Le bâtiment démonstrateur
Modélisation et simulation
Premiers résultats
Perspectives

Pompe à chaleur et photovoltaïque hybride

Un système innovant et performant

Par Ismaël Lokhat, Cythélia, Alain Guiavarch, Armines, Éric Auzenet, Ciat, Fabrice Claudon, CEA-Inès

Les capteurs photovoltaïques sont généralement intégrés au bâtiment avec une lame d'air afin d'évacuer la chaleur générée par convection naturelle. Cette quantité de chaleur peut être significative, et l'utilisation de cette ressource peut contribuer à améliorer le COP d'une pompe à chaleur. Explications.

Quatre partenaires (Armines, CIAT, Cythelia et CEA-INES) se sont regroupés en 2008 afin de réaliser le projet PACAirPV qui s'inscrit dans la programmation 2008 du programme Habisol de l'ANR, regroupant des thèmes de recherche sur le bâtiment et sur le solaire (anciennement solaire photovoltaïque). L'objectif de ce projet, qui s'achèvera cette année 2012, est d'étudier le couplage entre un capteur photovoltaïque hybride et une pompe à chaleur, le tout en interaction avec le bâtiment, et ceci du point de vue expérimental et de la modélisation. Le concept PACAirPV repose sur l'idée qu'il est possible de coupler ces deux composants de manière efficace, à moindre coût, et avec des technologies déjà existantes, afin d'améliorer encore la performance des bâtiments basse consommation et de leurs systèmes. Les gains attendus sont une augmentation du COP saisonnier de la pompe à chaleur et, en raison de températures de fonctionnement plus basses, une meilleure productivité de l'installation photovoltaïque, ainsi qu'une plus grande longévité. Le projet a permis la construction d'un prototype qui a été installé dans le deuxième bâtiment à énergie positive de Cythelia à Montagnole, près de Chambéry (73), la "Petite Maison ZEN" (PMZ).

Photo 1 "La Petite Maison ZEN", Cythelia près de Chambéry.

Le bâtiment démonstrateur

Comme son ainée, la Maison ZEN (inaugurée en 2007 et qui intégrait déjà une pompe à chaleur couplée à une toiture photovoltaïque), la PMZ, inaugurée en novembre 2011, est également un bâtiment à énergie positive. › **Photo 1** Le bâtiment qui abrite une partie des locaux de Cythelia est construit en ossature bois. Les épaisseurs de laine de bois mises en œuvre, ainsi que les ouvrants d'excellente facture permettent d'atteindre des performances d'enveloppe très correctes (Ubat = 0,35 W/m²/K). La ventilation est assurée par une double-flux avec échangeur statique à 90 % de rendement qui permet de réduire les déperditions tout en maintenant un taux de renouvellement d'air suffisant. La ventilation permet également d'adapter les débits de renouvellement à l'occupation dans une salle de réunion/formation. L'éclairage est assuré par des spots LED, d'une puissance unitaire de 7 W, qui permettent un éclairage sur les plans de travail plus efficace. De plus, tous les équipements installés sont de classe A+ au minimum, et seuls des ordinateurs portables, moins énergivores, sont utilisés. L'objectif est d'avoir un niveau de consommation tous usages confondus (y compris électricité spécifique) inférieur à 50 kWh/m².an en énergie finale. Les besoins de chauffage ont été estimés à 27 kWh/m²/an et ceux de rafraîchissement à 4 kWh/m².an (résultats simulation thermique dynamique Pleiades-Comfie).

La production d'électricité est assurée par une installation photovoltaïque d'une puissance de 8,2 kWc. Deux champs de modules la composent. Le premier qui couvre la totalité du pan sud de la toiture représente une puissance de 7,2 kWc et est constitué de modules en couches minces CIGS dont le rendement est de 11,9 %. Le second permet d'abriter une véranda, et est composée de modules en couches minces micromorphes semi-transparents,

