



Rapport final du 30 septembre 2021

AirBiVal

Développement et optimisation de concepts hybrides de pompes à chaleur sur l'air pour des immeubles résidentiels collectifs.





CSDINGENIEURS+



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

INSTITUT DES SCIENCES
DE L'ENVIRONNEMENT



Date: 30 septembre 2021

Lieu: Yverdon-les-Bains

Prestataire de subventions:

Office fédéral de l'énergie OFEN, Section Recherche énergétique et cleantech
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Cofinancement:

SIG

Case postale 2777, CH-1211 Genève 2

www.sig-ge.ch

Bénéficiaires de la subvention :

CSD Ingénieurs SA
Avenue des Sports 14, CH-1400 Yverdon-les-Bains
www.csd.ch

Université de Genève
Rue Général-Dufour 24, CH-1211 Genève 4
www.unige.ch/sysener

Auteur(s):

Nicole Calame, CSD Ingénieurs SA, n.calame@csd.ch
Guillaume Cuvillier, CSD Ingénieurs SA, g.cuvillier@csd.ch
Fabrice Rognon, CSD Ingénieurs SA, f.rognon@csd.ch
Omar Montero D., Université de Genève, omar.monterodominguez@unige.ch
Pauline Brischoux, Université de Genève, pauline.brischoux@unige.ch
Simon Callegari, Université de Genève, simon.callegari@unige.ch
Pierre Hollmuller, Université de Genève, pierre.hollmuller@unige.ch
Carolina Fraga, SIG, carolina.fraga@sig-ge.ch
Matthias Rüetschi, SIG, matthias.ruetschi@sig-ge.ch

Suivi du projet à l'OFEN:

Carina Alles, carina.alles@bfe.admin.ch
Stephan Renz, renz.btr@swissonline.ch

Numéro du contrat de l'OFEN: SI/501608-01

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions du présent rapport.



Résumé

Le projet AirBiVal concerne le développement de concepts hybrides avec des pompes à chaleur sur l'air adaptés au contexte difficile et spécifique des immeubles résidentiels collectifs existants et sans rénovation totale du bâtiment. L'objectif est d'élaborer des schémas robustes garantissant un bon fonctionnement des équipements. Ils sont conçus pour maximiser la part couverte par la PAC tout en visant la meilleure efficacité du système complet. L'ambition est ainsi d'améliorer le taux de remplacement des producteurs de chaleur fossiles par des pompes à chaleur de façon pragmatique dans ce secteur. Pour atteindre les objectifs de réduction de CO₂ de la Suisse, il faut remplacer 30'000 chaudières fossiles par an. Il est urgent de concrétiser cette transition (« fuel switch ») rapidement, sans attendre forcément une amélioration de l'enveloppe du bâtiment qui pourra être réalisée dans un deuxième temps. Le travail accompli comprend une analyse du fonctionnement, en situation d'usage réel, de deux projets pilotes du programme « Chaleur renouvelable » des SIG à Genève, ainsi que l'élaboration de quatre schémas hydrauliques, pour systèmes PAC mono- et bivalents, et l'élaboration des analyses fonctionnelles correspondantes. Le modèle de simulation numérique a été validé sur les mesures in-situ d'un projet pilote. Puis l'analyse de sensibilité a pu être effectuée afin de comparer les effets de variation des besoins et du dimensionnement de la PAC sur l'efficacité du système. Les schémas retenus peuvent donc servir de base aux futurs projets de ce type. Les résultats montrent que les schémas bivalents atteignent des efficacités assez proches. Ainsi, il est possible d'intégrer de suite une PAC en conservant les chaudières existantes qui pourront être éliminées après assainissement du bâtiment. Enfin, les simulations ont démontré de façon frappante combien le COP global du système (PAC + chaudière) est l'indicateur de performance à privilégier puisqu'il est lié à une plus large utilisation de la PAC durant l'année et entraîne une réduction des émissions de CO₂eq par kWh de chaleur produit. Si le système est toutefois réglé pour obtenir un coefficient de performance annuel élevé de la pompe à chaleur uniquement, les périodes de fonctionnement à des températures extérieures plus basses sont évitées et la chaudière est utilisée davantage, ce qui entraîne des émissions de CO₂eq plus élevées.

