de la température moyenne des cellules PV (η_i),

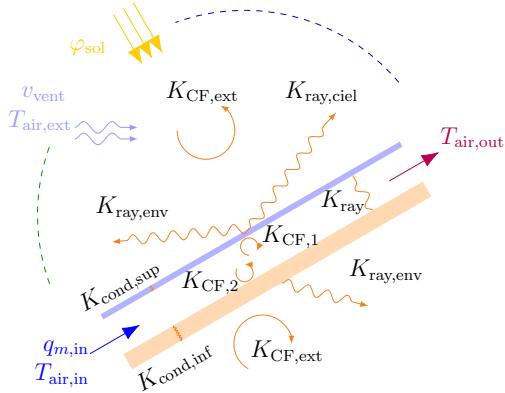


Figure 3 : Les modes de transfert thermique

les températures moyennes au niveau des différentes couches ($t_{air,i}, t_{pv,i}, \dots$)¹

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

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

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

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

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

Le modèle de panneau PV/Ta peut intégrer un principe d'amélioration des échanges convectifs dans le chenal (ailettes génératrices de vorticité) en utilisant la corrélation de Chamoli [10] (eq. 7) en lieu et place de celle de Colburn (eq. 6) pour le régime turbulent. Pour les ailettes, nous les considérons de forme triangulaire ($c/a = 0$) et faisant un angle α de 60° par rapport au sens de l'écoulement de l'air comme le suggère l'auteur dans son article[10].

$$Nu = 0.0234 Re^{0.8} Pr^{1/3} \quad (6)$$

$$Nu = 0.2365 Re^{0.6689} \left(1 + \frac{c}{a}\right)^{0.1866} \left(\frac{\alpha}{60}\right)^{-0.3227} e^{-0.076 \ln(1+\frac{c}{a})^2} e^{-0.9576 \ln(\frac{\alpha}{60})^2} \quad (7)$$

avec α , a et c illustrés sur la figure 5

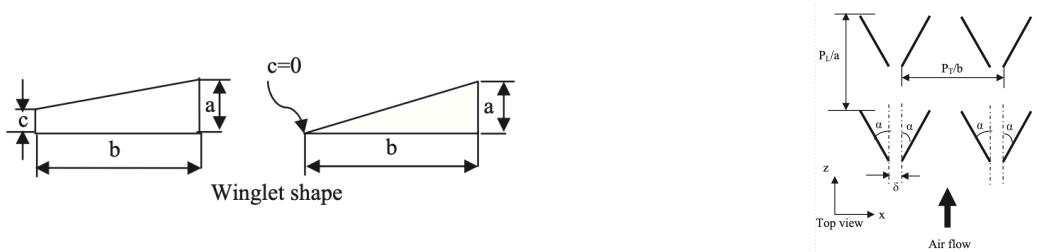


Figure 5 : Forme et distribution des ailettes selon Chamoli [10]

2.4. L'installation

L'installation aéro-photovoltaïque modélisée est composée de 28 panneaux PV/Ta de 1.68 m de long par 1.02 m de large, avec un rendement PV de référence de 19.62 % et un coefficient de

1. Nous renvoyons le lecteur vers nos précédentes publications pour plus d'informations sur le modèle [1][9]

température $\beta = -0.369\%/\text{K}$ (eq.4) , disposant d'un chenal de 35 mm de hauteur sous lequel se trouve un panneau isolant en polystyrène extrudé ($\lambda = 0.035 \text{ W/mK}$) de 30 mm d'épaisseur. Le tout est posé librement sur la toiture plate nous permettant de faire varier l'orientation du sud à l'est et l'inclinaison de 30° à 75° . Le débit d'air sous les panneaux est assuré soit par le groupe de ventilation du bâtiment dans le cas où l'air est utilisé pour alimenter ce dernier en air neuf, soit par un ventilateur auxiliaire dans le cas contraire. Celui-ci a donc pour but de refroidir les panneaux afin d'améliorer le rendement photovoltaïque (eq.4), il ne fonctionnera donc qu'en période d'ensoleillement. La consommation de ce ventilateur sera comptabilisée sur base des équations 8 et 9. Cette dernière a été établie par interpolation du second ordre sur les données issues de la documentation du TD-MixVent de chez Soler & Palau [11].

