



Chapitre d'actes

2020

Accepted version

Open Access

This is an author manuscript post-peer-reviewing (accepted version) of the original publication. The layout of the published version may differ .

Pompes à chaleur air-eau en remplacement d'une chaudière dans un immeuble résidentiel collectif non rénové

Montero Dominguez, Omar; De Sousa Fraga, Carolina; Callegari, Simon Augustin; Hollmuller, Pierre

How to cite

MONTERO DOMINGUEZ, Omar et al. Pompes à chaleur air-eau en remplacement d'une chaudière dans un immeuble résidentiel collectif non rénové. In: 26. Tagung des BFE-Forschungsprogramms «Wärmepumpen und Kälte». BFH Burgdorf, Suisse. [s.l.] : [s.n.], 2020.

This publication URL: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:136507>

Omar Montero D., Carolina Fraga, Simon Callegari*, Pierre Hollmuller, Université de Genève

Pompes à chaleur air-eau en remplacement d'une chaudière dans un immeuble résidentiel collectif non rénové

Résumé

À Genève, les émissions de CO₂ sont principalement liées à la fourniture de chaleur pour les bâtiments, en particulier dans les immeubles résidentiels collectifs (IRC). Dans les zones urbaines denses, où l'air est la seule source d'énergie renouvelable disponible, les pompes à chaleur air-eau (PAC) pourraient contribuer à réduire les émissions et à remplacer les systèmes de chauffage à base de combustibles fossiles. Cette étude porte sur l'analyse d'un bâtiment MF de 1972 (4'047 m² de surface chauffée), non rénové, dont l'approvisionnement en chaleur fossile a récemment été remplacé par deux PAC air-eau industrielles (2 x 140 = 280 kW). Sur la base d'une campagne de mesure détaillée couvrant 15 mois de fonctionnement, les principaux résultats montrent que le système PAC a pu couvrir la totalité de la demande de chaleur, à l'exception d'une brève panne. Grâce à l'optimisation de la régulation du système et au choix d'utiliser une seule PAC en été, le COP_{sys} est passé de 1.3 au début à 3.4 pendant l'été dernier. Sur la base de ces dernières performances, nous avons estimé que le SPF pourrait atteindre une valeur annuelle de 2.3 (au lieu de la valeur mesurée de 1.9).

Mots clés : pompe à chaleur air-eau, résidentiel collectif, rénovation, mesure in situ, bilan énergétique, écart de performance.

* Auteur correspondant. Tél.: +41 22 379 0646. E-mail: simon.callegari@unige.ch.

Nomenclature

COP_{pac}	coefficient de performance de la pompe à chaleur
COP_{sys}	coefficient de performance du système, y compris l'électricité auxiliaire associée
ECS	eau chaude sanitaire
E_{pac}	consommation électrique de la pompe à chaleur
E_{sys}	consommation d'électricité de la pompe à chaleur et des auxiliaires
PAC	pompe à chaleur
Q_{pac}	production de chaleur de la pompe à chaleur
SPF	facteur de performance saisonnier (valeur annuelle ou saisonnière)
ΔT_{pac}	différence de température entre la source de chaleur HP et la température du puits

1. Introduction

1.1. Contexte et enjeux

A Genève, les émissions de CO₂ liées au secteur de l'énergie représentent 4.2 tonnes de CO₂ émises par habitant, dont 2.2 émises par le secteur du chauffage, 1.1 par le secteur des transports (hors aéroport) et 0.8 par le secteur de l'électricité [1]. Par conséquent, le principal potentiel de réduction des émissions de CO₂ se situe dans le secteur du chauffage, qui représente environ la moitié de la consommation finale d'énergie à Genève.

Même si les immeubles résidentiels collectifs ne constituent que 27% du parc immobilier genevois, ils représentent près de la moitié des surfaces chauffées du canton, soit 19.3 sur 40.9 millions de m² [2]. Environ la moitié de ces immeubles, qui ont été construits entre 1946 et 1980, ont aujourd'hui besoin d'être rénovés et présentent un fort potentiel d'économie d'énergie. Parallèlement à la réduction de la demande de chaleur du parc immobilier, notamment par la rénovation, la réduction des émissions de CO₂ peut également être obtenue en remplaçant les combustibles fossiles par des énergies renouvelables, en particulier par des systèmes de pompes à chaleur (PAC).

Cependant, bien que la part de marché des pompes à chaleur dans le secteur résidentiel suisse soit passée de presque zéro dans les années 1990 à environ 50 % aujourd'hui, seuls 10 % concernent le résidentiel collectif [3]. Cela s'explique par le fait que la mise en œuvre des systèmes de pompes à chaleur dans le résidentiel collectif est plus complexe que dans les bâtiments unifamiliaux [4], en particulier en raison : i) de la multiplicité des ménages, avec un pouvoir de décision dilué et des problèmes de gouvernance connexes, en particulier en régime locatif ; ii) des bâtiments souvent situés dans des zones urbaines très denses, avec un accès limité aux sources de chaleur renouvelables autres que l'air ; iii) si elles ne sont pas traitées avec soin, des émissions sonores qui peuvent poser problème ; iv) des parts plus élevées d'eau chaude sanitaire (ECS) dans la demande globale de chaleur et la température élevée qui y est associée, ce qui peut affecter la performance des pompes à chaleur.

