

CVC

CONDITIONNEMENT D'AIR

CHAUFFAGE

VENTILATION

LE DOSSIER DES CLIMATICIENS

www.aicvf.org

Janvier 2024

EXTRAIT
DU N° 922
DE CVC

HYBRIDATION EN COLLECTIF



Photo : GRDF

Hybridation en collectif

Dossier coordonné par Jean-Christophe Léonard et Pierre Picard (membres du Comité Communication)

Avec l'évolution des réglementations thermiques, dans le neuf avec la RE2020 comme dans l'existant avec le DPE et le décret tertiaire, l'hybridation des solutions gaz devient indispensable pour respecter les seuils réglementaires liés aux émissions de CO₂. Par hybridation, nous entendons dans ce dossier présenter des exemples de solutions collectives associant une (ou plusieurs) chaudière(s) gaz

naturel avec une (ou plusieurs) pompe(s) à chaleur. D'autres formes d'hybridation se développent telles que bois-gaz, bois-solaire, etc.

Ces solutions entraînent de nouvelles contraintes dans la conception des installations, qu'il est indispensable de prendre en compte pour éviter un mauvais fonctionnement de l'installation et des contre-références.

Les points d'attention dans la conception d'une PAC hybride collective en résidentiel

➔ La conception d'une chaufferie gaz est une étape aujourd'hui maîtrisée par l'ensemble des bureaux d'études, avec une méthode qui fait consensus auprès de la filière. CEGIBAT avait d'ailleurs largement participé à l'élaboration de ces règles de dimensionnement en réalisant un guide de conception de chaufferie ^[1].

L'intégration d'une PAC air-eau moyenne température dans une production collective nécessite de prendre en compte plusieurs points de vigilance selon le type d'équipement (moyenne vs haute température), la régulation, les usages (chauffage, ECS) et les objectifs de l'hybridation. L'article se focalise sur le résidentiel collectif.

Conditions de fonctionnement

Quel est le régime de température des émetteurs envisagé ?
En neuf mais encore plus en rénovation, il est indispensable de bien prendre en compte la température d'eau de production de la PAC.

Les pompes à chaleur de type « moyenne température » couvrent la plage de 45 à 60 °C en production d'eau chaude. L'AFPAC a publié une segmentation par tranches de températures [2] : pour les modèles de moins de 70 kW, il s'est vendu en 2022 plus « de 55 °C » que de « 55-65 °C » (165 006 vs 148 922). Avec 32 680 ventes, les PAC hautes températures (« HT » soit une production supérieure à 65 °C), représentent 11 % en volume des deux autres catégories.

La majorité des pompes à chaleur actuelles sont de type moyenne température, avec un départ à une température maximale de 55 °C pour une température extérieure allant au mieux jusqu'à -5 °C. En deçà de cette température, la plupart des PAC peuvent continuer de fonctionner (jusqu'à -20 °C dans la plupart des cas) mais la température de sortie au condenseur chute et ne peut plus être garantie à 55 °C (ou alors moyennant l'utilisation d'un appoint électrique).

L'association d'une chaudière avec une **PAC moyenne température** permet donc à l'installation de fonctionner à ces températures extérieures basses tout en étant performante puisque c'est la chaudière qui prendra le relais, évitant à la PAC de fonctionner sur son appoint électrique et à de faibles rendements.

Ce point est d'autant plus important en rénovation en rési-

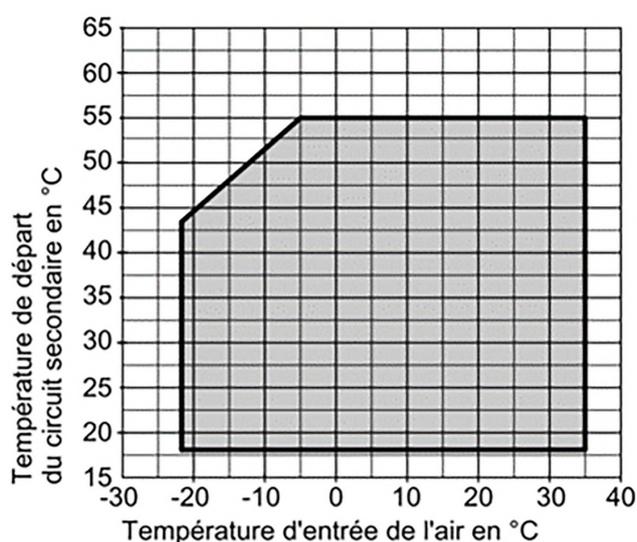


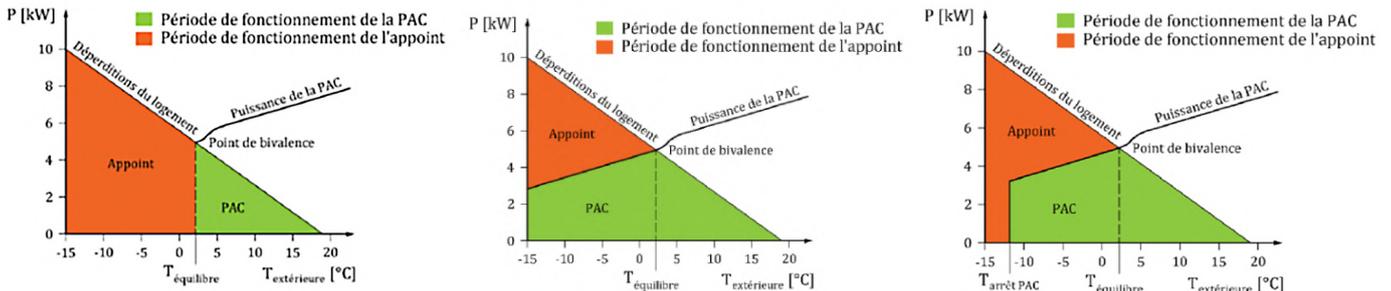
Figure 1 : Plage de fonctionnement d'une PAC air-eau moyenne température (sans appoint)

dentiel, où souvent les émetteurs existants sont des radiateurs à eau qui n'ont pas été dimensionnés à l'époque pour de la basse température et sont donc sur des régimes d'eau de 80/60 °C. Une PAC avec une température de départ chauffage de 80 °C à température extérieure de base, est incompatible économiquement en résidentiel. Sur le marché du neuf, les régimes d'eau des émetteurs restent aujourd'hui encore assez élevés (70/50 °C), puisqu'ils permettent d'avoir recours à des émetteurs de plus faible encombrement, et donc moins chers qu'un régime à plus basse température. D'autant qu'avec une chaudière gaz, on peut toujours faire une relance à plus haute température.

Un autre élément important dans le fonctionnement d'une PAC est **la nécessité d'avoir un débit constant au condenseur** pour assurer une différence de température d'environ 5 °C entre le départ et le retour de la PAC. Il est donc impératif de prévoir un organe de réglage sur le départ de la PAC pour assurer ce bon débit sinon la PAC se mettra en défaut.

➔➔➔

FIGURES 2A, 2B, 2C : MODES DE FONCTIONNEMENT DE LA PRODUCTION (EXTRAITS DE LA NF DTU 65.16)



Fonctionnement bivalent alternatif Fonctionnement bivalent parallèle Fonctionnement bivalent alternatif parallèle

>>> A puissance thermique égale, le débit d'eau pour le bon fonctionnement d'une PAC est 2 à 3 fois supérieur à celui d'une chaudière. Il faudra donc concevoir un équilibrage entre les deux types de production ou une capacité tampon adaptée (ex. réservoir stratifié multi-entrées).

Le mode de régulation de la PAC Hybride collective

Plusieurs modes de régulation de la PAC Hybride vont être possibles, impactant directement le dimensionnement de la puissance PAC (moyenne température) et de la puissance chaudière ainsi que le taux de couverture de chaque appareil.

On distingue les modes de fonctionnement suivants (voir figure 2) :

- **Bivalent alternatif** : la PAC fonctionne jusqu'à une certaine température extérieure ; en dessous de cette température, la PAC est mise à l'arrêt et une chaudière prend le relais (la PAC est utilisée annuellement pour le chauffage pour 40 à 70 %). Ce fonctionnement peut permettre de s'affranchir des périodes de dégivrage de la PAC si la T°C de bivalence est supérieure à 2-3 °C.
- **Bivalent parallèle** : la PAC fonctionne seule jusqu'à une certaine température extérieure (point de bivalence) ; en dessous de cette température, la PAC fonctionne avec une chaudière en relève (la PAC est utilisée annuellement pour le chauffage pour 70 à 90 %).
- **Bivalent alternatif parallèle** : ce mode est la fusion entre le mode bivalent parallèle et le mode bivalent alternatif ; en dessous de la température du point de bivalence, dans un premier temps, la chaudière et la PAC fonctionneront ensemble ; puis, progressivement, arrivé à une certaine température extérieure la PAC s'arrête complètement et la chaudière prend le relais à 100 %.

Quels sont les usages à hybrider ?

En fonction de la situation, plusieurs types de schémas hydrauliques peuvent être envisagés, comprenant un ou plusieurs ballons de stockage :

- **Hybridation des usages de manière séparée** : lorsque

les deux usages sont à hybrider, le choix peut être fait de coupler à la chaudière une PAC dédiée au chauffage, et une PAC dédiée au préchauffage de l'ECS. Cela permet de travailler sur la PAC dédiée au chauffage sur des températures d'eau plus basses et donc sur des plages de fonctionnement plus favorables à la PAC, proche de ses COP optimaux. Au contraire, la PAC dédiée au préchauffage ECS sera sur des températures départ de 55 °C, on pourra donc sélectionner une PAC haute température dédiée à cet usage. Cette solution nécessitera un nombre d'équipements plus important (2 PAC, plusieurs ballons de stockage), une emprise au sol plus conséquente et donc un investissement plus important.