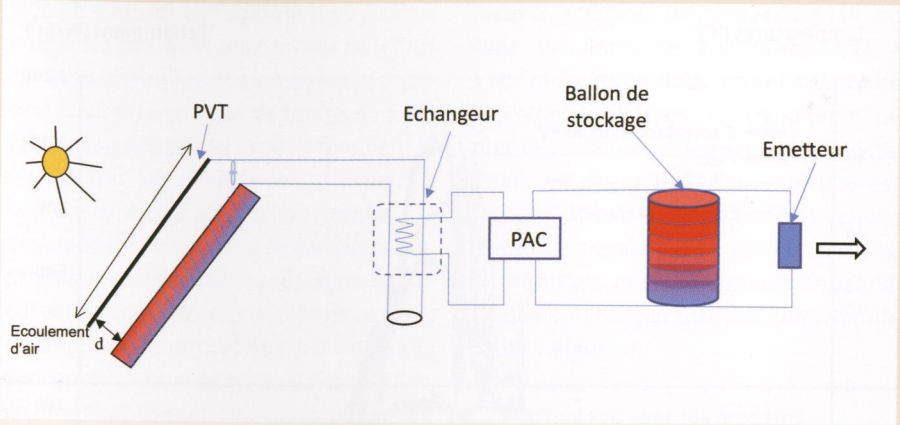


Figure 1 Schéma de principe.

d'un rendement de 9 %. La production de ces modules permet de faire de la PMZ un bâtiment à énergie positive.

L'installation

› La récupération d'air

Afin de faciliter la récupération d'air préchauffé par les modules, un prototype de système d'intégration, CANOPIA© a été testé. Il présente l'avantage de faciliter l'échange thermique entre l'air et la face arrière des modules. D'autres systèmes d'intégration, disponibles sur le marché, et présentant les mêmes avantages, peuvent également être utilisés. La circulation d'air se fait dans l'espace compris entre les modules et le pare-pluie. L'air est récupéré à proximité du faîtage grâce à des ouvertures pratiquées dans le pare-pluie. La taille de ces ouvertures a été déterminée afin de compenser les pertes de charge et d'équilibrer les vitesses d'air sur toute la longueur de la toiture.

› Le système

Le système (› **Figure 1** et › **Photo 2**) est composé de trois éléments principaux :

- un caisson courant le long du faîtage, auquel une gaine est connectée en lien direct avec un double ventilateur extracteur associé à un échangeur air-eau (module de type "CTA" de CIAT);
- une pompe à chaleur (PAC) eau/eau de CIAT;
- un ballon de stockage.

La CTA a été conçue en fonction des contraintes d'encombrement dans le grenier de la PMZ. L'air est mis en mouvement au moyen de deux ventilateurs basse consommation (moteur à variateur de vitesse et à courant continu) et l'échangeur air/eau transfère les calories extraites sous toiture vers l'évaporateur de la pompe à chaleur. Cette dernière est une PAC standard eau/eau (Ageo + 20 H de CIAT), dont les plages de fonctionnement sont suffisamment larges pour ne pas nécessiter de modifications ou développements spécifiques. Les circulateurs sont à débit variable et donc plus économes en énergie (5 à 70 W contre 300 W classiquement). Ainsi couplée à l'énergie solaire, la PAC devient héliothermique. Une étude préliminaire par simulation a montré la nécessité de disposer d'un stockage, car il n'y a en général pas de corrélation entre les besoins de chauffage d'un bâtiment et la production de chaleur par la toiture. Le stockage permet une liberté totale sur les heures de fonctionnement de la PAC qui n'est en route que lorsque les conditions sont les plus favorables. Un stockage de 1 m³ permet d'assurer une "autonomie" d'un bâtiment de 100 m² pendant plus de 24 h en hiver.

La production d'eau chaude sanitaire (ECS) est également possible par la PAC, ou bien, lorsque les conditions sont favorables en été par chauffage direct à partir des calories à 50 °C récupérées en toiture. La pompe à chaleur est réversible, ce qui permet de produire le froid la nuit, au moment où la température du toit est la plus faible et au tarif de nuit.