Zusammenfassung

Das AirBiVal-Projekt befasst sich mit der Entwicklung von Hybridkonzepten mit Luft-Wärmepumpen, die an das schwierige und spezifische Umfeld bestehender Mehrfamilienhäuser angepasst sind, ohne dass das Gebäude vollständig renoviert werden muss. Ziel ist es, robuste hydraulische Schemata zu entwickeln, die einen ordnungsgemässen Betrieb der Geräte gewährleisten. Sie sind so konzipiert, dass sie den Anteil des von der Wärmepumpe gedeckten Wärmebedarfs maximieren und gleichzeitig die beste Effizienz des gesamten Systems anstreben. Ziel ist es, den Ersatz von Heizkesseln mit fossilen Brennstoffen durch Wärmepumpen in diesem Sektor auf pragmatische Weise zu verbessern. Um die CO₂-Reduktionsziele der Schweiz zu erreichen, müssen jedes Jahr 30'000 fossile Heizkessel ersetzt werden. Es ist dringend notwendig, diesen Übergang (Brennstoffwechsel) schnell zu vollziehen, ohne notwendigerweise auf eine Verbesserung der Gebäudehülle zu warten, die in einer zweiten Phase erfolgen kann. Die durchgeführten Arbeiten umfassen eine Analyse der Funktionsweise von zwei Pilotprojekten des SIG-Programms für erneuerbare Wärme in Genf unter realen Einsatzbedingungen. Sie umfasst auch die Ausarbeitung von vier hydraulischen Schemen für monovalente und bivalente Wärmepumpensysteme und die Ausarbeitung der entsprechenden Funktionsanalysen. Ein numerisches Simulationsmodell des Systems wurde erstellt und anhand von Messungen vor Ort in einem Pilotprojekt validiert. Anschließend wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um die Auswirkungen des Heizbedarfs und der Dimensionierung der Wärmepumpe auf die Effizienz des Systems zu vergleichen. Die ausgewählten hydraulischen Schemen können daher als Grundlage für zukünftige Projekte dieser Art verwendet werden. Die Ergebnisse zeigen, dass beide bivalenten Schemen recht ähnliche Wirkungsgrade erreichen. Es ist daher möglich, eine Wärmepumpe sofort zu



integrieren und dabei den vorhandenen Heizkessel beizubehalten, welcher nach der Renovierung der Gebäudehülle entfernt werden kann. Schließlich haben die Simulationen auf eindrucksvolle Weise gezeigt, dass die Gesamtarbeitszahl des Gesamtsystems (Wärmepumpe + Heizkessel) der zu bevorzugende Leistungsindikator ist, da sie mit einer breiteren Nutzung der Wärmepumpe während des Jahres verbunden ist und zu einer Verringerung der CO₂eq-Emissionen pro kWh erzeugter Wärme führt. Wird das System jedoch einseitig auf eine hohe Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe getrimmt, werden Betriebszeiten bei tieferen Aussentemperaturen vermieden und mehr mit dem Heizkessel geheizt, was zu höheren CO₂eq-Emissionen führt.