- **Hybridation commune des usages chauffage et eau chaude sanitaire** : dans ce cas, le concepteur opte pour une PAC unique fonctionnant sur un ballon d'énergie. Le système aura un investissement moindre mais cela contraindra à sélectionner une PAC pouvant fonctionner sur un régime de température plus élevé, à moins que le choix soit fait de diminuer la température de départ de la PAC et augmenter le complément fait par la chaudière.

Quel est l'objectif de l'hybridation ?

Plusieurs objectifs peuvent être atteints à l'aide de la PAC hybride, qui auront un impact direct sur le dimensionnement de l'installation :

- **Dans un objectif de décarbonation** : il sera avantageux de laisser fonctionner la PAC quelle que soit la température extérieure puisque même avec des COP très faibles à basse température, l'utilisation de gaz (hors gaz vert) aura toujours un impact carbone plus important, en attendant la reconnaissance des gaz verts dans la réglementation (fonctionnement bivalent parallèle).
- **Dans un objectif économique** : pour réduire la facture énergétique totale, l'utilisation de la chaudière dès que les COP de PAC sont inférieurs au ratio kWh électrique/kWh gaz/ sera le plus opportun. Le fonctionnement des équipements sera alors priorisé en fonction de leur performance mais aussi en fonction du coût des énergies (fonctionnement bivalent alternatif ou alternatif parallèle).

- **Pour un optimum technico-économique** : la mise en place d'une PAC de petite puissance (PAC de puissance à 0/50 °C comprise entre 15 et 30 % des déperditions à la température de base) couplée à une chaudière permettra de réduire l'investissement mais aussi de couvrir 60 à 80 % des besoins chauffage et ECS du bâtiment par la PAC.

Le dimensionnement de l'installation : point d'attention sur la puissance de PAC installée

La première chose à faire est d'évaluer la puissance de chauffage maximale sur la base des déperditions du bâtiment, ainsi que les besoins énergétiques pour le chauffage et l'ECS. L'idéal est de récupérer les consommations réelles du bâtiment ou la monotone de chauffage, l'un des risques étant de repartir des puissances estimées à la conception du bâtiment et souvent très surévaluées par rapport à la réalité. Dans ce cas, la puissance de la PAC sera surdimensionnée, entraînant un surcoût à l'investissement, mais aussi un mauvais fonctionnement de la PAC sur des courts cycles et à faible charge, ce qui aura de mauvaises performances et une durée de vie raccourcie du compresseur.

Une fois la puissance de la PAC dimensionnée, il ne reste plus qu'à sélectionner la PAC chez le fabricant. Il ne s'agit donc pas de la puissance nominale affichée par les constructeurs qui est généralement donnée pour des conditions standardisées comme : A7/W35 où A correspond à la température de l'air (7 °C) et W la température de l'eau en sortie de condenseur (35 °C). Pour connaître les performances à 55 °C et pour des températures extérieures plus basses, **il est nécessaire d'analyser précisément les fiches techniques des produits et dans certains cas de demander directement une sélection au fabricant** car les données ne sont pas toujours disponibles. Certaines plages de fonctionnement affichées peuvent par exemple laisser penser qu'un modèle est capable de fournir de l'eau à 55 °C jusqu'à -5 °C extérieur, mais sans indiquer la puissance correspondante ou l'éventuel complément de puissance assuré par un appoint intégré.

L'hydraulique de l'installation modifiée

Pour l'installation hybridée, il conviendra de vérifier le schéma hydraulique du couplage des générateurs, entre autres : les capacités tampon et bouteilles de mélange/répartition, l'équilibrage des débits, le diamètre

des tuyauteries partagées entre chaudière et condenseur (impact des DTs sur les débits), le modèle de V3V (débit primaire plus élevé), etc.

Anticiper les futurs travaux de rénovation sur l'enveloppe

Si dans la théorie le plus judicieux est de travailler sur l'enveloppe du bâtiment et donc ses besoins énergétiques avant de travailler sur le vecteur énergétique, où dans la pratique, de nombreux maîtres d'ouvrage (notamment les copropriétés où la prise de décision est plus longue et plus complexe), pour des questions budgétaires, ne pourront envisager une rénovation globale au premier geste.

Il sera donc **important de prendre en compte les besoins futurs du bâtiment dans le dimensionnement de la solution hybride** afin de ne pas mettre en place une PAC trop puissante qui, pour les mêmes raisons que précédemment, sera surdimensionnée une fois l'enveloppe rénovée et conduira ainsi à une mauvaise performance de l'installation.

Exemple sur le bâtiment ci-dessous dont les déperditions avant travaux sont de 475 kW à la température de base, et qui seront divisées par deux après rénovation du bâti. La PAC hybride devra être dimensionnée sur les nouveaux besoins, en prenant 20 à 30 % de la puissance déperditivité du bâtiment à température extérieure de base (ce qui représente 10 à 15 % des besoins actuels).

Avec ce dimensionnement, la PAC couvre 40 % des besoins chauffage et ECS avant travaux, les chaudières gaz en place faisant le reste. Après travaux de rénovation de l'enveloppe, la PAC couvrira alors 75 % des besoins du bâtiment.

Ce dimensionnement permet de limiter l'investissement initial en installant des PAC de petite puissance et en conservant les chaudières existantes. Une fois la rénovation de l'enveloppe réalisée, les chaudières en place sauront moduler et s'adapter après la réduction de la puissance nécessaire.

>>>

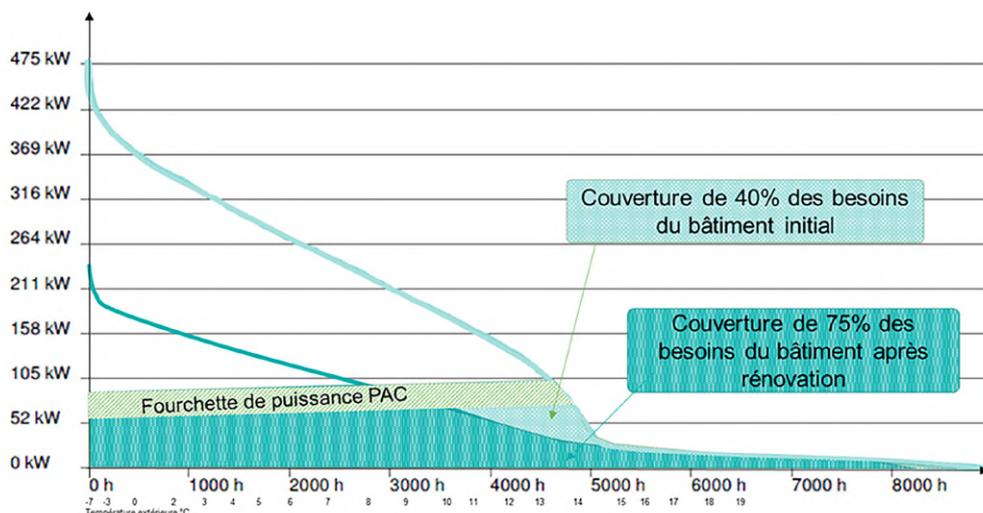


Figure 3 : Monotone d'un bâtiment avant/après rénovation et couverture de la PAC hybride

>>> La puissance électrique est-elle disponible sur le site ?

La mise en place d'une pompe à chaleur collective sur un site existant entraîne une hausse de la puissance électrique appelée sur le site. Dans certains cas, la puissance électrique disponible sur le site peut être limitée (réserve de puissance limitée, poste de transformation saturé, nouveaux usages liés à la mobilité, passage sur un abonnement supérieur à 36 kVA, etc.). **Ce point est à valider avec le distributeur d'énergie.** La solution hybride permet grâce à l'installation d'une PAC de petite puissance, de limiter cet impact, tout en couvrant jusqu'à 80 % des besoins thermiques. En effet, par rapport à une solution 100 % électrique, la puissance électrique appelée peut être divisée par 4.

Acoustique : attention à l'emplacement de l'unité extérieure

L'installation d'une pompe à chaleur s'accompagne forcément de la mise en place d'une unité extérieure sur le site : une attention particulière devra être apportée aux nuisances sonores générées par celle-ci en fonction de son emplacement (en toiture, en rez-de-jardin, en intérieur avec un gainage, etc.). **La réalisation d'une étude acoustique en amont** de l'étude permet de prendre en compte ces contraintes et de mettre en place, lorsque c'est techniquement possible, des mesures acoustiques (piège à son, caisson acoustique, etc.).

Là encore, l'hybridation permet par rapport à une solution 100 % PAC, de diminuer l'impact sonore puisque la puissance électrique installée peut-être divisée par quatre.

L'individualisation des charges

La répartition des charges collectives peut se faire au millième à condition de disposer de factures à des dates de relève (gaz et électricité de la PAC) suffisamment rapprochées. Cependant, **l'individualisation (i.e. par appartement) des charges de chauffage et d'eau chaude est un domaine où**

les services doivent encore se développer (à définir : architecture SI et télécoms, interfaces à bas coût, algorithmes de répartition, fréquence des relevés, portage de la facturation et du recouvrement, rendu aux clients, etc.).

Cas de la PAC haute température ?

Les premiers modèles de PAC haute température comportaient deux cycles étagés (ex. de fluides utilisés : R134a et R410a) pour produire de l'eau à +65 °C. Les unités mono-étagées sont dorénavant standards, utilisant des fluides tels que le R290 ou le R407c. Il sera nécessaire de revoir éventuellement les conditions d'implantation de la PAC (selon la sécurité du fluide -cf. la future FGas), voire de faire évoluer les recommandations de cet article (ciblant les PAC moyenne température).