1.2. Programme « éco21 / chaleur renouvelable bâtiments »

Dans le cadre du parc résidentiel collectif existant, et en particulier en zone urbaine dense, les pompes à chaleur air-eau sont souvent la seule solution pour une substitution conséquente du fossile par des énergies renouvelables. En effet, l'énergie solaire thermique n'est pas toujours possible (en raison de manque de place en toiture et/ou en chaufferie, ainsi que de restrictions liées à la protection du patrimoine) et l'énergie géothermique ou la biomasse ne sont pas toujours autorisées par la loi (en raison des règlements de protection de l'eau et de l'air).

Dans ce contexte, les Services Industriels de Genève (SIG) développent une série de projets de remplacement de systèmes de chauffage fossiles par des PAC air-eau. Ces projets, qui sont développés dans le cadre du portefeuille éco21 des SIG, sont mis en œuvre sous la forme de contracting énergétique [4].

Les défis sont importants : la demande de chaleur pour le chauffage est importante, il y a peu d'espace à disposition, les systèmes de distribution de chaleur sont vieux et les coûts d'investissement sont élevés. Par ailleurs, les températures de distribution élevées ne sont à priori pas forcément compatibles avec un objectif de bonne performance sur pompe à chaleur air-eau.

L'un des principaux défis techniques est lié à l'indisponibilité des pompes à chaleur air-eau spécialement conçues pour la résidentiel collectif. En effet, la plupart des PAC résidentiels ont actuellement une capacité inférieure à 30 kW et sont adaptés aux maisons individuelles, tandis que les PAC industrielles de plus grande capacité ne sont pas spécifiquement conçues pour être intégrés dans des bâtiments résidentiels, notamment en ce qui concerne les aspects sonores.

1.3. Objectif

Ce document vise à analyser l'un des projets pilotes du programme éco21, dans des conditions réelles d'utilisation. Après la description de l'étude de cas considérée, nous analysons les résultats d'une campagne de mesure détaillée, couvrant 15 mois de fonctionnement (juillet 2018 - septembre 2019). Un accent particulier est mis sur les diverses optimisations qui ont dû être faites afin d'atteindre une performance acceptable du système. Sur la base des résultats obtenus grâce à ce processus d'optimisation, nous estimons finalement un SPF optimisé, pour une année entière de fonctionnement.

2. Etude de cas

Situé à Genève et construit en 1972, le bâtiment en question dispose d'une surface chauffée totale de 4'047 m² (114 résidents). Bien que son enveloppe n'ait subi aucune rénovation, la chaudière à mazout existante (319 kW) a été remplacée par deux PAC industrielles air-eau (2 x 156 = 312 kW), avec un COP constructeur de 3.42 (pour 7°C côté évaporateur et 40/45°C côté condenseur) ainsi que quatre compresseurs scroll offrant quatre niveaux de capacité en fonction de la charge ou de la température de la source [5]. Avant le remplacement du système, la consommation de pétrole (énergie finale) pour la production de chauffage et d'eau chaude sanitaire (ECS) était de 158 kWh/m² par an, après correction climatique.



Figure 1. Bâtiment (à gauche) et pompes à chaleur industrielles air-eau en toiture (à droite).

La chaudière à mazout a été conservée en réserve pendant les premières années de fonctionnement, mais elle sera finalement démantelée. La distribution comprend deux ballons de stockage en parallèle pour l'ECS (1000 L chacun) et un autre pour le chauffage (1000 L).