Summary

The AirBiVal project concerns the development of hybrid concepts with air-source heat pumps adapted to the difficult and specific context of existing multi-family residential buildings, without total building renovation. The objective is to develop robust hydraulic diagrams that guarantee a proper operation of the equipment. They are designed to maximize the share of the heating needs covered by the heat pump while aiming at the best efficiency of the whole system. The aim is to improve the replacement rate of fossil fuel boilers by heat pumps in a pragmatic way in this sector. In order to achieve Switzerland's CO₂ reduction targets, 30,000 fossil fuel boilers need to be replaced every year. It is urgent to implement this transition (fuel switch) quickly, without necessarily waiting for an improvement of the building envelope, which can be done in a second phase. The work carried out includes an analysis of the operation, in real conditions of use, of two pilot projects of the SIG Renewable Heat program in Geneva. It also includes the elaboration of four hydraulic diagrams, for monovalent and bivalent heat pump systems, and the elaboration of the corresponding functional analyses. A numerical simulation model of the system was created and validated based on on-site measurements of a pilot project. A sensitivity analysis was then carried out to compare the effects of the heating needs and the sizing of the heat pump on the efficiency of the system. The selected hydraulic diagrams can therefore be used as a basis for future projects of this type. The results show that the bivalent diagrams reach rather similar efficiencies. It is therefore possible to integrate a heat pump immediately while keeping the existing boilers, which can then be removed after the renovation of the building envelope. Finally, the simulations have shown in a striking way how the overall COP of the whole system (heat pump + boiler) is the performance indicator to be favored since it is linked to a wider use of the heat pump during the year and leads to a reduction in CO₂eq emissions per kWh of heat produced. However, if the system is configured to achieve a high annual performance factor for the heat pump, operating times at lower outdoor temperatures are avoided and more heating is provided by the boiler, which leads to higher CO₂eq emissions.



Take-home messages

- Les schémas hydrauliques et analyses fonctionnelles élaborés dans cette étude concernent la mise en œuvre de systèmes de pompe à chaleur air-eau dans les bâtiments multifamiliaux existants. Ils sont conçus spécifiquement pour s'adapter aux principaux cas rencontrés lors de remplacement de la production de chaleur par des PAC air-eau dans ce secteur (avec ou sans rénovation de l'enveloppe). Conçus pour assurer l'efficacité et la fiabilité du système, notamment dans le cas d'applications bivalentes, ils pourront servir de base aux projets futurs.
- Avec le mix électrique suisse actuel (en pas de temps horaire, et tenant compte des imports des pays avoisinants), les systèmes monovalents de PAC air-eau sont plus efficaces et moins émetteurs de gaz à effet de serre que les systèmes bivalents, malgré une certaine dégradation de l'efficacité en hiver.
- Les systèmes bivalents semblent cependant s'imposer comme solution transitoire lorsque le changement d'agent énergétique a lieu avant la rénovation de l'enveloppe du bâtiment, ou lors de problèmes techniques (encombrement, statique) ou de financement d'une solution monovalente. En complétant une chaudière existante par une PAC, il est ainsi possible de décarboner immédiatement la production de chaleur de près des deux-tiers des émissions de CO₂ dans le secteur résidentiel collectif existant en Suisse, même sans rénovation préalable de l'enveloppe des bâtiments. A objectif égal (dimensionnement de la PAC pour couvrir 80% des besoins), les résultats des simulations montrent une faible différence globale d'efficacité entre les diverses solutions bivalentes.
- Il est primordial de réaliser le « fuel switch » aussi rapidement que possible : un créneau de remplacement de chaudière manqué pour les pompes à chaleur restera une opportunité perdue pour deux décennies.



Table des matières

Résumé.....	3
Zusammenfassung.....	3
Summary	4
Take-home messages	5
Liste des abréviations.....	8
Synthèse générale.....	9
1 Introduction.....	16
1.1 Contexte et arrière-plan	16
1.2 Objectifs du projet.....	16
2 Etat du marché et barrières à l'application de pompes à chaleur dans les bâtiments multifamiliaux en Suisse.....	17
2.1 État du marché des PAC dans les bâtiments multi-familiaux, pour la production de chauffage et d'ECS.....	17
2.2 Marché des pompes à chaleur dans les maisons à plusieurs logements : situation et opportunités	31
2.3 Pompes à chaleur air-eau pour la rénovation des systèmes de chauffage dans les zones urbaines : comprendre un défi à plusieurs facettes.....	38
3 Retours d'expérience sur installations pilotes.....	45
3.1 Contexte	45
3.2 Périmètre de l'étude	46
3.3 Positionnement des bâtiments par rapport au parc immobilier genevois	46
3.4 Daru : système PAC bivalent.....	50
3.5 St-Julien : système PAC monovalent	60
4 Définition des schémas hydrauliques.....	73
4.1 Motivation	73
4.2 Sélection des schémas hydrauliques de base	73
4.3 Elaboration des analyses fonctionnelles	74
4.4 Revue et validation des concepts.....	75
4.5 Schémas hydrauliques proposés	75
5 Dimensionnement des systèmes.....	87
5.1 Pompe à chaleur	87
5.2 Chaudière	91
5.3 Ballons tampons	92
6 Modélisation des systèmes	93
6.1 Choix du logiciel de simulation	93
6.2 Validation du modèle monovalent	94