Développements industriels en cours

Au moins huit constructeurs travaillent sur des offres de PAC hybride collective permettant de décarboner de 60 à 70 % par rapport aux émissions de CO₂ d'une solution 100 % gaz naturel. Ce sera le sujet d'un prochain article traitant différents aspects : dimensionnement puissance électrique, CO₂ évité, investissement, etc. **Le développement de l'hybridation en résidentiel collectif (et en tertiaire) ne fait que commencer !**

Bibliographie

[1] « Le dimensionnement des systèmes de production d'eau chaude sanitaire en habitat individuel et collectif », COSTIC, Guide Technique, Juin 2019

[2] « L'AFPAC dissipe les malentendus à propos des pompes à chaleur en rénovation », P. Poggi, BATIRAMA Actualités, 31/03/23.

Vincent Lallemand
Responsable Efficacité Energétique
GDRF/Cegibat :



Hybrider des chaufferies gaz par des pompes à chaleur : un compromis à trouver dans le dimensionnement

→ Décarboner le chauffage. En tertiaire, cet usage concerne 46 % des consommations toutes énergies tous usages (200 TWh/an). Celui-ci est à plus de 70 % issu des fossiles (60 % en résidentiel collectif). Réduire nos émissions carbone passera inévitablement par l'isolation du bâti. Mais les coûts élevés de ce geste et la nécessité d'une décarbonation rapide incitent à explorer des alternatives, comme l'hybridation des chaufferies par des pompes à chaleur.

Le groupe Décarbonation des Bâtiments d'EDF R&D développe un outil, pour l'hybridation des chaufferies existantes par pompes à chaleur, qui rend compte, au pas horaire, des performances constructeurs des PAC air/eau (puissance et COP). Des paramètres essentiels, parfois mal appréhendés, y sont décrits : dégivrages, performances à charge partielle (ref. EN1485) pour les machines non équipées de variation électronique de vitesse, ainsi que la consommation de la pompe qui irrigue le condenseur. Cas d'étude. Considérons un bâtiment collectif (situé dans le département 78) de 4800 m², chauffé au gaz (déperditions de 310 kW, soit 65 W/m²). La loi d'eau fixe la température de départ à 75 °C par -10 °C extérieur (retour 60 °C) et à 35 °C

par 15 °C. Ici, la température maximale de fourniture des PAC évaluées est de 65 °C. Notre réflexion ici ne concerne que l'usage chauffage. Nous testons alors différentes puissances de chauffage (P.chauf, par la suite) par incrément de 25 kW et observons 4 indicateurs : (1) la réduction annuelle de consommation finale de chauffage, (2) la baisse annuelle des émissions carbone, (3) le COP annuel (pompe incluse) et (4) la part du chauffage couverte par la PAC (météo trentenaire utilisée). La fig.1 représente l'évolution combinée de (1) en abscisses et (2) en ordonnées selon P.chauf. Les baisses de consommation finale et d'émissions carbone croissent, mais passé un seuil, un incrément de 25 kW produit nettement moins d'effet que le précédent. >>>

Evolution combinée des baisses d'énergie finale et des émissions GES selon la puissance condenseur (Ici Tmax PAC = 65°C ; loi d'eau = 75°C/-10°C)

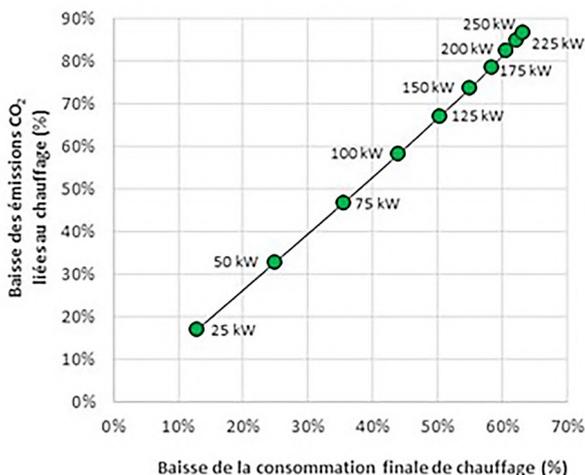


Fig.1 : baisses de la conso finale et des émissions de GES selon P.chauf

Evolution combinée du COP et du taux de couverture PAC selon la puissance condenseur (ici Tmax PAC = 65°C ; Loi d'eau = 75°C/-10°C)

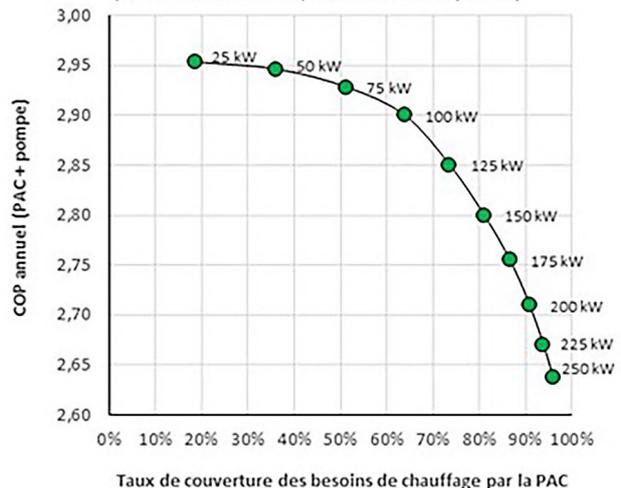


Fig.2 : COP et taux de couverture selon P.chauf

>>> La fig. 2 reprend le même formalisme pour (3) et (4). Quand P.chauf croît, le taux de couverture de la PAC augmente, certes, mais le COP annuel diminue. Pour illustrer les mécanismes sous-jacents, faisons appel à la fig.3. Celle-ci représente la distribution des besoins annuels de chauffage (courbe enveloppe rouge en kWh/an) selon la température extérieure (T.ext par la suite) par intervalle de 1 °C. Ici, pour l'exemple, l'aire verte indique la contribution d'une PAC de 25 kW. Ensuite, les différents pointillés montrent comment, à P.chauf croissante, la PAC contribue aux besoins de chauffage. Pour l'exemple, le COP d'une machine de 25 kW est représenté.

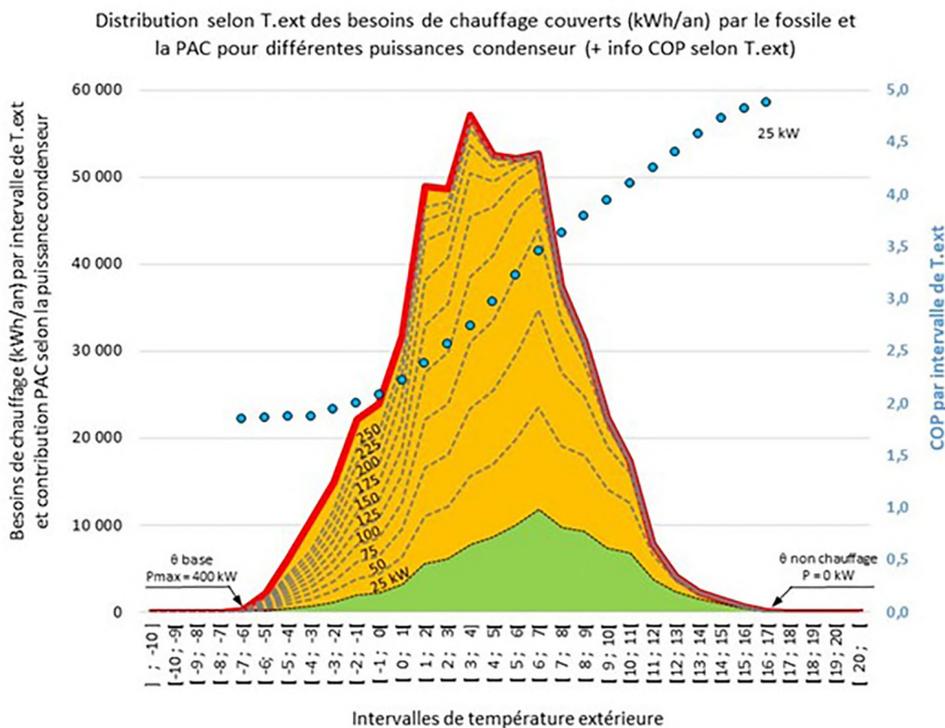


Fig. 3 : distribution selon T.ext des besoins de chauffage couverts (kWh/an) par le fossile et la PAC selon taille PAC

En demie-saison (partie droite de la distribution), quand P.chauf croît, les besoins sont couverts rapidement en totalité par la PAC (les pointillés épousent vite la courbe rouge). Ce sont effectivement des périodes où la puissance de chauffage est faible et où la P.chauf de la PAC augmente avec la T.ext.

Au cœur de l'hiver (partie gauche de la distribution), une fraction des besoins ne peut être couverte par la PAC. Les déperditions sont élevées (P.max : 400 kW) alors que la P.chauf de la PAC diminue avec T.ext (et les dégivrages). La température de départ dépasse aussi parfois la température de fourniture maximale de la PAC.

Mais surtout, une fois que l'augmentation de la P.chauf a permis d'aller chercher tous les besoins de demi-saison, le fait d'accroître encore la P.chauf va permettre, certes, de transférer plus de besoins vers la PAC, mais sous des T.ext où le COP est plus faible : l'augmentation de la P.chauf impacte

donc à la baisse le COP annuel. Par exemple, considérons deux P.chauf différentes, 100 et 200 kW et intéressons-nous à l'énergie que chacune fournit sous 5 °C (T.ext où le COP ici est inférieur à 3). Dans le cas 100 kW, 43 % de l'énergie annuelle fournie par la PAC se fera sous 5 °C, 54 % dans le cas 200 kW. La configuration à 200 kW aura donc un COP plus faible (2.7) que celle à 100 (2.9).

