



Le site pilote du projet Opera.

Gestion prédictive des pompes à chaleur

Réduction des coûts énergétiques des bâtiments collectifs | Le projet Opera a démontré qu'une gestion prédictive des pompes à chaleur permettait de réduire de 11 % les coûts d'électricité d'un immeuble résidentiel rénové doté d'une installation photovoltaïque et de trois pompes à chaleur. Une approche transposable à grande échelle pour accélérer la décarbonation.

TOMASZ GORECKI, YVES STAUFFER

La Suisse s'est fixé des objectifs ambitieux pour un approvisionnement sûr et renouvelable en électricité : produire 35 TWh d'énergie non hydraulique d'ici 2035 et 45 TWh d'ici 2050, et ce principalement grâce au photovoltaïque (PV). En 2024, le PV produisait déjà 6 TWh d'électricité, soit 10 % de la production suisse annuelle. Pourtant, un potentiel de 67 TWh reste encore inexploité. La majorité de cette production devra

provenir des toitures, le potentiel pour les installations au sol étant limité.

Les logements collectifs anciens, construits pour la plupart avant l'an 2000, constituent un terrain stratégique pour la décarbonation suisse. Leurs toitures dépassent souvent 200 m², ce qui permet d'installer des systèmes PV d'une puissance nominale supérieure ou égale à 20 kW. Leur rénovation représente donc une priorité pour atteindre les objectifs climatiques.

Un levier indispensable, mais encore sous-exploité

Parallèlement, les pompes à chaleur (PAC) sont devenues un pilier de la décarbonation du chauffage. En 2022, elles équipaient 19 % des bâtiments suisses, contre seulement 5 % en 2000. Dans les constructions récentes, elles sont retenues dans 75 % des cas. En revanche, leur adoption reste limitée à 12 % dans les immeubles collectifs, où les contraintes techniques sont plus

fortes: besoin de plusieurs PAC par bâtiment, espace réduit par rapport aux anciennes chaudières, nuisances sonores en zone urbaine, etc.

Pour que leur déploiement soit économique et durable, la gestion des PAC doit être optimisée. Pour ce faire, trois leviers sont essentiels: il s'agit, premièrement, de coordonner leur fonctionnement avec la production PV, deuxièmement de maximiser leur efficacité en fonction des conditions extérieures et des températures de consigne et, troisièmement, d'utiliser l'inertie thermique du bâtiment pour le stockage de chaleur, plus efficace que les ballons d'eau, trop limités.

Or, les régulateurs de PAC actuels échouent à répondre à ces besoins. Les courbes de chauffe traditionnelles ignorent la production solaire et la distribution de chaleur, tandis que les stratégies « simples » d'autoconsommation dégradent le coefficient de performance saisonnier (seasonal coefficient of performance, SCOP) des PAC en augmentant inutilement les températures [1]. D'où la nécessité d'un pilotage plus intelligent.

Anticiper pour mieux consommer

Le système de gestion de l'énergie (energy management system, EMS) mis en place dans le projet Opera repose sur une stratégie de contrôle prédictif (model predictive control, MPC) des PAC. Celui-ci intègre les prévisions météorologiques afin d'anticiper la demande de chaleur et la production photovoltaïque. Grâce à un modèle physique du bâtiment et des PAC, combiné aux signaux tarifaires de l'électricité, un algorithme d'optimisation calcule la séquence de fonctionnement idéale des PAC (figure 1). La stratégie est recalculée toutes les 15 min pour s'adapter aux nouvelles informations.

Les paramètres des PAC sont issus des données constructeurs, tandis que le modèle du bâtiment s'ajuste automatiquement aux variations saisonnières. Le projet a permis d'améliorer la représentation de la dynamique du circuit de chauffage et du comportement des PAC en charge partielle, garantissant ainsi une optimisation réaliste. Cette stratégie est désormais intégrée au produit Soleco Optimizer et prête à être déployée dans d'autres bâtiments.