6.3	Normalisation du modèle	98
6.4	Indicateurs de performance	102
6.5	Systèmes de référence.....	104
7	Etude de sensibilité	109
7.1	Sélection des cas étudiés	109
7.2	Résultats et discussion.....	117
8	Collaborations et publications	121
8.1	Collaboration au niveau national	121
8.2	Coopération internationale et activités IEA	121
8.3	Publications	122
9	Conclusions et perspectives.....	123
10	Bibliographie.....	127
11	Annexes	130
Annexe A IEA Annex 50 Status Report 2020.....		130
Annexe B Assemblages des modèles TRNSYS		133
Annexe C Jours typiques pour les systèmes de référence modélisés		137



Liste des abréviations

AIE	Agence internationale de l'énergie
CECB	Certificat énergétique cantonal des bâtiments
COP	Coefficient de performance
COPA	Coefficient de performance annuel
CPE	Contrat de performance énergétique
ECS	Eau chaude sanitaire
ESCO	Energy service companies
GSP	Groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur
IDC	Indice de dépense de chaleur
IEA	International energy agency
OCEN	Office cantonal de l'énergie
OFEN	Office fédéral de l'énergie
OPB	Ordonnance sur la protection contre le bruit
PAC	Pompe à chaleur
PCS	Pouvoir calorifique supérieur
PPE	Propriété par étages
REX	Retour d'expérience
SIA	Société suisse des Ingénieurs et des Architectes
SIG	Services Industriels de Genève
SRE	Surface de référence énergétique
UNIGE	Université de Genève
VDF	Ventilation double-flux



Synthèse générale

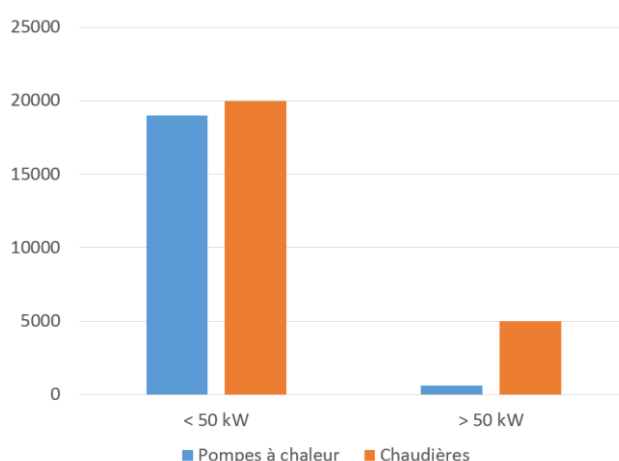
Contexte et objectifs

En Suisse, la majeure partie de la fourniture de chaleur (75%) est d'origine fossile, soit 40% de mazout, 33% de gaz naturel et 2% de charbon. De plus, l'énergie thermique des bâtiments représente 30% des émissions de CO₂ du pays, dont les trois quarts sont liés au secteur résidentiel.

Par ailleurs, les maisons individuelles à usage exclusivement résidentiel représentent 57.4% du parc immobilier suisse (en nombre de bâtiments). Pourtant, la part de la population vivant dans celles-ci n'est que de 27.7%. Ainsi les besoins thermiques issus de près des trois quarts de la population nationale sont générés par des bâtiments multifamiliaux. Le potentiel de développement des énergies renouvelable réside donc en majorité dans les grands bâtiments locatifs puisque ce sont eux qui constituent la plus grande part des besoins thermiques des ménages suisses. Ainsi, une grande part du potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre se situe dans les zones urbaines.