$$Q_{\text{fan},i} = P_{\text{fan},i} \cdot d\tau \quad (8)$$

$$P_{\text{fan},i} = 1.7244 \times 10^{-5} \cdot q_{v,i}^2 + 0.0964 \cdot q_{v,i} + 2.0176 \times 10^{-4} \quad (9)$$

avec $q_{v,i}$ le débit volumique en m^3/h du ventilateur auxiliaire à l'instant i

Nous utiliserons l'air issu de l'installation solaire comme entrée du système de ventilation soit à des fins de préchauffage si il est plus chaud que l'air extérieur et que l'air intérieur du bâtiment est inférieur à 20°C , soit à des fins de refroidissement si il est plus froid que l'air extérieur et que l'air intérieur du bâtiment est supérieur à 22°C (eq. 10).

$$\text{air ventilation} = \text{air sortie installation solaire si } \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} t_{int} < 20^\circ\text{C} \\ t_{ext} < t_{air,out} \end{array} \right. & \text{pour réchauffer} \\ \text{ou} \\ \left\{ \begin{array}{l} t_{int} > 22^\circ\text{C} \\ t_{ext} > t_{air,out} \end{array} \right. & \text{pour refroidir} \end{cases} \quad (10)$$

2.5. Performance

Dans le cadre de cette publication, nous considérons que la totalité de l'énergie électrique produite est utile (utilisée par le bâtiment ou le réseau) alors que l'énergie thermique n'est comptabilisée que si l'air en sortie de panneaux est utilisé pour le système de ventilation (eq.11). De notre production électrique, nous déduisons la consommation du ventilateur auxiliaire utilisé dans le but de refroidir les cellules photovoltaïques pour augmenter leur rendement et donc la production électrique (eq.12). Le bilan énergétique de l'installation couplée au bâtiment est la somme de la production électrique corrigée et de la production thermique utile sur la période considérée (eq.13).

$$Q_{\text{therm,utile},i} = Q_{\text{heat,util},i} + Q_{\text{cool,util},i} \quad (11)$$

$$Q_{\text{elec,corrigée},i} = Q_{\text{elec},i} - Q_{\text{fan},i} \quad (12)$$

$$Q_{\text{tot}} = \sum_i (Q_{\text{elec,corrigée},i} + Q_{\text{therm,utile},i}) \quad (13)$$

3. Résultats

3.1. Référentiel

Afin de disposer d'un référentiel, notre première simulation sera une installation photovoltaïque classique, autrement dit sans ventilation forcée à l'arrière des panneaux, orientée sud-est avec une inclinaison de 45° sans auxiliaire de ventilation couplé au bâtiment avec un niveau

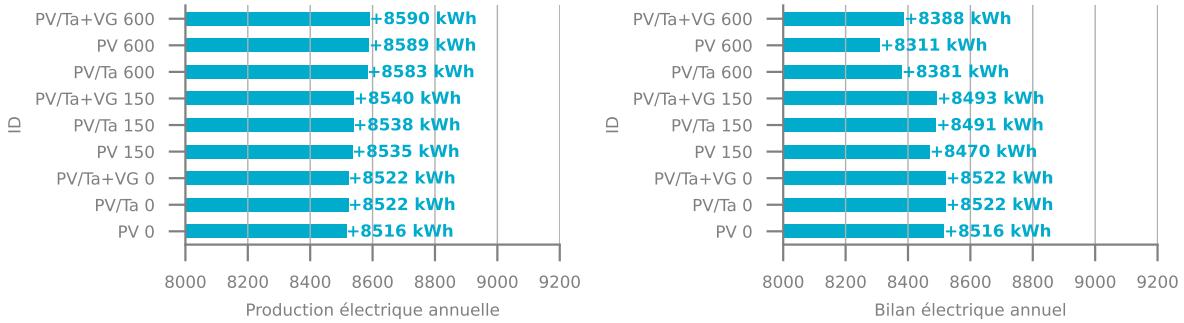


Figure 6 : Comparaison des productions électriques brutes et corrigées pour une orientation sud-est et une inclinaison de 45°