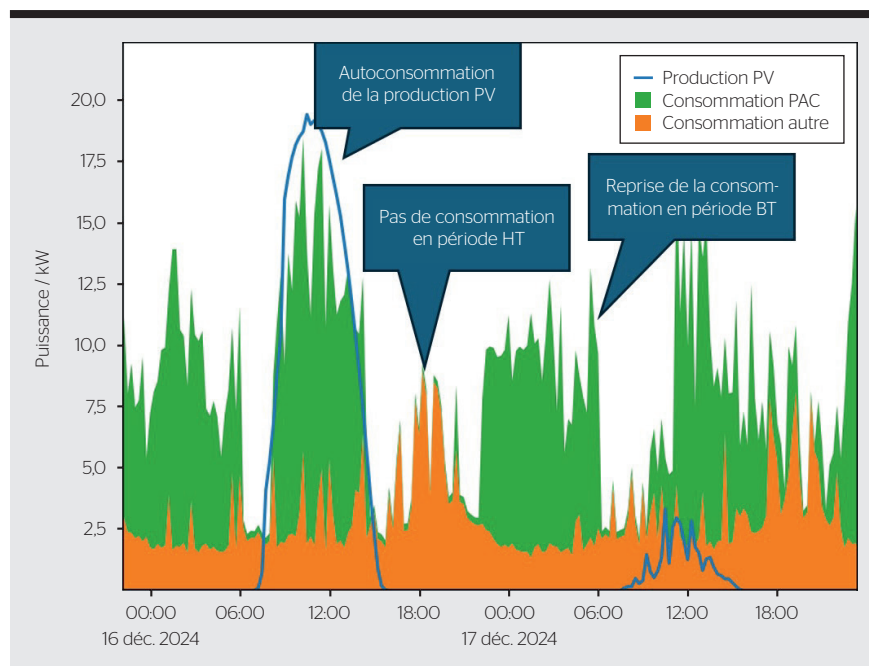


Figure 1 Exemple concret d'enclenchement intelligent des pompes à chaleur en mode Opera, favorisant l'autoconsommation de la production PV ainsi que la consommation pendant les périodes de bas tarif (BT).

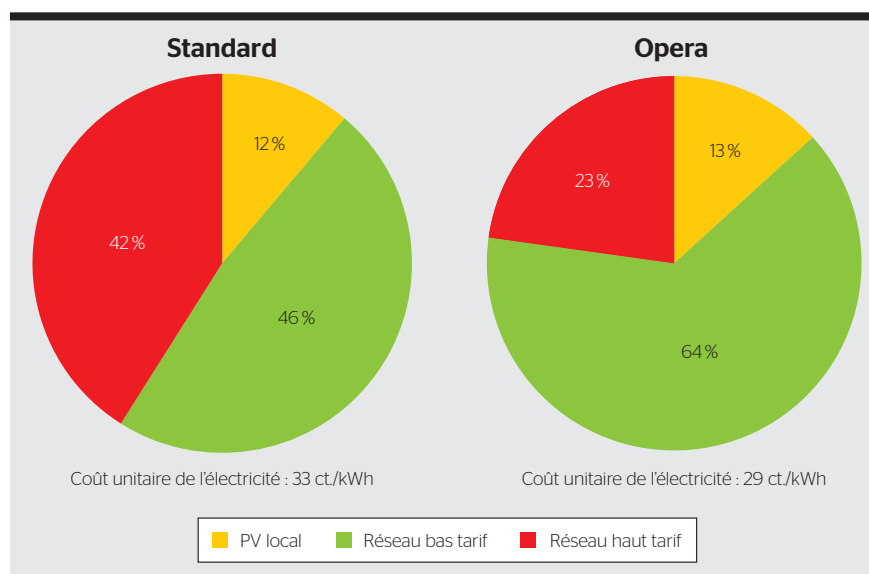


Figure 2 Comparaison de l'origine de l'électricité et coûts résultants.

Dépasser les limites des contrôleurs traditionnels

Intégrer les PAC dans une gestion énergétique avancée n'est pas trivial. Les contrôleurs standards offrent rarement une interface ouverte et flexible, et ils fonctionnent généralement de manière indépendante des vannes de distribution.

Deux innovations majeures ont permis de dépasser ces limites. D'une part, un contrôle des PAC par modulation de puissance a été mis en place grâce aux interfaces modernes des pompes et à la

collaboration du fournisseur. Cette avancée a permis de définir une interface de commande standardisée, alignée sur le modèle SmartGridready suisse. D'autre part, l'installation de thermostats connectés (Loxone) a rendu possible une modulation des consignes de température intérieure d'un degré pour le chauffage et d'un demi-degré négatif pour le rafraîchissement par rapport aux consignes des occupants. Ceci permet de charger le bâtiment de chaleur ou de froid au

moment opportun. Cette flexibilité, imperceptible pour les usagers, ouvre de nouvelles possibilités de transfert énergétique optimisé dans le bâtiment.

Des économies de 11 % sur un site pilote

La stratégie Opera a été déployée lors de la rénovation d'un immeuble résidentiel locatif de 20 appartements à Neuchâtel (1700 m² répartis sur six étages). Jusqu'en 2023, le chauffage et l'eau chaude sanitaire (ECS) reposaient sur une chaudière à mazout, avec une consommation annuelle de 171 MWh pour le chauffage et de 50 MWh pour l'ECS. Ce système a été remplacé par deux PAC air-eau réversibles de 20 kW chacune et une PAC sur air extrait (c'est-à-dire qui utilise l'énergie contenue dans l'air vicié extrait de l'habitation) dédiée à l'ECS. En parallèle, des panneaux PV d'une puissance nominale de 30 kW ont été installés en toiture et en garde-corps (figure de titre).

Un suivi expérimental, basé sur un concept de mesure avancé conçu par la Haute école spécialisée de la Suisse orientale (OST), a permis de comparer en conditions réelles la gestion Opera à une régulation standard en alternant ces

deux stratégies toutes les deux semaines pendant une saison de chauffe. Résultat : avec la gestion Opera, le coût unitaire de l'électricité utilisée par les PAC a diminué de 11,5 %, sans augmentation de la consommation totale (figure 2). Ce gain repose en grande partie sur l'utilisation intelligente du stockage thermique pour déplacer la consommation vers les heures bas tarif, et non sur une amélioration de l'autoconsommation. En effet, dans ce type de bâtiment, le potentiel d'amélioration de l'autoconsommation est structurellement limité. En régulation standard, 70 % de la production PV sont autoconsommés entre octobre et février, mais ceci ne couvre toutefois que 13 % de la consommation. Même si la gestion Opera a permis de porter l'autoconsommation à 78 %, cela ne se traduit que par une réduction des coûts de 1 à 2 %. L'essentiel de l'économie provient donc de l'optimisation tarifaire.