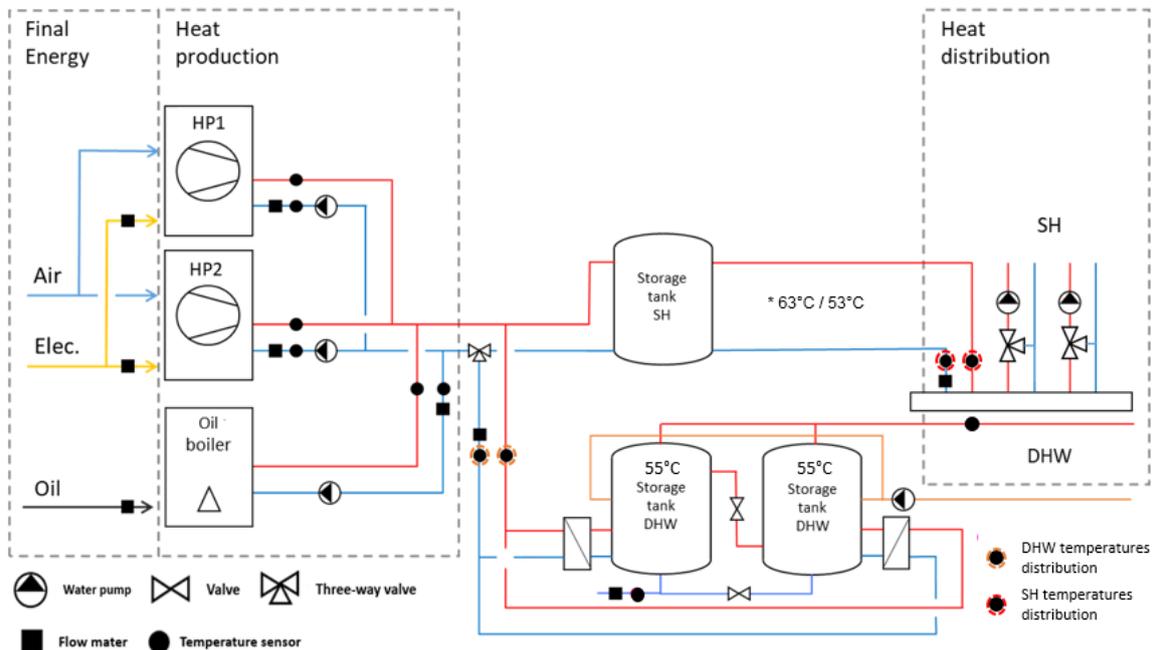


Figure 2. Système de production/distribution de chaleur (schéma simplifié).

3. Monitoring

L'instrumentation du système est illustrée sur la figure 2. Les données mesurées sont : i) l'électricité de chaque PAC, y compris l'électricité auxiliaire de la pompe de circulation côté condenseur ; ii) la production de chaleur de chaque PAC ; iii) la distribution de chaleur pour le chauffage (avant la vanne mélangeuse à trois voies) et pour l'ECS (à l'entrée du stockage) ; iv) la consommation d'ECS (à la sortie du stockage).

La campagne de mesure s'étend sur 15 mois (juillet 2018 - septembre 2019). Les données sont acquises en pas de temps de 5 minutes, et agrégées en valeurs horaires et journalières.

4. Résultats et discussions

4.1. Demande de chaleur

La demande annuelle de chaleur s'élève de 125 kWh/m² (sept. 2018 - août 2019), dont 47 % pour l'ECS (58 kWh/m²) et 53 % pour le chauffage (67 kWh/m²). La demande d'ECS correspond aux valeurs les plus élevées observées pour le résidentiel collectif à Genève [6]. D'autre part, bien que l'enveloppe n'ait pas été réaménagée, la demande de chauffage est bien inférieure à la moyenne genevoise des bâtiments des années 70 (101 kWh/m²) et correspond plutôt à la moyenne de la décennie 2000 [7].

La signature énergétique de l'ensemble de l'enveloppe indique une température de non-chauffage de 17°C et une demande de chauffage de 20 W/m² à une température extérieure de 0°C (Figure 3).

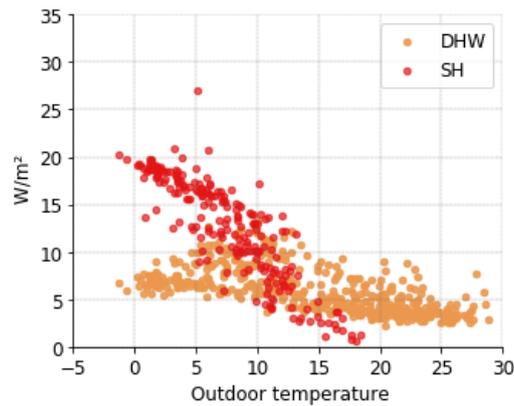


Figure 3. Demande quotidienne de chauffage (SH) et ECS (DHW) versus température météo.

La pointe de demande quotidienne de chaleur est d'environ 25 W/m^2 (Figure 4). En moyenne journalière, l'ECS varie entre 3 et 12 W/m^2 (été vs hiver), avec une augmentation inexplicite à partir de février 2019.