› Émetteurs

Le système peut fonctionner avec tout type d'émetteur basse température. Le choix s'est porté sur des unités de confort Major-

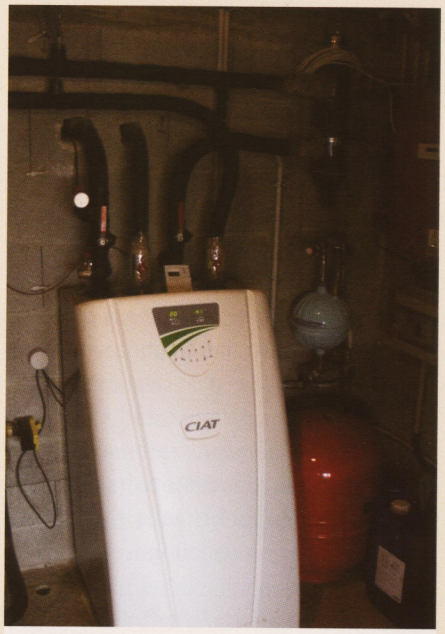


Photo 2 Pompe à chaleur.

Photo 3 Interface de gestion.

line de CIAT avec moteur à vitesse variable haute efficacité. En effet, la PMZ est un bâtiment tertiaire et ses besoins de chauffage varient beaucoup en fonction de l'horaire (jour/nuit) : en dehors des heures de travail, les besoins de chauffage sont faibles puisque les bureaux sont vides (les bureaux sont maintenus à une température plus faible ≈ 15 °C). Par ailleurs, le bâtiment étant faiblement inertiel, un système très réactif semblait le plus approprié. Le système pouvant être utilisé l'été pour rafraîchir le bâtiment, l'utilisation du vecteur air est plus pertinente pour le confort des occupants.

› L'instrumentation

L'instrumentation mise en place par le CEA-

INES vise à vérifier les performances du système, et fournit également au système de régulation les données d'entrée nécessaires au logiciel de contrôle/commande. Elle comporte 52 points de mesures qui sont traités au moyen de deux centrales d'acquisition, l'une au plus près de la toiture et de la CTA, et l'autre à proximité de la PAC. L'enregistrement des données se fait toutes les minutes. Outre le système "thermique", l'installation photovoltaïque fait également l'objet d'un suivi approfondi, ainsi que certains paramètres du bâtiment tels que les températures intérieures et les consommations (des compteurs d'énergie ont été installés pour chaque grand poste de consommation : éclairage, prises électriques, VMC...).