Débit m ³ /h	Technologie	Bilan énergétique kWh	PV kWh	Heat kWh	Cool kWh	Fan kWh	Prod. élect. corrigée kWh	Gain sur Bilan par rapport à réf %	BNE heat kWh m ⁻²
600	PV/Ta+VG	8,993.89	8,590.15	528.57	77.56	202.40	8,387.76	5.61	190.48
	PV/Ta	8,963.56	8,582.95	508.98	73.90	202.27	8,380.68	5.26	190.56
	PV	8,310.54	8,588.58	0.00	0.00	278.04	8,310.54	-2.41	192.66
150	PV/Ta+VG	9,099.53	8,540.32	528.57	77.56	46.93	8,493.39	6.86	190.48
	PV/Ta	9,073.96	8,537.98	508.98	73.90	46.90	8,491.08	6.56	190.56
	PV	8,470.37	8,534.84	0.00	0.00	64.46	8,470.37	-0.53	192.66
0 référence →	PV/Ta+VG	9,128.27	8,522.14	528.57	77.56	0.00	8,522.14	7.19	190.48
	PV/Ta	9,104.85	8,521.97	508.98	73.90	0.00	8,521.97	6.92	190.56
	PV	8,515.74	8,515.74	0.00	0.00	0.00	8,515.74	0.00	192.66

Tableau 2 : Résultats pour l'installation solaire orientée sud-est avec une inclinaison de 45°

d'isolation de 1970 (voir tab. 1). Ceci nous permettra de connaître le comportement du bâtiment seul et la production photovoltaïque de base de l'installation. 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 standard de 8760 h, nous obtenons des besoins nets en chauffage de 192.66 kWh/m² an, des degrés-heures de surchauffe au-dessus de 23 °C de 1482.14 Kh pour les bureaux au nord-ouest et de 1205 Kh pour ceux orientés au sud-ouest. La production électrique annuelle est de 8561.59 kWh.

3.2. Etude de sensibilité de l'installation aéro-photovoltaïque

Pour notre bâtiment existant, nous avons simulé 3 technologies (PV, PV/Ta et PV/Ta amélioré) avec 3 débits d'air auxiliaire pour 3 inclinaisons différentes, selon 3 orientations, soit 81 cas. Les technologies hybrides affichent une faible diminution de 2 kWh/m² an sur les besoins nets annuels en chauffage. Pour une inclinaison de l'installation à 45°, nous pouvons observer sur la figure 6 et le tableau 2 une augmentation de la production photovoltaïque avec des influences claires du débit de ventilation (16-18 kWh à 150 m³/h et 61-68 kWh à 600 m³/h) ainsi que de la technologie dans un second temps. Pour la production électrique corrigée, nous constatons que les consommations des ventilateurs sont plus importantes que les gains générés. Au niveau du bilan énergétique, il est logique de voir les technologies hybrides obtenir de meilleurs résultats 9105-9128 kWh puisqu'elles valorisent l'énergie thermique (avec un léger avantage pour le modèle amélioré). Nous obtenons une amélioration d'au moins 5% sur ce poste par rapport au photovoltaïque simple. L'impact des différents paramètres annoncés en début de chapitre (orientation, inclinaison, débit de ventilation auxiliaire et type de technologie) sur le bilan énergétique est présenté à la figure 7. Nous pouvons y constater que les gains sont gran-