En zone urbaine, les gisements d'énergies renouvelables pour le chauffage de bâtiments collectifs sont le plus souvent très limités : distance à un lac ou à une rivière trop grande, absence de nappe phréatique ou interdiction d'utilisation (protection des eaux), pas de réseau de chauffage à distance à proximité raisonnable, chaudière à bois interdite en zone d'émission excessive, solaire restreint ou nul à cause de la protection des bâtiments. La seule source renouvelable disponible partout est l'air extérieur. Dans ce contexte, les pompes à chaleur sur l'air sont donc la technologie qui présente le plus fort potentiel pour moderniser les systèmes de chauffage existants et réduire les émissions de CO₂ en zone urbaine.

Cependant, une part massive du marché des pompes à chaleur en Suisse se situe en-dessous de 20 kW, soit 81.2% des unités vendues en 2016. Cette gamme de puissance reflète le marché de l'habitat individuel. Au-delà de 50 kW, c'est-à-dire la tranche de puissance qui concerne les bâtiments multifamiliaux, les pompes à chaleur sont marginales dans le marché du chauffage alors qu'elles sont presque à parité avec les chaudières dans la gamme de puissance inférieure à 50 kW.



Marché du chauffage en Suisse pour 2016 selon la gamme de puissance, en nombre d'unités vendues. Statistique partielle.

Le travail présenté ici se concentre sur le développement de concepts de pompes à chaleur sur l'air adaptés au marché de la rénovation d'immeubles résidentiels collectifs. Plus précisément, cette étude concerne les bâtiments équipés de chauffages à mazout ou à gaz impliquant une puissance thermique d'environ 50-100 kW, jusqu'à quelques centaines de kW thermiques.



Dans un premier temps, ce travail consiste à identifier les barrières actuelles à la mise en œuvre de pompes à chaleur sur l'air dans ce type de bâtiments. Puis, il s'agit d'analyser le fonctionnement en situation d'usage réel de deux sites pilotes pour lesquels le système de production de chaleur fossile a été remplacé, partiellement (système bivalent) ou entièrement (système monovalent), par un système de pompe à chaleur sur l'air. Ces analyses sont suivies par la mise au point de schémas hydrauliques visant à assurer l'intégration du système complet, l'efficacité et la fiabilité de l'installation. Afin d'évaluer les performances de tels systèmes dans différentes situations, des simulations numériques sont réalisées à partir d'un modèle calibré sur des mesures in-situ.

Barrières à l'application de pompes à chaleur dans les bâtiments multifamiliaux en Suisse (chapitre 2)

L'analyse des barrières à l'application des pompes à chaleur dans les bâtiments multifamiliaux en Suisse a montré que les contraintes sont à la fois techniques (capacité, acoustique, encombrement, statique, rendement) et commerciales (coût, démarches administratives).

Capacité et acoustique (bruit)

Lors de projets concrets, les ingénieurs se heurtent au manque de disponibilité sur le marché de produits standards adaptés aux contraintes d'une application dans le contexte des bâtiments multifamiliaux. D'une part, la combinaison de plusieurs unités de petite puissance pour atteindre la puissance nécessaire induit un cumul des émissions sonores, qui peuvent alors largement dépasser les valeurs admissibles légalement. D'autre part, les machines de plus grande puissance conçues pour une application industrielle génèrent une puissance acoustique trop élevée pour une intégration en milieu urbain. Il n'existe actuellement pas de machines d'au moins 50 kW et d'une puissance acoustique compatible avec l'application en milieu résidentiel.

Encombrement et masse

L'encombrement est un aspect critique, surtout s'il faut recourir à plusieurs machines. Lors de projets d'assainissements, les locaux techniques existants n'ont pas forcément la place d'accueillir des installations volumineuses. De plus, lorsqu'il est nécessaire d'implanter des machines en toiture, leur masse peut s'avérer décisive pour le succès du projet. Il serait donc souhaitable de développer des pompes à chaleur aussi compactes et légères que possible.