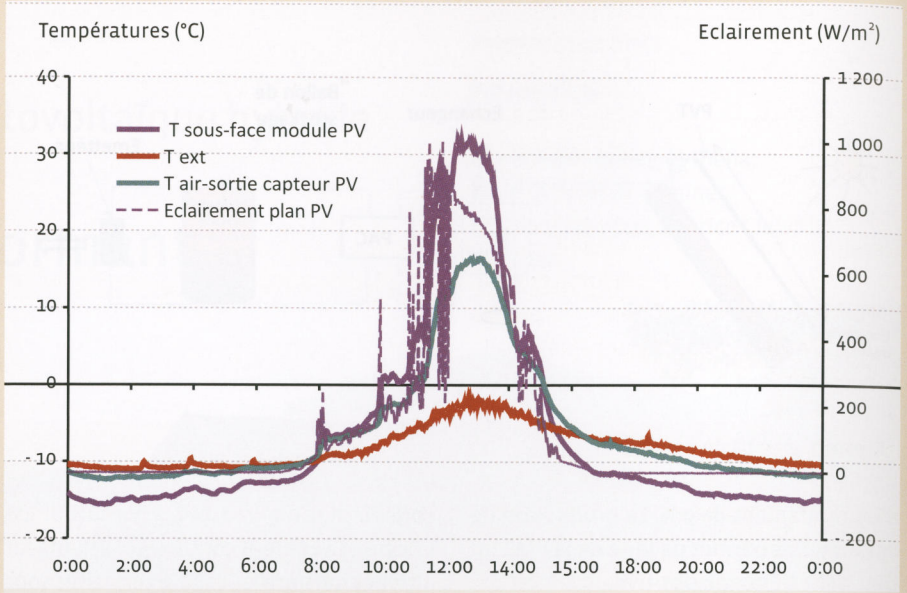
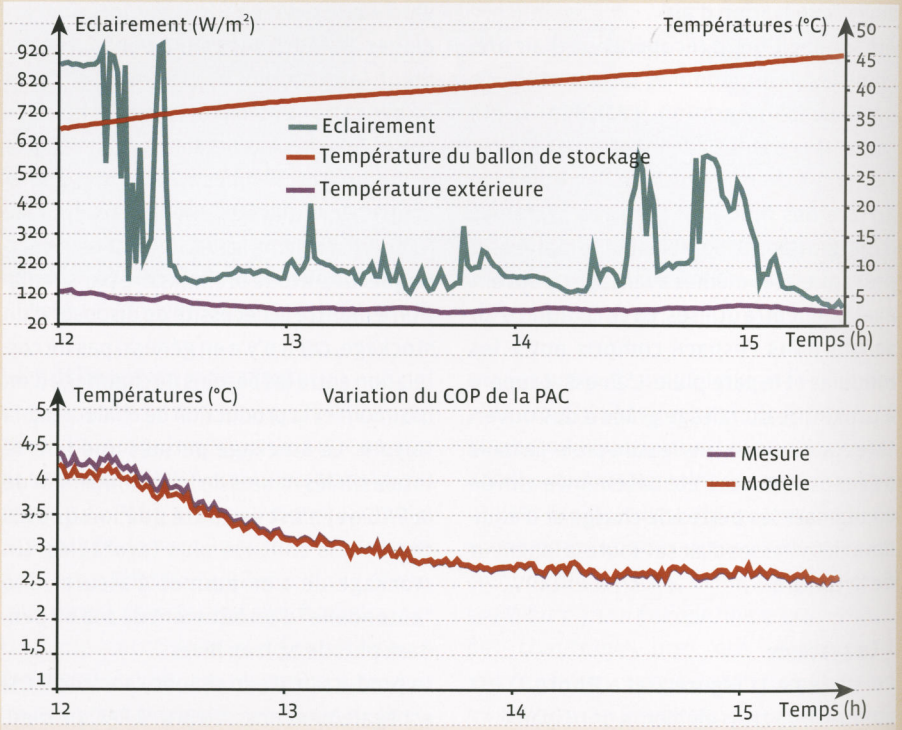


Figure 2 Températures et éclairement observés le 6 février 2012, débit 1 000 m³/h.

› La régulation

Le logiciel de régulation a été développé par CIAT sous Labview. › **Photo 3** Il permet de choisir les modes de fonctionnement (été/hiver) ainsi que les plages horaires de fonctionnement de la PAC (chaud/froid/ECS). Il gère également le débit de ventilation des panneaux PV et les fonctions de sécurité du système complet. L'interface permet également d'effectuer un suivi en temps réel, grâce à un synoptique qui renvoie les valeurs de températures et de débit d'air en provenance du système d'acquisition de données. L'algorithme de régulation reprend les grands principes énoncés plus haut.



Figures 3 et 4 Comparaison mesures/modèle.

Modélisation et simulation

La production électrique du capteur photovoltaïque est calculée à partir du modèle à une diode. Le rendement électrique dépend de la température de jonction, ou encore de la température de fonctionnement des cellules photovoltaïques. Dans le cas d'un capteur "PV-T" (capteur hybride photovoltaïque thermique à air), cette température dépend notamment du transfert thermique se produisant dans la lame d'air, en convection forcée dans notre cas puisqu'un ventilateur à vitesse variable est actionné pour ventiler le capteur (il est également possible de modéliser la convection naturelle). Plusieurs hypothèses sont émises (régime stationnaire, transferts mono-dimensionnels) pour simplifier le modèle tout en gardant une précision satisfaisante. L'air en sortie du capteur "PV-T" est ensuite utilisé en tant que source froide d'une PAC, *via* un échangeur air/eau si il s'ait d'une PAC à eau. Le modèle de PAC suppose également un régime stationnaire. Cependant, le modèle prend tout de même en compte les aspects dynamiques liés notamment aux cycles de marche/arrêt, puisque la performance de la PAC suit une loi qui est fonction du taux de charge (loi qui diffère suivant que l'on a une PAC de type "marche/arrêt", ou une PAC de type "vitesse variable"). Un modèle de ballon stratifié en température est utilisé pour modéliser aussi bien un ballon de stockage de chaleur qu'un ballon d'eau chaude sanitaire. L'ensemble des modèles interagit *via* un module de régulation. L'outil final per-