Quel niveau d'hybridation conseiller alors à ce client ? Rappelons que les clients tertiaires doivent respecter l'échéance 2030 du Dispositif Eco Energie Tertiaire (DEET) qui impose, soit une baisse de 40 % des consommations, soit l'atteinte d'un seuil de consommation en valeur absolue (kWh/m².an).

Dans le cas présent, sans rénovation du bâti d'ici 2030 (les CAPEX sur ce poste sont toujours importants...), l'installation d'une PAC de « seulement » 100 kW (un quart des déperditions), permet une baisse minimale des consommations finales de chauffage de 44 % et réduit de 58 % les émissions carbone. Le COP global et le taux de couverture PAC sont voisins de 2.9 et 64 %. Ce niveau d'hybridation permet d'atteindre, à moindre coût, l'échéance 2030 du DEET, du moins sur le poste chauffage, en ne nécessitant pas ici de renforcement électrique sur le poste de livraison du client.

En revanche, le client peut vouloir rénover son bâti, plus ou moins profondément. Observons comment justement cette profondeur de rénovation impacte la performance d'une installation hybridée.

Si les émetteurs sont conservés, avec des déperditions plus faibles, les températures aller et retour du réseau de chauffage seront modifiées. Appelons Td1 et Tr1, la température départ (75 °C dans l'exemple) et celle de retour (60 °C) avant travaux de ré-

novation (index 1) et Td2 et Tr2, ces mêmes températures après rénovation (index 2). La place nous manque pour en faire la démonstration complète ici, mais il existe une relation pour passer du couple Td1, Tr1 à Td2, Tr2 selon le rapport [déperditions après / déperditions avant]. Il s'agit de rendre compte du caractère non linéaire de la puissance dissipée par un radiateur selon le régime d'eau ($P_2 = P_1 \cdot (DT_2 \log / DT_1 \log) \cdot 1.3$). Nous privilégions ici la présentation des résultats sous forme d'abaque (cf. fig. 4) plutôt que par les équations.

Considérons les températures de départ et de retour, avant travaux, de 75 et 60 °C par -10 °C. Si la rénovation réduit de 20 % les déperditions, le rapport [déperditions après / déperditions avant] est alors égal à 0.8. En partant des absisses et en remontant sur la droite iso Dép après / Dép avant = 0.8, nous déterminons les nouvelles températures de départ (66 °C) et de retour (54 °C), sous hypothèse de débit constant. Une rénovation très profonde ([Dép après / Dép avant] = 0.5, soit 31 W/m²) permet même d'abaisser les tem-

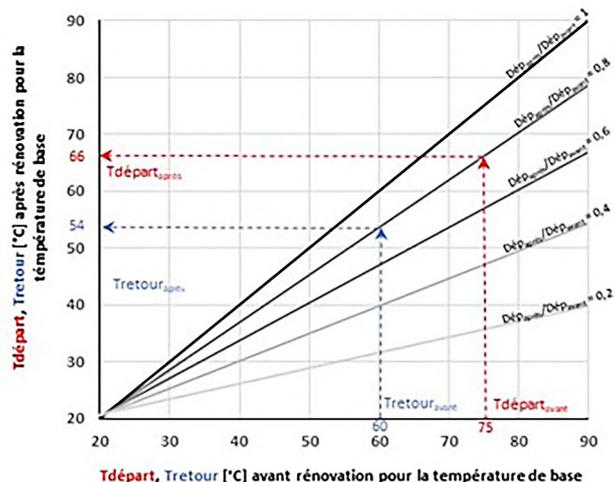
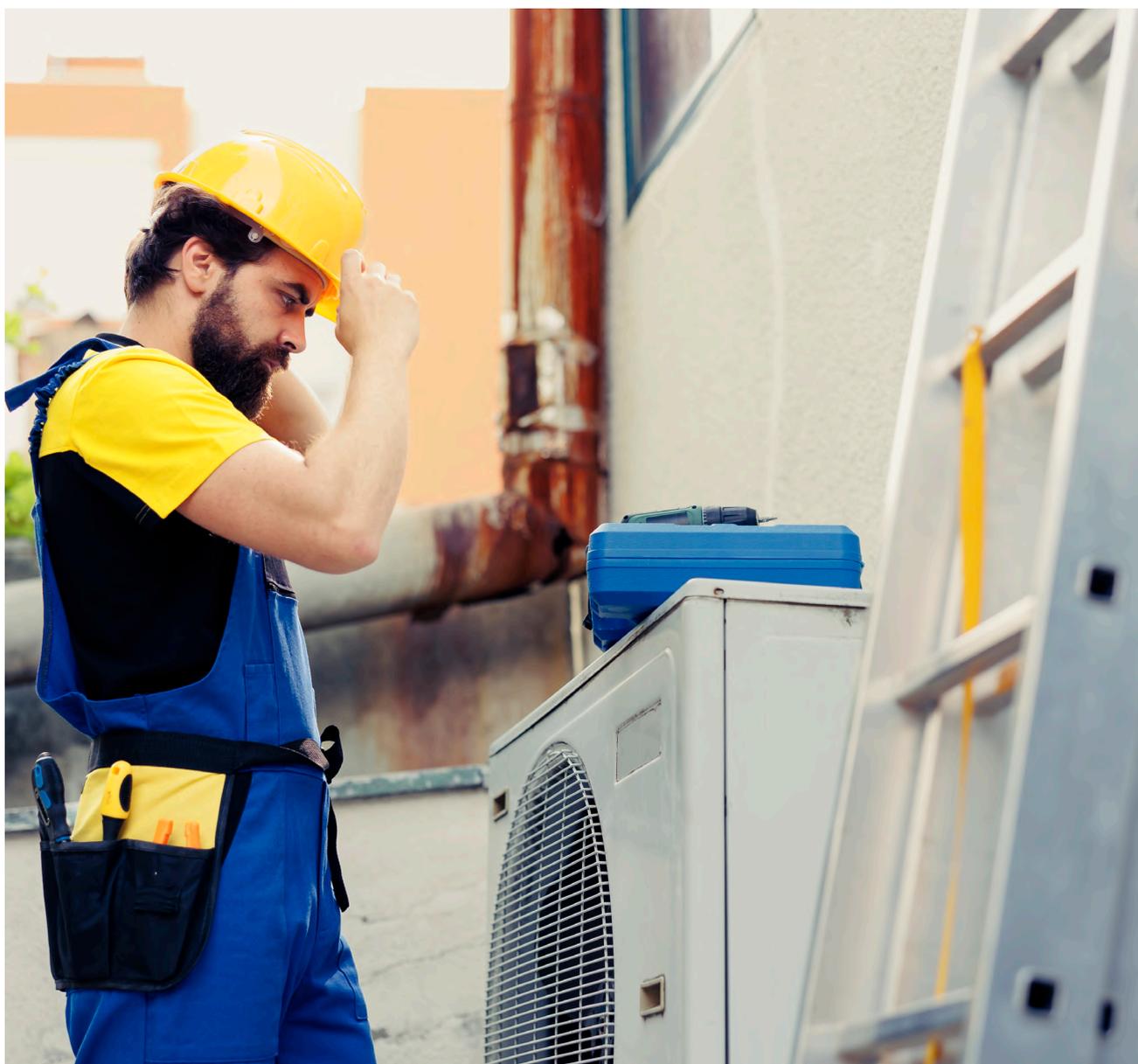


Fig. 4 : trouver la nouvelle loi d'eau selon celle de départ et la profondeur de la rénovation du bâti

températures de départ et de retour à 51.5 et 44 °C, en conservant les émetteurs, le réseau et la pompe de chauffage. Avec une rénovation profonde ($[\text{Dép après} / \text{Dép avant}] < 0.6$) impliquant une loi d'eau nettement abaissée, une transition 100 % PAC est envisageable avec une PAC moyenne température (55 °C) et des COP pouvant atteindre 3. En revanche, dans le cas étudié ici, le client devra vraisemblablement renforcer son alimentation électrique. Cela doit faire l'objet d'un chiffrage auprès du gestionnaire de distribution... Au travers des points évoqués dans cet article, on comprend, l'hybridation, couplée à une rénovation du bâtiment, offre un levier de décarbonation très important. Au-delà des considérations théoriques de dimensionnement, n'oublions pas, surtout, que le partage de nos retours d'expérience terrain sera essentiel pour le succès de ces futures opérations.

Jean-Christophe Léonard,
Ingénieur, EDF LAB les Renardières



→ SYSTÈMES HYBRIDES ▶ PAC ▶ RETOUR D'EXPÉRIENCE SUISSE

Grandes pompes à chaleur air/eau pour le remplacement de chaudières à combustible dans des bâtiments collectifs non rénovés

→ Le groupe Systèmes Energétiques de l'Université de Genève a mené deux retours d'expérience particulièrement bien documentés sur le remplacement des chaufferies à combustible par des PAC air/eau dans les bâtiments collectifs non rénovés. Deux systèmes sont présentés ici, monovalent et hybride.

Introduction

La Suisse, où 70 % des bâtiments fonctionnent encore aux combustibles fossiles, doit opérer une transition majeure vers les énergies renouvelables. Cependant, les pompes à chaleur (PAC), bien que courantes dans les bâtiments neufs, restent peu installées dans les constructions existantes, en particulier en résidentiel collectif. De plus, le manque de PAC air/eau d'une puissance supérieure à 50 kWh représente un obstacle. Actuellement, pour atteindre ces puissances, il y a deux options : une cascade de PAC de petites puissances, ou une machine industrielle de grande puissance.