Rendement

Certaines contraintes de fonctionnement des pompes à chaleur peuvent également s'avérer bloquantes pour leur application. En effet, l'efficacité des pompes à chaleur air-eau est dépendante de la température de l'air ambiant, ainsi que des températures de distribution. Il est alors parfois pertinent, voire nécessaire, de recourir à un appoint par chaudière selon la zone climatique et/ou les températures de distribution nécessaires. De plus, les coûts d'exploitation dépendent fortement du rendement de la pompe à chaleur, d'où l'importance de l'exploiter dans de bonnes conditions de fonctionnement.

Coût

Pour les villas, les solutions standardisées sont désormais compétitives par rapport au gaz. En revanche, pour les immeubles collectifs moyens et grands, les systèmes de pompe à chaleur air-eau restent beaucoup plus chers, notamment de par le manque de solutions standardisées, ce qui augmente le coût de l'investissement initial.

Par ailleurs, la législation suisse n'est pas favorable aux projets d'assainissement de bâtiments à plusieurs logements, et ce malgré les différentes taxes et subventions mises en place, puisque ces projets se heurtent au droit du bail. La grande majorité des habitants de ce type de logements est locataire et, lors de la rénovation de la chaufferie, l'investissement supplémentaire généré par une



variante technologique efficiente et renouvelable incombe au propriétaire de l'immeuble. Comme celui-ci n'est pas autorisé à répercuter cet investissement sur les factures d'énergie des locataires, il n'est pas avantageux pour lui d'opter pour cette technologie.

Une possibilité de remédier à ce problème serait d'appliquer le principe de « contracting » énergétique et/ou de financer des transformations par un contrat de performance énergétique (CPE). Toutefois, le nombre limité de ce type d'acteurs sur le marché national et le manque d'expérience dans l'implémentation d'énergies renouvelables ne jouent actuellement pas encore en faveur de ce modèle.

Démarches administratives

La demande d'autorisation nécessaire auprès des autorités cantonales lors du remplacement d'une chaudière par une pompe à chaleur air-eau est un autre aspect légal qui constitue un frein à leur développement. Cette démarche n'est en effet pas requise lors du remplacement d'une chaudière par une chaudière du même type. En revanche, l'installation d'une pompe à chaleur, quelle qu'elle soit, implique de passer par un processus de demande avec une requête officielle. Cette demande circule dans tous les bureaux concernés de l'administration : énergie, environnement, sécurité et sûreté de la population, protection des monuments et sites historiques... Si l'un d'entre eux émet un avis négatif, la demande est rejetée.

Au final, les deux principales barrières identifiées sont donc : (i) une barrière technique liée à une lacune du marché pour des pompes à chaleur de puissance supérieure à 50 kW, silencieuses et faciles à intégrer aux bâtiments de type résidentiel collectif existants et (ii) une barrière commerciale due à la difficulté d'obtenir une offre de rénovation susceptible de plaire aux propriétaires, incluant l'ensemble des prestations et des procédures nécessaires au changement d'agent énergétique.

Retours d'expérience sur installations pilotes (chapitre 3)

Deux projets pilotes de pompes à chaleur sur l'air (immeubles de 53 et 68 appartements) ont été réalisés et analysés en conditions réelles d'usage. Les systèmes de ces deux sites alimentent en chauffage et en eau chaude sanitaire des bâtiments multifamiliaux n'ayant pas subi de rénovation de l'enveloppe, ni du système de distribution de chaleur.

Sur le premier site (projet « Daru »), le système de production de chaleur a été partiellement remplacé par 6 pompes à chaleur air-eau de type villa pour obtenir un système bivalent avec fonctionnement parallèle de la chaudière. Durant la dernière année du suivi, la production a été couverte à 67% par les pompes à chaleur avec un COP annuel de 2.3, auxiliaires inclus, et un COP global (PAC + chaudière) de 1.28. Cependant, avant d'en arriver là, plusieurs dysfonctionnements ont été identifiés et ont dû être corrigés : (i) des retours chauds causant des pannes des pompes à chaleur lors du fonctionnement en parallèle avec la chaudière, (ii) une couverture importante des besoins d'eau chaude sanitaire par la chaudière durant l'été, contraire aux attentes, (iii) des pertes thermiques de distributions élevées entre les pompes à chaleur situées en toiture et la chaufferie, malgré l'isolation des conduites extérieures et (iv) des nuisances sonores excessives pour les habitants du dernier étage de l'immeuble. Sans les pannes des PAC et avec un meilleur rendement de la chaudière (90% sur PCS au lieu de 69%), le COP global du système s'élèverait à 1.7 environ.