met de simuler l'ensemble du système intégré au bâtiment, avec un pas de temps compris entre 1 mn et 1 h suivant la précision souhaitée (un pas de temps de 1 mn étant nécessaire pour étudier finement la régulation). Cet outil de calcul, intégré à la plate-forme de simulation Comfie, est développé en cherchant le meilleur compromis entre fiabilité des résultats de calcul et rapidité, soit pour mener des études paramétriques et contribuer à l'aide à la conception, soit pour aller encore plus loin en effectuant des études de sensibilité ou d'optimisation.

Premiers résultats

› Observations

L'installation est complètement opérationnelle depuis le début de l'année 2012. Les résultats concernant les performances saisonnières du système ne sont pas encore disponibles, mais quelques observations significatives ont déjà pu être faites pour plusieurs journées. Par exemple, en plein hiver à - 3 °C, pour la journée du 6 février, avec un débit de ventilation fixé à 1 000 m³/h, et un éclairement solaire de 800 W/m², la différence entre la température des modules et la température extérieure est de 33 °C. Et l'air extérieur est réchauffé de 20 °C. Des premières valeurs de COP ont également pu être mesurées. Ces résultats, qui sont en cours de validation, laissent apparaître des gains significatifs. › **Figure 2**

› Comparaison avec les modèles

Les **Figures 3 et 4** présentent le comparatif entre modélisation (modèle du système capteur PV+PAC+ballons couplé à l'outil de simulation thermique de bâtiment Comfie) et résultats expérimentaux, pour l'après-midi du 14 février 2012. En début d'après-midi, les éclairements sont forts, puis le ciel se couvre. À éclairement constant le COP diminue à mesure que la température dans le ballon augmente. On observe une stabilisation du COP entre 14 h et 15 h dû à un éclairement moyen en hausse sur cette période. La comparaison mesures/modèle est satisfaisante, même si on note en début d'après-midi un léger écart. Cet écart peut s'expliquer par une incertitude sur les mesures, ainsi que par certains phénomènes transitoires non complètement pris en compte dans le modèle. Une analyse est en cours pour améliorer encore le modèle.

Perspectives

Le concept issu du programme PACAirPV a été breveté. En combinant cinq fonctions (chauffage, rafraîchissement, ECS, production d'électricité, couverture), le système constitue une solution qui anticipe dès maintenant les exigences futures sur les bâtiments à énergie positive. La phase de monitoring qui se poursuivra en 2012 permettra d'optimiser la régulation et de confirmer la performance sur une année du système. Parallèlement, sera validée l'étude technico-économique basée sur les résultats de simulation pour connaître la rentabilité économique réelle de ce concept. D'ores et déjà, les premiers calculs comparatifs montrent un avantage croissant avec la taille des bâtiments et/ou des besoins énergétiques. La valorisation commerciale et industrielle des acquis de ce programme se fera à partir de la création d'une gamme de solutions qui seront mises en œuvre dans des démonstrateurs installés sur des typologies de bâtiment différentes. La conception du système se veut modulaire et basée sur l'assemblage de "briques composants" standards disponibles sur le marché. ■ 34-36

Rôle des partenaires

ARMINES-CEP : rôle de coordination du projet PACAirPV, modélisation, simulation, aide à la conception et étude de cas.

CIAT : fourniture des composants optimisés, définition de l'architecture hydraulique, régulation du système complet.

Cythelia : étude des systèmes BIPV, choix de ceux favorisant le PV/T, maîtrise d'œuvre du bâtiment démonstrateur, installation et suivi du prototype.

CEA-INES : test de la pompe à chaleur sur banc d'essais, élaboration et mise en place du monitoring du démonstrateur, participation au suivi et à l'optimisation du démonstrateur.

CVC
CHAUFFAGE
VENTILATION
CONDITIONNEMENT D'AIR
LA REVUE DES CLIMATICIENS
BIMESTRIEL
ABONNEZ-VOUS !
Contactez Climagora Promotion - AICVF **tél.** 01 53 04 36 10