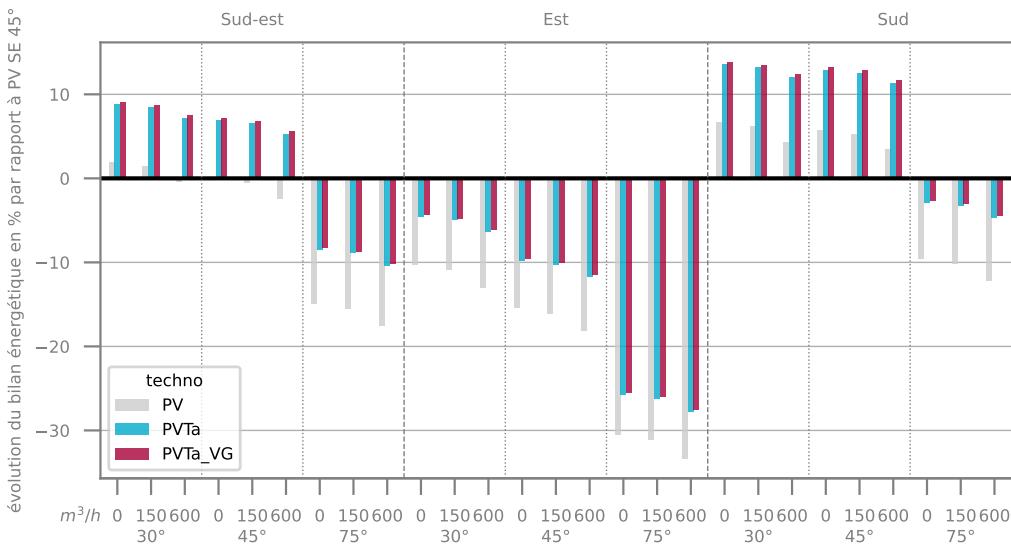


Figure 7 : Evolution (en %) du bilan énergétique par rapport au PV orienté sud-est à 45° en fonction de l'orientation, de l'inclinaison, du débit de ventilation auxiliaire et du type de technologie

dément impactés par l'orientation et l'inclinaison de l'installation mais comme nous l'avons signalé précédemment, le débit de ventilation auxiliaire n'a lui quasi pas d'influence. Pour une orientation donnée, la perte est de l'ordre de 15 % en passant d'une inclinaison de 45° à 75° et de l'ordre de 15 à 17 % en passant d'une orientation sud-est à est.

3.3. Etude de sensibilité de la qualité du bâtiment

Nous souhaitons étudier l'impact des besoins du bâtiment sur notre bilan énergétique. Nous avons vu que dans ce bilan nous comptabilisons l'énergie thermique, issue des panneaux solaires, utilisée pour préchauffer ou refroidir le bâtiment. Nous envisagerons donc, en plus de la configuration d'origine, le même bâtiment mais avec une isolation des parois proche des exigences de la réglementation wallonne de 1996 ou 2014, une récupération de chaleur sur la ventilation et un taux de renouvellement d'air par infiltration n_{50} réduit (cf. tableau 1). Les besoins nets en chauffage passent d'environ 190 kWh/m² an à 60 kWh/m² an pour '1996' et 12 kWh/m² an pour '2014'. La figure 8 compare le bilan énergétique des installations sur une version isolée du bâtiment par rapport à celle sur le bâtiment de base. Nous pouvons y noter que, pour une même installation solaire, cette dernière aura un bilan énergétique annuel un peu plus faible sur un bâtiment mieux isolé, une différence de -175 à -204 kWh pour la configuration '1996' par rapport à la version '1970' (2-2.5 %) et de -116 à -165 kWh pour celle de '2014' par rapport à celle de '1970' (1.5-2 %). Ceci est lié d'une part à une utilisation moindre du préchauffage dû au fait que le bâtiment a moins de besoins de chauffage au moment où l'installation solaire produit de la chaleur exploitable. En effet, il profite lui-même des apports solaires au travers du vitrage et ses déperditions sont maintenant réduites, mais avec un risque d'une éventuelle surchauffe. Nous pouvons d'ailleurs observer une augmentation de l'utilisation de l'air issue des panneaux pour des besoins de refroidissement du double entre '1996' et '1970' de 75 kWh à 150 kWh et presque 5 fois plus entre '2014' et '1970' de 75 kWh à 360 kWh.