Genève répond au défi de la décarbonation en lançant un vaste programme de remplacement des chaudières fossiles par des PAC, avec pour objectif la réalisation de 25 000 opérations sur les 15-20 prochaines années, équivalent à 1,6 GW de capacité et générant des économies annuelles de 580 000 tonnes de CO₂. Cet article analyse en détail deux projets pilotes de ce programme, menés par les Services Industriels de Genève (SIG) et le bureau d'ingénieurs CSD. Ces projets portent sur des systèmes PAC d'une puissance de plus de 100 kW, en mode monovalent et hybride, destinés à chauffer des bâtiments résidentiels collectifs non rénovés.

Description des projets

Système monovalent

Ce projet (fig.1) concerne un bâtiment de 1972, non rénové, avec 4047 m² de surface chauffée (7 étages), une demande de chauffage de 77 kWh/m².an et 55 kWh/m².an pour l'eau chaude sanitaire (ECS). En 2017, deux PAC air/eau industrielles (2 x 156 kWh) installées sur le toit, avec isolation acoustique, ont remplacé la chaudière à mazout. Chaque unité offre quatre niveaux de puissance et fournit de l'ECS à 60 °C pour éviter la légionellose.

Système hybride

Le bâtiment (fig.2) date de 1992, non rénové, avec 7563 m² de surface chauffée (7 étages), une demande de chauffage de 72 kWh/m².an et 30 kWh/m².an pour l'ECS. Six PAC air/eau de type résidentiel (6 x 34 kWh) ont été installées sur le toit, fonctionnant avec la chaudière à gaz existante (200 kWh). Les PAC couvrent 80 % de la demande annuelle de chaleur, limitée à 55 °C. Trois PAC sont dédiées prioritairement à la production d'ECS. La chaudière assure les différents apports nécessaires (charges et température).



Fig.1 : système PAC en monovalence : bâtiment (gauche) ; PAC air/eau en toiture, avec panneaux insonorisants (droite)



Fig.2 : système hybride : bâtiment (gauche) ; PAC air/eau de type résidentiel individuel en toiture (droite)

SYSTÈME	MONOVALENT	HYBRIDE
Type de bâtiment	Résidentiel	Mixte (résidentiel + commercial)
Année de construction	1972	1992
Surface chauffée	4047 m ²	7563 m ²
Production de chaleur, origine	Chaudière mazout (319 kWh)	Chaudière gaz (2 x 200 kWh)
Production de chaleur, neuf (1)	2 PAC air/eau (2 x 156 kWh)	6 PAC air/eau (6 x 34 kWh) chaudière gaz d'origine (200 kWh)
Demande de chauffage, mesurée	58 kWh/m ² .an	64 kWh/m ² .an
Demande de chauffage, normalisée (2)	77 kWh/m ² .an	72 kWh/m ² .an
Demande ECS (3)	55 kWh/m ² .an	30 kWh/m ² .an

(1) puissance nominale (entrée évaporateur : 7 °C, sortie condenseur : 45 °C)
 (2) saison de chauffage normalisée (2659 degrés-jours à 18°C/12°C)
 (3) inclus pertes de stockage et de distribution

Fig3 : caractéristiques des deux études de cas

Résultats

Système monovalent

La production de chaleur (2^{ème} année) atteint 113 kWh/m².an, avec un COP annuel de 2.3 (incluant les auxiliaires). La répartition est de 49 % pour l'ECS (y compris les pertes de stockage et de distribution) et 51 % pour le chauffage. Le

changement de système a réduit les émissions de 42 kg CO₂-eq/m².an en moyenne sur 7 hivers avec chaudière, à 34 kg eqCO₂/m².an. Malgré un COP annuel relativement bas et une teneur en carbone ponctuellement élevée de l'électricité en hiver, le remplacement de la chaudière à mazout a réduit les émissions de 92 %, grâce au mix électrique suisse peu carboné, en moyenne (fig.4). >>>

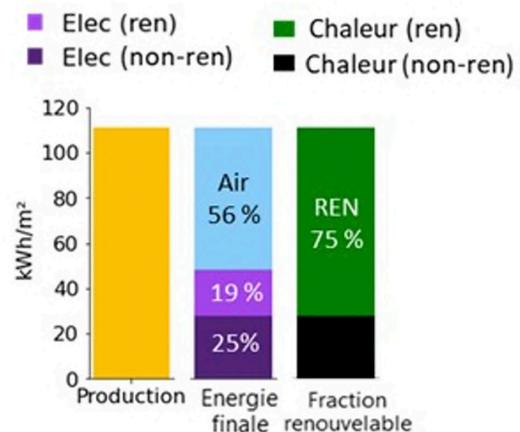
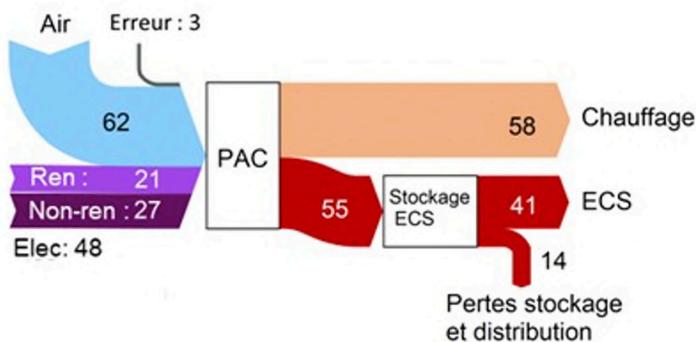


Fig4 : Système PAC en monovalence : diagramme de Sankey (a, en kWh/m².an) ; production de chaleur, décomposée par source et énergie renouvelable / non renouvelable (b). 2^{ème} année d'exploitation (juillet 2019 à juin 2020)

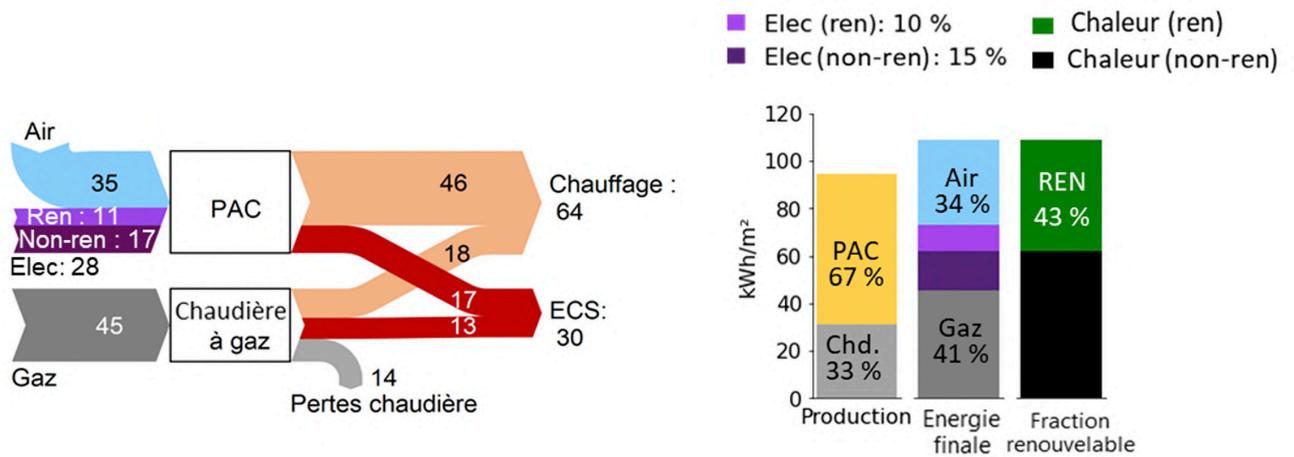


Fig5 : Système hybride : diagramme de Sankey (a, en kWh/m².an) ; production de chaleur, décomposée par source et énergie renouvelable / non renouvelable (b). 2^{ème} année d'exploitation (juillet 2018 à juin 2019)

>>> Système hybride

La production de chaleur la 2^{ème} année (fig.5) atteint 94 kWh/m².an, dont 67 % proviennent de la PAC avec un COP de 2,3 (incluant les auxiliaires, hors pertes de distribution). La chaudière à gaz fournit le reste avec 69 % d'efficacité (sur pouvoir calorifique supérieur). La répartition est de 68 % pour le chauffage et 32 % pour l'ECS. Le changement de système a réduit les émissions de 40 à 13,1 eqCO₂/m².an (-67 %).

Problèmes rencontrés

Bien que les deux systèmes puissent répondre à la demande de chaleur des bâtiments non rénovés en termes de charge et de température, plusieurs problèmes ont été identifiés.

Système monovalent :

Au cours de la première année, les problèmes suivants ont été résolus : (1) les paramètres internes de la PAC industrielle ne reprenaient pas la courbe de chauffage définie, produisant une température constante de 55 °C ; (2) les pompes de circulation étaient activées en permanence, même lorsque la production était interrompue ; (3) des températures de retour élevées vers les PAC en raison d'un échangeur de chaleur sous-dimensionné pour l'ECS ; (4) une panne de la PAC pendant un mois en raison du manque d'un technicien qualifié, qui a finalement été dépêché depuis une autre région.