Conclusion

Le projet Opera démontre qu'un pilotage prédictif des PAC peut générer des économies substantielles, de l'ordre de 11 % en conditions réelles, tout en préservant le confort des occupants. Ces résultats confirment que, dans les bâti-

ments collectifs rénovés, le véritable levier d'efficacité ne réside pas uniquement dans l'autoconsommation, mais bien dans une gestion intégrée et intelligente de l'énergie.

Cette approche, désormais intégrée dans une solution commerciale, est reproductible et ouvre la voie à une adoption plus large dans le parc immobilier suisse. Elle contribue ainsi directement aux objectifs nationaux en matière de décarbonation et à une transition énergétique pragmatique et durable.

Référence

- [1] D. Zogg, H. Gysin, D. Zimmerli, «Innovative Eigenverbrauchs-optimierung für Mehrfamilien-Arealüberbauung mit lokaler Strombörse», rapport final de la phase 1 du projet SI/501500 (OFEN), 30.11.2020.

Auteurs

D^r **Tomasz Gorecki** est senior R&D engineer au sein du groupe Solutions digitales pour l'énergie du CSEM.
→ CSEM SA, 2002 Neuchâtel
→ tomasz.gorecki@csem.ch

D^r **Yves Stauffer** est project manager au CSEM.
→ yves.stauffer@csem.ch

Les auteurs remercient l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) ainsi que le Service de l'énergie et de l'environnement du canton de Neuchâtel (SENE) pour le soutien financier au projet Opera au travers du programme pilote et de démonstration, ainsi que la Caisse de pensions de la fonction publique du canton de Neuchâtel (CPCN) pour la mise à disposition du site pilote pour le projet.

IN KÜRZE

Prädiktive Steuerung von Wärmepumpen

Senkung der Energiekosten von Mehrfamilienhäusern

Ältere Mehrfamilienhäuser sind ein strategischer Bereich für die Dekarbonisierung. Ihre Dächer sind oft grösser als 200 m², was die Installation von PV-Anlagen mit einer Nennleistung von über 20 kW ermöglicht. Wärmepumpen werden dort jedoch selten eingesetzt, da oft mehrere pro Gebäude nötig sind. Damit ihr Einsatz wirtschaftlich und nachhaltig ist, muss ihre Steuerung optimiert werden, indem ihr Betrieb mit der PV-Produktion koordiniert, ihre Effizienz entsprechend den Aussenbedingungen und den Solltemperaturen maximiert und die thermische Trägheit des Gebäudes für die Wärmespeicherung genutzt wird. Die aktuellen Regelungen für Wärmepumpen werden diesen Anforderungen jedoch nicht gerecht.

Im Projekt Opera wurde ein Wohngebäude mit 20 Wohnungen in Neuenburg renoviert und mit einem Energiemanagementsystem ausgestattet. Bei der Renovation wurden zudem zwei reversible Luft-Wasser-Wärmepumpen mit jeweils 20 kW, eine Abluft-Wärmepumpe für die Warmwasseraufbereitung sowie PV-Module mit einer Nennleistung von 30 kW installiert. Für das Projekt wurde einerseits eine Leistungssteuerung der Wärmepumpen eingerichtet und andererseits vernetzte Thermostate installiert,

um die Raumtemperatur beim Heizen um ein Grad höher als die Vorgaben der Bewohner und beim Kühlen einen halben Grad tiefer zu ermöglichen, damit das Gebäude zum richtigen Zeitpunkt mit Wärme oder Kälte versorgt werden kann.

Das prädiktive Steuerungssystem berücksichtigt Wetterprognosen, um den Wärmebedarf und die PV-Produktion zu antizipieren. Mit einem physikalischen Modell des Gebäudes und der Wärmepumpen in Kombination mit Strompreissignalen berechnet ein Optimierungsalgorithmus alle 15 Minuten die ideale Betriebssequenz der Wärmepumpen. Im Rahmen einer experimentellen Überwachung wurde das Opera-System unter realen Bedingungen mit einer Standardregelung verglichen, wobei diese beiden Strategien während einer Heizperiode alle zwei Wochen abgewechselt wurden. Ergebnis: Mit dem Opera-Management sanken die Stromkosten der Wärmepumpen um 11,5 %. Dieser Gewinn beruht im Wesentlichen auf der intelligenten Nutzung der Wärmespeicherung, um den Verbrauch auf Zeiten mit niedrigen Tarifen zu verlagern, und nicht auf einer Verbesserung des Eigenverbrauchs. Dieser Ansatz wurde nun in eine kommerzielle Lösung integriert.