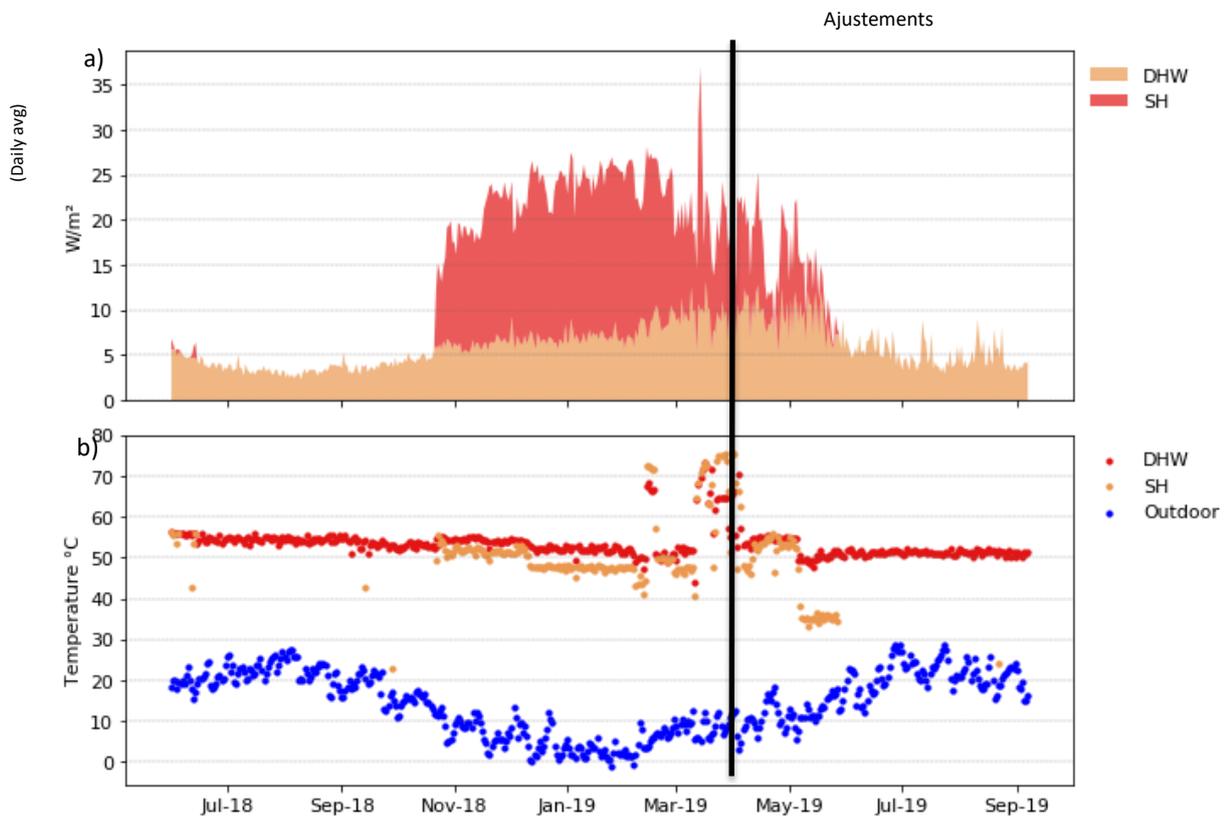


Figure 4. (a) Demande quotidienne de chauffage (SH) et ECS (DHW); (b) Températures quotidiennes de distribution et météo.

Les températures de distribution quotidiennes sont également représentées dans la Figure 4. La température de production d'ECS (charge du stock) a une valeur constante de $50 - 55^\circ\text{C}$, sauf pendant la panne de la PAC en février et mars 2019 (voir plus bas). Jusqu'en mai 2019, la température de chauffage (avant la vanne de mélange) était relativement constante et similaire à celle de l'ECS. Cela était dû aux valeurs de consigne internes de la PAC, qui ne tenaient pas compte de la courbe de chauffage définie au niveau de l'automate centralisée. Ce problème a finalement pu être identifié et résolu à la fin de la saison de chauffage (mai 2019), avec une

température de chauffage descendant à 35°C (pour une température extérieure supérieure à 10°C).

4.2. Production de chaleur

La production quotidienne de chaleur est représentée sur la Figure 5. La production de chaleur a pu être entièrement couverte par les deux PAC, sauf pendant la panne des PAC (février et mars 2019) où la chaudière à mazout a dû être mise en marche. Au cours du premier été (jusqu'en septembre 2018), les deux PAC ont fonctionné en parallèle. À partir de là, la priorité a été donnée à la PAC2 (maître), la PAC1 étant allumée pour les charges supérieures à environ 15 W/m². Lors des ajustements de mai 2019, la priorité a été donnée à la PAC1, et la PAC2 a été complètement éteinte pour la période estivale (pour des économies d'électricité sur le mode de veille inutile).

Il est à noter que la panne de PAC aurait pu être traitée plus rapidement si les techniciens locaux avaient été habitués/formés à ce type de systèmes de chauffage et s'ils avaient pu disposer de pièces de rechange, ce qui souligne l'importance de la formation professionnelle.