Système hybride :

Comparé au système monovalent, ce projet présente une complexité plus élevée en termes de concept hydraulique et de régulation, nécessitant la combinaison de plusieurs unités en cascade avec l'ancienne chaudière existante. Parmi les problèmes identifiés et résolus, citons : i) des températures de retour élevées causant des défaillances de la PAC lorsqu'elle fonctionne en parallèle avec la chaudière ; ii) une régulation interne de la PAC principale limitée à la gestion de deux autres unités ; iii) des pertes de chaleur dans les tuyaux reliant les six PAC au toit à la salle des chaudières. De plus, les résidents d'un appartement au dernier étage ont signalé un bruit excessif, confirmé par des mesures acoustiques. Des absorbeurs acoustiques ont été installés sur les entrées et sorties d'air des PAC.

Finalement, la plupart des problèmes dans les deux projets étaient dus à des paramètres incorrects des dispositifs, corrigés en optimisant la régulation du système. Dans certains cas, des configurations hydrauliques non optimales ont également été ajustées, autant que possible.

Discussion

Les deux études de cas diffèrent en termes de configuration du système (monovalent vs. hybride) et de choix des unités PAC (grande unité industrielle vs. petites unités pour maisons individuelles). Cependant, la configuration du système et le type de PAC ne sont pas intrinsèquement liés. Les caractéristiques suivantes doivent être prises en compte lors du choix :

- Les systèmes monovalents sont plus simples à intégrer et à réguler, mais peuvent être sujets à un surdimensionnement coûteux.
- Les systèmes hybrides offrent une flexibilité pour les bâtiments existants, en prévision de rénovations futures et de réductions de la charge thermique.
- Les grandes PAC industrielles nécessitent moins d'espace et réduisent les pertes de chaleur, mais nécessitent des mesures spécifiques pour le bruit et la structure.
- Les petites PAC conçues pour les maisons individuelles répartissent le poids sur le toit, mais la régulation et la limitation de la température de production peuvent poser des défis avec un grand nombre d'unités.

Conclusion

Les deux années de suivi dans des bâtiments résidentiels non rénovés ont montré que les systèmes PAC air/eau peuvent répondre aux besoins de chauffage et d'ECS tout en réduisant considérablement les émissions de CO₂. Cependant, leur mise en œuvre exige une formation professionnelle et une exécution minutieuse, notamment en ce qui concerne les températures. La conception hydraulique et la régulation sont essentielles pour garantir l'efficacité, la fiabilité et la durabilité des systèmes, en particulier pour les systèmes hybrides. L'intégration hydraulique doit être soigneusement vérifiée à toutes les étapes du projet (avant-projet, conception, mise en œuvre, mise en service, suivi).



Omar Montero, Pauline Brischoux, Pierre Hollmuller (Université de Genève).

Hybridation d'une chaudière collective et de PACs haute température : une expérimentation instructive

→ Une instrumentation réalisée sur la chaufferie d'une résidence de 49 logements en région PACA gérée par Logirem valide la pertinence de systèmes hybrides mixant chaudières gaz et pompes à chaleur haute température. Les premiers résultats de cette expérimentation (sur 6 mois) illustrent la possibilité de recourir à l'énergie gaz naturel tout en parvenant à un bouquet énergétique décarboné, conformément aux futures réglementations.

Située à Trets (Bouches-du-Rhône), la résidence Veyrier construite il y a huit ans se compose de quarante-neuf logements locatifs sociaux, gérés par Logirem, bailleur social dont le patrimoine s'élève à quelque 22 000 logements, en régions PACA et Corse. Régis par la RT 2012, ces logements bénéficiaient dès l'origine d'un système de chauffage bi-énergie, associant gaz naturel et solaire thermique. Mais après quatre ans à peine d'exploitation, une erreur d'exploitation a rendu inutilisable plus de la moitié des 70 m² de panneaux solaires installés. En conséquence, c'est la chaudière gaz - qui avait été dimensionnée à dessein - qui assure depuis 100 % des besoins en chauffage et en ECS.

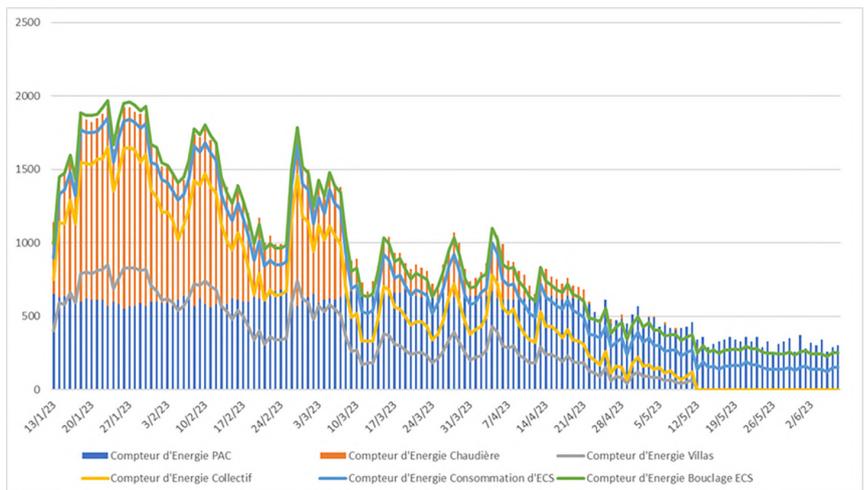


Figure 1 : Apports chaudière vs apports pompe à chaleur

Début 2021, le choix est fait d'hybrider l'installation avec des pompes à chaleur (PAC) et de l'instrumenter pour en suivre les performances avec Solarseyne comme bureau d'étude.

Des PAC en remplacement du solaire thermique

La nouvelle installation se compose donc de deux PAC Vaillant AroTHERM plus, une de 12 kW et une de 15 kW associées à la chaudière existante (170 kW). Ce modèle de PAC haute température fonctionnant au R290, peut produire de l'eau à 65 °C par -10 °C extérieur. Au-delà de 65 °C, la puissance disponible et les performances de la pompe à chaleur sont signi-

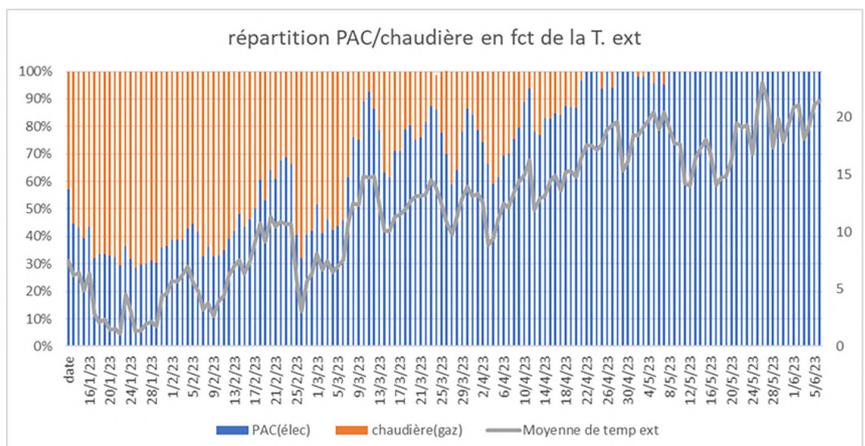


Figure 2 : Part des besoins couverts par la PAC

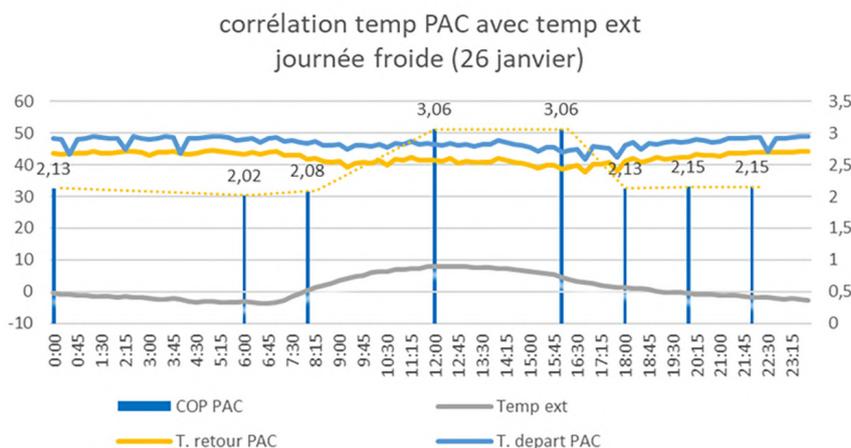


Figure 3 : Focus sur une journée froide

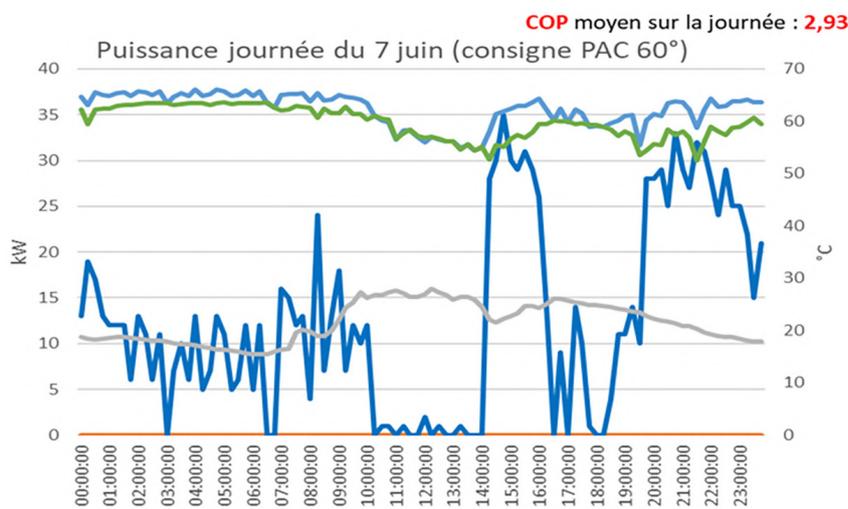


Figure 4 : Focus sur une journée d'été, sans ECS

ficativement réduites, aussi Vaillant recommande une solution hybride ou en relève en deçà de -10 °C pour ce régime 65/57 °C [1].