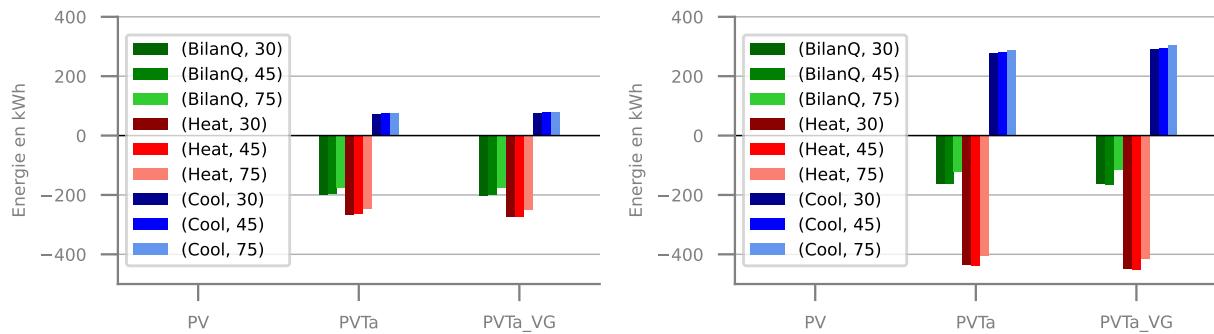


Figure 8 : Différence en kWh du bilan énergétique (BilanQ), de la chaleur utile pour le chauffage (Heat) et le refroidissement (Cool) entre la situation 1996 et celle de 1970 (à gauche) et entre 2014 et 1970 (à droite) pour une orientation sud-est et un débit auxiliaire de $150 \text{ m}^3/\text{h}$

4. Conclusion

Nous avons étudié la combinaison d'une installation aérovoltaïque, classique ou améliorée avec des générateurs de vorticité, et d'un bâtiment non résidentiel et comparé les résultats avec l'immeuble uniquement équipé de panneaux photovoltaïques standards dans plusieurs configurations en faisant varier l'orientation de l'installation, son inclinaison, le débit de ventilation auxiliaire mais aussi en modifiant les performances thermiques du bâtiment. Les résultats ne permettent pas de dégager un véritable intérêt pour la partie préchauffage qui tend à disparaître avec l'augmentation du niveau d'isolation de l'immeuble. Notons que la partie refroidissement semble intéressante pour réduire les risques de surchauffe de manière passive. Il serait intéressant de poursuivre l'étude en étudiant l'influence d'autres paramètres tels que le nombre de panneaux, la répartition de ceux-ci sur des inclinaisons ou orientations différentes.

Références

- [1] B. Liémans et al., Etude comparative des corrélations qui régissent les échanges convectifs au sein du chenal d'un panneau aérovoltaïque., *Congrès Français de Thermique SFT 2023* (Reims, 30 mai – 2 juin 2023), 231–238.
- [2] B. Liémans et al., Etude par STD de l'intégration d'une installation de panneaux aérovoltaïques sur une maison dite passive., *Congrès Français de Thermique SFT 2024* (Strasbourg, 4 – 7 juin 2024), <https://doi.org/10.25855/SFT2024-034>.
- [3] Solar Energy Laboratory. TRNSYS : A Transient Simulation Program; University of Wisconsin : Madison, WI, USA, 2018.
- [4] P. Wouters, L'Heureux D, et Et Al., Ventilation and Air Quality in Belgian Buildings : A State of the Art., *9th AIVC Conference* (Gent, Belgique 12-15 Septembre, 1988)
- [5] Annexe C2 - Ventilation non résidentielle de l'arrêté du Gouvernement Wallon du 11 avril 2019 , <https://energie.wallonie.be/fr/reglementation-peb-a-partir-du-11-03-2021.html>
- [6] Evans, D.L., Florschuetz, L.W., Cost studies on terrestrial photovoltaic power systems with sunlight concentration, *Solar Energy*, Vol. 19 (1977), 255–262.
- [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] 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
- [9] B. Liémans et al., Etude de la combinaison de panneaux aérovoltaïques améliorés et d'un bâtiment énergétiquement performant., *Congrès Français de Thermique SFT 2022* (Valenciennes, 31 mai – 3 juin 2022), 543–550.
- [10] S. Chamoli et al. , Thermal performance improvement of a solar air heater fitted with winglet vortex generators, *Solar Energy*, Vol. 159 (2018), 966–983
- [11] S&P, TD-MIXVENT, <https://www.solerpala.com/fr-fr/vmp-aerateurs-td-mixvent-92-serie/>, vu le 15 janvier 2025