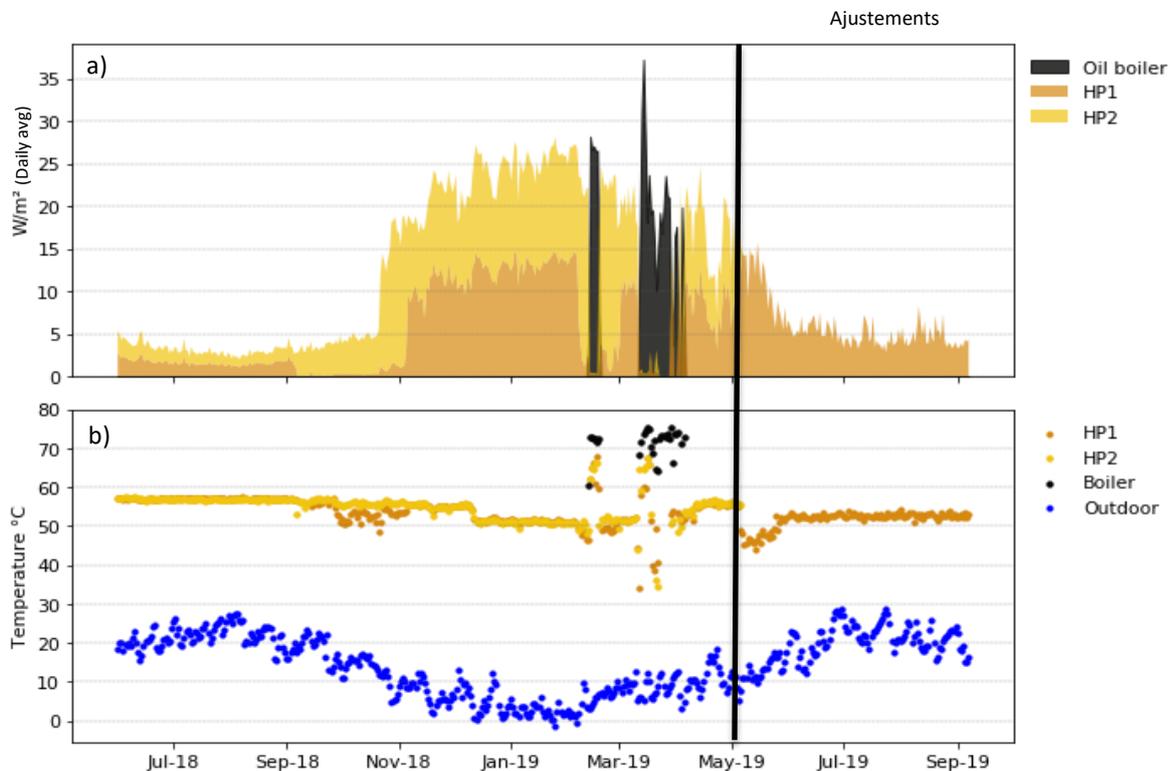


Figure 5. (a) Production quotidienne de chaleur ; (b) Températures de production et météo.

Comme indiqué précédemment, la température de production de la PAC est relativement constante jusqu'aux ajustements de mai 2019 (Figure 5). Par la suite, une courte baisse est observée en raison des ajustements de la courbe de chauffe, suivie par une remontée pour la seule production d'ECS pendant l'été. Pendant la panne de la PAC, la température de production de la chaudière à mazout est montée jusqu'à 70°C, ce qui est normal pour ce type de technologie.

4.3. Performances des PAC

Les indicateurs de performance de PAC sont basés sur la production de chaleur et la consommation d'électricité des PAC, et sont définis comme suit :

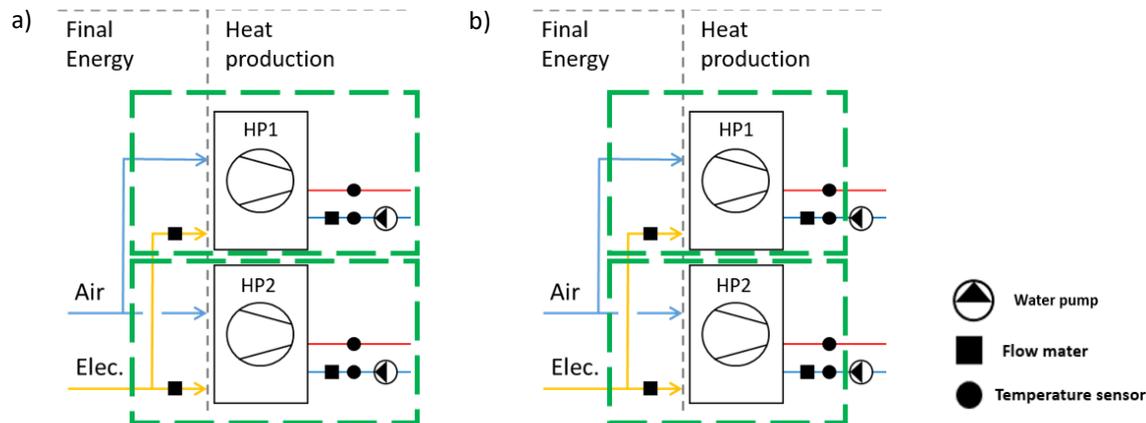


Figure 6. Périmètres pour (a) l'évaluation de la performance du système ; (b) la performance des pompes à chaleur (hors pompes de circulation).

- Performance horaire ou quotidienne des PAC (Figure 6-b) : rapport entre la production de chaleur et la consommation électrique des pompes à chaleur, hors consommations électriques auxiliaires :

$$COP_{pac} = \frac{Q_{pac}}{E_{pac}} \quad (1)$$

- Performance horaire ou quotidienne du système PAC (Figure 6-a) : Rapport entre la production de chaleur et la consommation électrique des pompes à chaleur, y compris pompes de circulation côté condenseur :

$$COP_{sys} = \frac{Q_{pac}}{E_{sys}} \quad (2)$$

- Performance saisonnière ou annuelle du système PAC : rapport entre la production de chaleur et la consommation d'électricité des pompes à chaleur, y compris pompes de circulation, pour une période donnée :

$$SPF = \frac{\sum Q_{pac}}{\sum E_{sys}} \quad (3)$$

Note : Comme les capteurs de température utilisés pour calculer Q_{HP} sont proches de la PAC, les pertes de distribution sont incluses dans la production de chaleur.

4.4. Performances du système

L'évolution des performances du système PAC au cours de la période de mesure est illustrée sur la figure 7, avec différents ajustements. L'été 2018 présente le plus faible COP_{sys} , inférieur à 1.5, malgré des températures de l'air élevées. Cela est dû à une activation constante de la pompe de circulation PAC1 (côté condenseur), même lorsque celle-ci était éteinte. La performance des PAC augmente à partir d'octobre 2018, lorsque le débit de circulation est ajusté à la production de chaleur. Cependant le COP_{sys} reste la plupart du temps inférieur à 2, en raison de la température constante de chauffage (non prise en compte de la courbe de chauffe). Après

mai 2019, le COP_{sys} augmente de manière significative (2.4 – 3.4) en raison de l'ajustement de la température de production de chauffage, du débit variable, des températures extérieures élevées en été, ainsi que du choix d'éteindre la deuxième PAC pendant la période estivale.