Sur ce projet, les PAC ont été volontairement sous-dimensionnées en termes de puissance. D'abord pour des raisons pratiques : des PAC de petite puissance permettent au maître d'ouvrage de conserver un abonnement électrique en monophasé. Ensuite parce qu'il a été jugé préférable d'opter pour deux petites PAC en cascade plutôt qu'une seule PAC de 24 kW, permettant d'étendre la plage de fonctionnement à basse charge. La chaudière d'origine de 170 kW, dimensionnée pour assurer le service complet, a été conservée.

Autre vestige de l'installation initiale, et non des moindres, le ballon de stockage. En l'occurrence, un ballon de système solaire combiné (SSC), initialement prévu pour valoriser l'énergie tirée des panneaux solaires thermiques. La présence de ce ballon multivalent (i.e. capable d'être alimenté par plusieurs systèmes de production d'énergie) permet de valoriser plusieurs sources d'énergie, tout en offrant un

stockage avec une stratification naturelle. Hydrauliquement, l'installation se prêtait donc parfaitement à la mise en place d'une PAC puisque le ballon était déjà prévu pour et le remplacement des capteurs solaires par la PAC n'a posé aucun problème. Il a ensuite fallu reprendre le paramétrage de l'automate pour le faire fonctionner avec des pompes à chaleur et non avec un système solaire combiné. La chaudière et les PAC haute température sont donc en montage bivalent parallèle.

Un taux de couverture des PAC élevé

Après six mois de recul, les résultats s'avèrent probants, bien plus que les simulations effectuées préalablement via un logiciel dédié. Le comportement des PAC haute température est plus que satisfaisant, affichant des coefficients de performance (COP) moyens autour de 2,5. À tel point que le fonctionnement de la chaudière gaz peut se limiter aux périodes les plus fraîches, soit de janvier à mi-mars 2023 (voir figure 1) avec les PAC fonctionnant en base. Tout au long de la campagne de mesures, le taux de couverture des PAC s'est révélé très important, de l'ordre de 70 % - et d'autant plus que la température extérieure est élevée, comme le montre la figure 2 : à compter de mi-avril, la chaudière est quasiment à l'arrêt - y compris pour la production d'ECS, assurée par la PAC.

Autre motif de satisfaction pour les parties prenantes : le niveau moyen de performance des PAC. Le COP moyen journalier des PAC est relativement stable, s'affichant autour de 2,5. Les COP peuvent même tutoyer la valeur de 3 en abaissant la température de consigne en sortie de 70 °C à 60 °C. En outre, elles ne dépassent que très occasionnellement la valeur de 3 (ce fut le cas en janvier 2023 par 10 °C extérieur, cf. figure 3). En effet, les COP de fonctionnement sont habituellement indiqués par les fabricants pour des points de fonctionnement à +7 °C/35 °C, mais ceux-ci ne reflètent pas les COP de fonctionnement moyens de la machine, prenant les cycles de dégivrage machine, les températures de départ chauffage plus élevées, la température extérieure, etc. Les PAC se montrent également très performantes en été, alors qu'elles sont en mode production d'ECS seule : là encore, une baisse de la température de consigne à 60 °C améliore sensiblement les COP (figure 4).

Si l'on s'en réfère aux relevés effectués début juin 2023, il semblerait même que la puissance installée en PAC s'avère trop élevée au regard des besoins (ECS seule). Les courbes

Captteurs solaires type 'plan' sur toiture tuiles 17 degrés - surface 69 m²

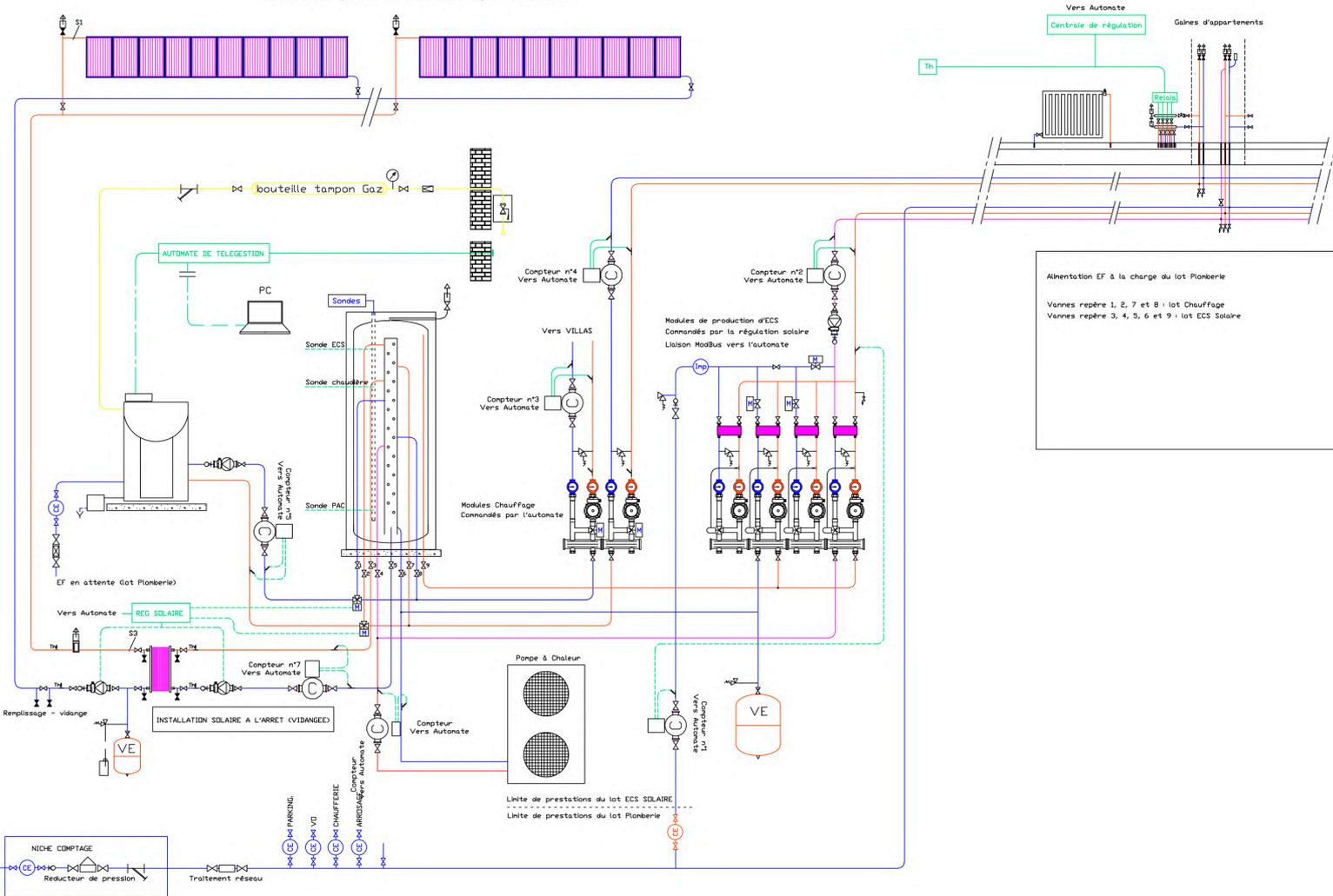


Figure 5 : Schéma de principe de l'installation de TREST (document Solarseyne)

de puissance dénotent un fonctionnement des PAC en cycles courts, pour un taux de fonctionnement global de 50 %. Dès lors, il serait envisageable de réduire encore le dimensionnement des PAC. En effet, les PAC ne représentent ici que 16 % de la puissance installée mais elles permettent déjà de couvrir environ 70 % des besoins chauffage et ECS.

La poursuite du suivi sur une année complète permettra également de quantifier la réduction en émissions de CO₂ constatée sur cette opération et ce montage. Néanmoins sur les 6 premiers mois de l'année, on constate une réduction des émissions de CO₂ de -60 % par rapport à la solution

initiale en chaudière gaz collective (soit une économie de 800 kg de CO₂ par semaine).

Bibliographie

[1] Détermination de la pompe à chaleur aroTHERM plus, Brochure « Courbes de puissance », Vaillant.

Vincent LALLEMAND
Responsable Efficacité Energétique
GDRF/Cegibat



→ HYBRIDATION > PAC > SECTEUR ENSEIGNEMENT

Installation hybride instrumentée à Toulon, la data au service de la performance énergétique

→ En raison de la pression réglementaire et de la hausse des prix du gaz et de l'électricité, la rénovation énergétique des bâtiments tertiaires s'impose comme un enjeu prioritaire. A Toulon, la chaufferie de l'école élémentaire Debussy a récemment accueilli une installation hybride PAC et chaudière gaz à condensation. Une expérimentation instrumentée et innovante, mise en œuvre dans le cadre d'une convention de partenariat entre la ville de Toulon, Atlantic et GRDF. Retour sur une collaboration fructueuse au service de la décarbonation.