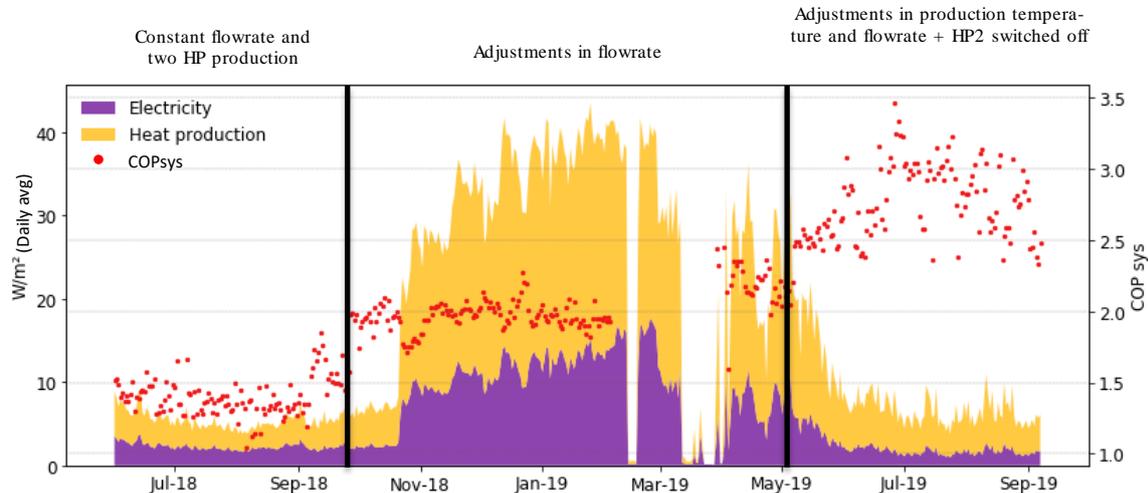


Figure 7. Production quotidienne de chaleur et consommation d'électricité des deux PAC, ainsi que performance du système COP_{sys} (note : la performance pendant la période de panne n'est pas prise en compte).

Comme attendu, le COP_{sys} quotidien diminue avec l'augmentation du ΔT_{pac} (Figure 8). Ainsi, sur l'hiver 2018-2019 et l'été 2019, le COP_{sys} varie entre 3.7 et 1.8 pour un ΔT_{pac} variant entre 20 et 50 K. Il est à noter que la performance plus faible pendant l'été 2018 est due à la forte consommation d'électricité induite par les débits de circulation constants, sans rapport avec la production de chaleur.

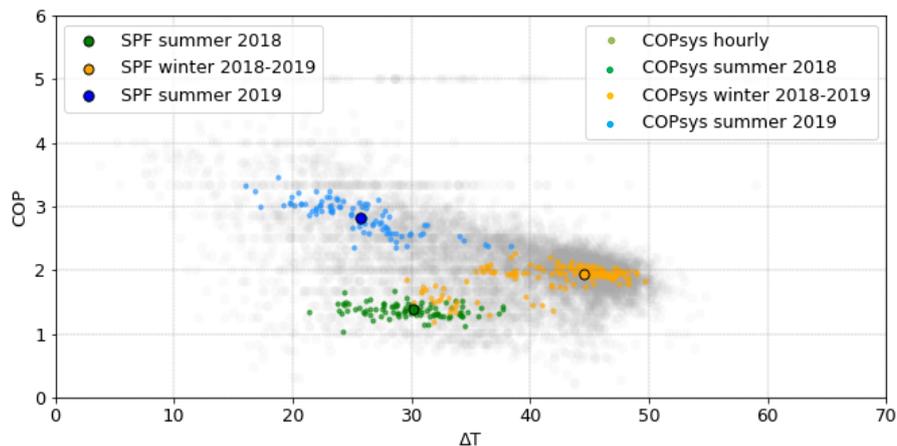


Figure 8. COP_{sys} et SPF en fonction de ΔT_{pac} , pour chaque saison (été : 1^{er} juin - 31 août ; hiver : 1^{er} septembre - 31 janvier).

4.5. Performances des pompes à chaleur

Dans cette section, la performance mesurée est comparée à celle annoncée par le fabricant. Dans le cas des valeurs fabricant, le COP_{pac} est donné pour un fonctionnement continu, à pleine puissance (quatre compresseurs) et sans consommation d'électricité auxiliaire. Afin de se rapprocher de ces conditions, nos données horaires ont été filtrées sur les heures où la PAC a travaillé pendant au moins 30 minutes (note : dans le cas de l'été 2018, le filtre a été réduit à 18 minutes, en raison de la capacité de puissance plus élevée que la demande, qui a induit des

durées plus courtes de production de chaleur). En outre, la consommation électrique des pompes de circulation (estimée à environ 3 kW chacune) a été déduite de la consommation électrique mesurée, en fonction du type de débit de chaque période (constant / variable).

Ainsi, le COP_{pac} mesuré (Figure 9) est plus élevé que le COP_{sys} (Figure 8). De plus, les valeurs de l'été 2018 sont maintenant alignées sur celles des périodes suivantes, ce qui met en évidence le fait que le faible COP_{sys} de cette période était dû au fonctionnement constant des pompes de circulation. Enfin, le COP_{pac} mesuré a la même tendance que celui du fabricant, avec des valeurs légèrement inférieures, comme fréquemment observé sur des mesures in situ [8, 9 et 10]. En conclusion, le faible COP_{sys} mesuré n'est pas dû à une défaillance des PAC, mais à un fonctionnement non optimal du système.

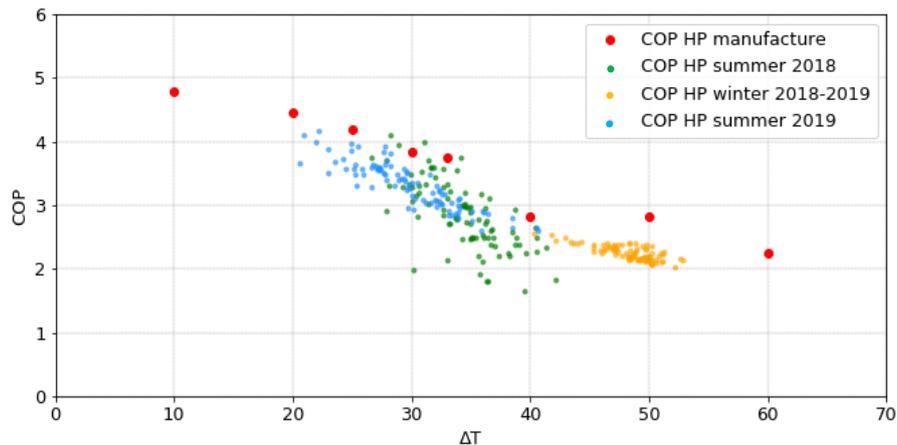


Figure 9. COP_{PAC} quotidien (par saison) et COP fabricant, en fonction de ΔT_{PAC} .

Cette analyse suggère en outre que les systèmes PAC devraient disposer d'un compteur d'énergie électrique dédié à la PAC (sans électricité auxiliaire), afin de vérifier la bonne performance en fonction des valeurs fabricant et d'aider à identifier les problèmes d'électricité auxiliaire.

4.6. Optimisation des performances du système

Comme on l'a observé ci-dessus, les optimisations du système en mai 2019 entraînent une nette augmentation du COP_{sys} (Figure 7). Compte tenu de cet effet, nous estimons finalement un SPF optimisé sur une année entière de fonctionnement (septembre 2018 - août 2019), sur la base des valeurs quotidiennes de production de chaleur, avec les hypothèses suivantes :

- La production de chaleur est assurée par les PAC tout au long de l'année (pas de panne des PAC).
- Le COP_{sys} quotidien est estimé par une régression quadratique des valeurs mesurée après optimisation (Figure 10), ce qui permet de calculer la consommation quotidienne d'électricité sur l'ensemble des jours de l'année.

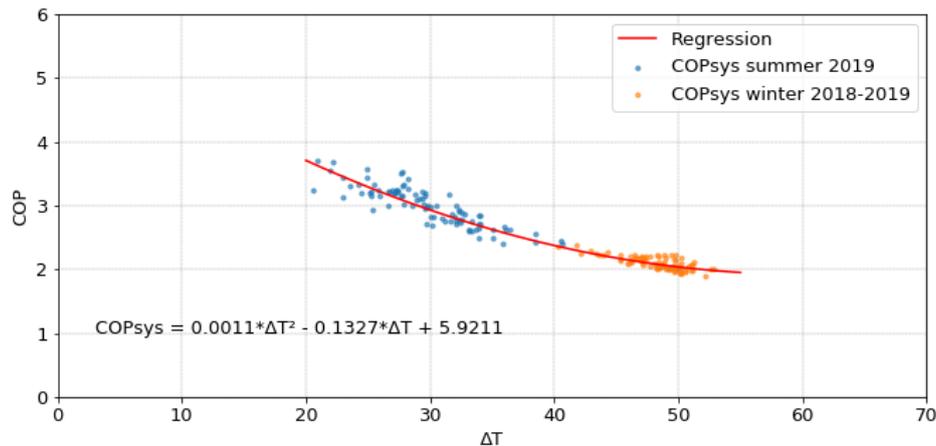


Figure 10. Régression quadratique du COP_{sys} en fonction du ΔT_{pac} sur la période optimisée (nov. 2018 - août 2019).

En conséquence (Figure 11), on observe que l'optimisation du système devrait permettre, pour l'année en question, d'améliorer le SPF d'une valeur mesurée de 1.9 à une valeur optimisée de 2.3. Etant donné que les PAC produisent cette fois-ci plus de chaleur (suppression de la période de panne), la consommation d'électricité reste par contre la même (54.3 au lieu de 54.7 kWh/m²). Finalement, il convient de noter que la régression de la figure 10 ne comprend que très marginalement l'effet de l'optimisation sur la température de production en mode chauffage (effective uniquement depuis mai 2019), suite à quoi le SPF de 2.3 pourrait encore s'améliorer.