Un partenariat efficace

Le projet de rénovation énergétique de l'école Debussy trouve son origine fin 2020. « *Les objectifs ambitieux du Décret Tertiaire et les annonces relatives à la RE2020 nous ont amenés à réfléchir à des solutions d'hybridation des systèmes de chauffage car nous souhaitons les tester sur le terrain* », explique Olivier Pailloux, Ingénieur Efficacité Énergétique, Direction Clients-Territoires Sud-Est chez GRDF. « *Nous avons lancé en 2022 une première opération test avec un bailleur social à Marseille. Nous souhaitons également tester un montage hybride à instrumenter, dans un bâtiment tertiaire. Des échanges avec la marque Atlantic, fin 2021, nous ont conduits à envisager une convention de partenariat. L'étape suivante était de rencontrer un maître d'ouvrage dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, prêt à mettre à disposition un bâtiment tertiaire pour réaliser le projet* ».

La ville de Toulon, très impliquée dans ces questions de rénovation énergétique, a signalé son intérêt pour l'expérimentation en novembre 2022. Il restait à identifier le bon lieu. Le site retenu devait disposer d'une puissance électrique disponible sur la chaufferie existante. Il devait aussi permettre l'installation aisée de l'unité extérieure de la pompe à chaleur, sans générer de nuisance sonore ou visuelle pour le voisinage. Le choix de l'école élémentaire Debussy, qui accueille 231 élèves sur 2063 m², s'est imposé. « *Les établissements scolaires représentent un important volume de bâtiments concernés par la loi Elan et le décret tertiaire, ils sont aussi des bâtiments sensibles pour les collectivités locales. Il était donc pertinent de mener cette expérimentation dans une école* », précise Olivier Pailloux.



Fig.1 : chaufferie de l'école Debussy (à droite les tuyaux provenant de la PAC)

Combiner le meilleur des deux solutions

La chaufferie de l'école Debussy (fig.1), équipée en 1977 de deux chaudières gaz standards, a été réhabilitée il y a huit ans. La ville avait alors choisi de remplacer l'un des deux équipements par une chaudière à condensation Atlantic Varmax 180, disposant de 3 départs. Pour une efficacité énergétique accrue, il était impératif d'explorer des solutions encore plus écologiques. « *C'est là qu'intervient le concept d'hybridation : il combine la fiabilité du gaz et la décarbonation, grâce à la pompe*

3 questions à Philippe Baraou, Chef du service Transition énergétique et Prospective, ville de Toulon

L'installation hybride mise en œuvre à l'école Debussy s'inscrit-elle dans une stratégie d'amélioration énergétique globale de la ville de Toulon ?

Philippe Baraou : La ville est engagée depuis des années dans une démarche d'amélioration énergétique. Cela s'est traduit par l'installation de chaudières à condensation, un travail sur la régulation de chauffage, la mise en place depuis 2009 d'un marché d'exploitation avec intéressement sur les consommations énergétiques... Chaque année, nous réduisons nos ratios de consommations de chauffage en Degrés Jours Unifiés. La rénovation engagée à l'école Debussy est dans le prolongement de ces démarches.

Quel regard portez-vous sur la conduite de ce projet d'hybridation ?

P. B. : La convention de partenariat avec GRDF et Atlantic nous a permis de mener à bien ce projet dans de bonnes conditions, du dimensionnement à la mise en service. L'accompagnement a été très efficace. Nous attendons maintenant les premiers résultats consolidés du COSTIC pour identifier la configuration de fonctionnement de la PAC la plus intéressante. Nous nous sommes donnés une saison de chauffe pour tirer des conclusions de cette expérimentation.

Ce projet vous encourage-t-il à développer ce type de solution hybride sur d'autres sites à Toulon ?

P. B. : Nous souhaitons continuer sur cette voie. Nous avons déjà identifié une dizaine d'écoles à Toulon qui pourraient être équipées d'une solution d'hybridation. Cela pourrait aussi concerner d'autres types de bâtiments.



Fig.2 : PAC Effipac 26 adossée à la chaufferie de l'école

à chaleur », résume Stéphane Permin. L'hybridation assure effectivement une continuité de service avec un secours 100 % gaz en cas d'intervention sur la PAC. « La pompe à chaleur peut se placer hydrauliquement à plusieurs endroits et sa pose génère peu de modifications sur l'installation. Enfin, en cette zone climatique H3, il est possible, en hybridation, de dimensionner la PAC à maxi 50 % de sa puissance, à la température extérieure de base, afin d'éviter son surdimensionnement à la mi-saison. 90 à 95 % des besoins annuels de chauffage sont couverts. Le complément de chauffage est assuré par la chaudière Varmax », poursuit le responsable Atlantic. Pour l'école Debussy, en hybridation mono-circuit, le taux de couverture de l'Effipac 26 permettra de couvrir près de 85 % des besoins annuels de chauffage du cir-

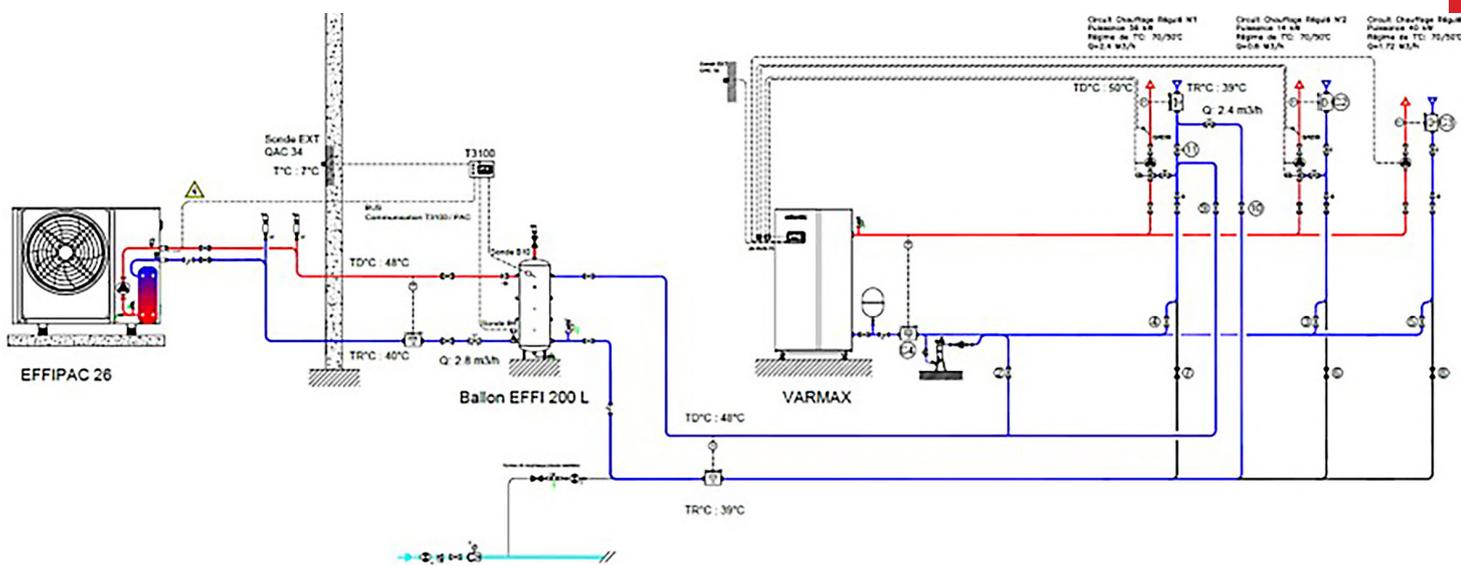


Fig.3 : schéma de principe de l'installation avec ces trois circuits secondaires

>>> cuit du circuit régulé de 56 kW.

Après de nombreux échanges entre la R&D Atlantic, GRDF et la ville de Toulon, la pompe à chaleur Effipac 26 a effectivement été retenue pour ses performances, avec ses faibles coûts d'exploitation et ses importantes économies d'énergie. Son système Full inverter permet à la pompe à chaleur d'adapter sa puissance aux besoins énergétiques de l'installation. « Nous avons sélectionné une Effipac 26 (COP 2.64 à 7 °C. ext et entrée/sortie PAC 47/55 °C) équipée de sa bouteille tampon spécifique de 200 litres. L'Effipac est une PAC monobloc (fig.2) fonctionnant au R32 avec 6 gammes de puissances. Elle est équipée d'une régulation Navistem T3100, issue du même univers que les régulations de nos chaudières Varmax Navistem B3000. », détaille Stéphane Pernin.

Identifier la configuration optimale

Dans la chaufferie de l'école Debussy, trois circuits secondaires coexistent (fig.3) : un circuit dédié à la centrale de traitement d'air à température régulée (avec talon bas) d'une puissance de 40 kW, un premier circuit régulé d'une puissance de 14 kW et un second circuit régulé de 56 kW.

« L'hybridation PAC / gaz de cette école permet un fonctionnement selon trois configurations : hybridation totale avec la PAC sur retour général des trois circuits secondaires, hybridation partielle sur retour des deux circuits régulés ou hybridation mono réseau, avec la PAC dédiée au circuit régulé de 56 kW », poursuit Stéphane Pernin.

La mise en service de la chaufferie a eu lieu le 6 novembre 2023. Les salles de classe bénéficient d'une température de consigne de 19 °C. Pour assurer le suivi instrumenté de l'installation, GRDF a sélectionné le COSTIC (Comité Scientifique et Technique des Industries Climatiques). Les trois configurations hydrauliques seront testées à tour de rôle pendant une durée de quinze jours et ce, à deux reprises. « Ceci nous permettra d'évaluer la meilleure configuration à adopter lorsqu'une hybridation doit être mise en place. L'objectif de cette expérimentation est de montrer les performances techniques et énergétiques de cette solution mais aussi sa reproductibilité », conclut Olivier Pailloux.

**Stéphane Pernin, responsable prescription
Atlantic Systèmes/régionale sud aquitaine/
occitanie/paca**