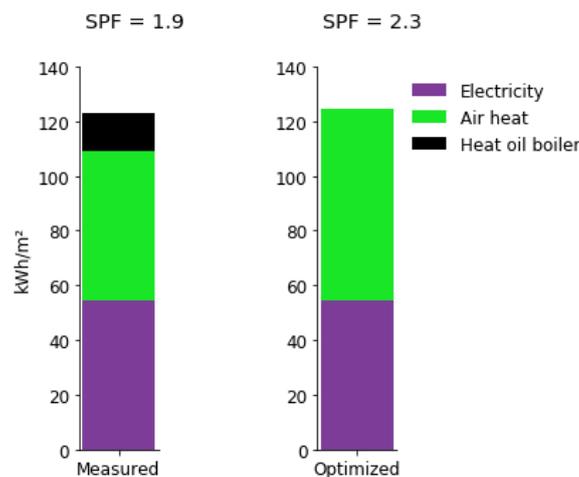


Figure 11. Mesure et optimisation de la production de chaleur (sept 2018 - août 2019)

5. Conclusions

Ce document porte sur un projet pilote d'une entreprise publique de fourniture d'énergie, visant le remplacement de systèmes de chauffage à base de combustibles fossiles par des pompes à chaleur air-eau, pour des immeubles résidentiels collectifs existants. Dans le bâtiment considéré (4'047 m²), la production de chaleur par une chaudière à mazout centralisée a été remplacée par deux pompes à chaleur industrielles à air (2 x 156 kW = 312 kW).

Une campagne de mesure détaillée couvrant 15 mois de fonctionnement (juillet 2018 - septembre 2019) montre que même dans un bâtiment existant et non rénové, une chaudière

fossile peut être remplacée par un système industriel de pompe à chaleur air-eau, sans diminution du confort thermique des locataires. Toutefois, sur la base du suivi effectué ici, des améliorations ont été apportées au système de régulation, afin d'améliorer la performance globale du système :

- i) Éviter de faire fonctionner en permanence les pompes de circulation PAC en l'absence de production, car elles ont une consommation électrique importante.
- ii) Garantir que les points de consigne PAC tiennent compte de la courbe de chauffe définie au niveau de la régulation centralisée.
- iii) Arrêter complètement la deuxième PAC pendant la période estivale, lorsqu'une seule PAC est capable de couvrir la totalité de la demande, afin d'améliorer le facteur de charge de cette dernière.

En ce qui concerne la consommation électrique et les SPF associés, la mise en œuvre de ces systèmes nécessite cependant une formation professionnelle adéquate, ainsi qu'une mise en service soignée. Finalement, nous menons actuellement un travail par simulation numérique afin d'explorer de possibles optimisations complémentaires (dimensionnement des éléments du système, schémas hydrauliques alternatifs, stratégie de régulation).

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les SIG pour le financement de cette étude et l'accès aux principales données de suivi, ainsi que les diverses parties prenantes (propriétaire du bâtiment, ingénieurs, techniciens, fabricant de PAC) pour leur participation au groupe de suivi mis en place pour cette étude de cas.

Références

- [1] L. QUIQUEREZ et al. : The role of district heating in achieving sustainable cities: comparative analysis of different heat scenarios for Geneva. In: The 15th International Symposium on District Heating and Cooling, Seoul (South Korea), [s.l.] : [s.n.], 2016. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:88423>
- [2] J. KHOURY : Assessment of Geneva multi-family building stock: main characteristics and regression models for energy reference area determination, 2016. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:88423>
- [3] CSD, IEA Annex 50, Task 1: Market overview - country report for Switzerland, 2017.
- [4] ROGNON et al. : Retrofitting fossil-based heating systems with air to water heat pumps in multifamily houses, 12th IEA Heat Pump Conference, 2017.
- [5] AERMEC, Reversible heat pumps high efficiency - Technical manual NRK 0200-0700, 2016. <https://aeroventic.com/heat-pumps-anl-aermec>
- [6] L. QUIQUEREZ : Décarboner le système énergétique à l'aide des réseaux de chaleur: état des lieux et scénarios prospectifs pour le canton de Genève, Université de Genève, Thèse, 2017. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:933>
- [7] J. KHOURY : Rénovation énergétique des bâtiments résidentiels collectifs: état des lieux, retours d'expérience et potentiels du parc genevois, Université de Genève, Thèse, 2014. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:4808>
- [8] C. DE SOUSA FRAGA et al : Large solar driven heat pump system for a multifamily building: Long term in-situ monitoring, In: Solar Energy, 2015, vol. 114, p. 427-439. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:48138>

- [9] MERMOUD, Floriane et al. Suivi énergétique du bâtiment tertiaire Polimmo, 5 route des Jeunes à Genève, rénové MINERGIE® et équipé de pompes à chaleur couplées à des sondes géothermiques - Aspects techniques et économiques, 2014. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:41178>
- [10] G. TORNARE et al : Rapport technique et de communication du projet d'assainissement Minergie-P des immeubles « La Cigale » (GE) – Chauffage par pompes à chaleur solaires couplées à des stocks à changement de phase, 2017. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:92770>