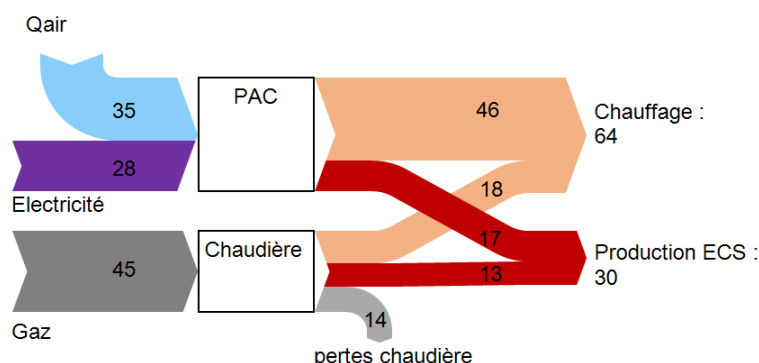


Diagramme de flux du projet « Daru » pour la période du 1er juillet 2018 au 30 juin 2019 (kWh/m²/an)

Le second site pilote (projet « St-Julien »), anciennement chauffé par une chaudière au mazout, est à présent équipé d'un système monovalent comportant 2 pompes à chaleur sur l'air de type industrielle. Durant la dernière année du suivi, le COP annuel s'élevait également à 2.3, auxiliaires inclus, sachant que les besoins d'eau chaude sanitaire représentaient près de la moitié des besoins de chaleur totaux. Les dysfonctionnements observés lors de la première année du suivi sont les suivants : (i) absence de variation de la température de production des pompes à chaleur en fonction de la température extérieure, (ii) fonctionnement non-synchronisé des circulateurs avec leurs pompes à chaleur respectives et (iii) présence de circulateurs à débit fixe intégrés aux pompes à chaleur industrielles alors qu'elles disposent chacune de plusieurs étages de puissance.

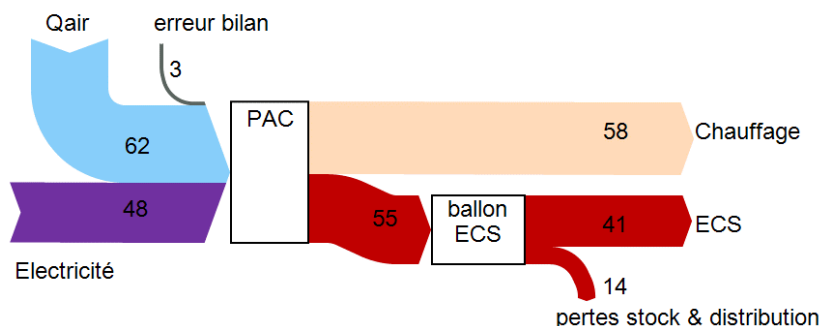


Diagramme de flux du projet « St-Julien », du 1er juillet 2019 au 30 juin 2020 (en kWh/m²/an)

La plupart des dysfonctionnements observés sur les deux sites pilotes provenaient d'un paramétrage incorrect des appareils et ont pu être corrigés en optimisant la régulation du système. Il a cependant parfois été nécessaire d'apporter des modifications au circuit hydraulique.

Ces deux projets montrent que ce type de solution renouvelable est techniquement et économiquement réalisable dans des bâtiments multifamiliaux existants grâce à une ingénierie de qualité, ainsi que des efforts d'optimisation des coûts et un contracting énergétique qui ont permis de lever les barrières légales et financières. Ils mettent aussi en avant le fait qu'une attention particulière doit être portée à la conception du circuit hydraulique et à la régulation du système afin d'en assurer l'efficacité, la fiabilité et la pérennité, en particulier en cas de bivalence parallèle avec une chaudière. Il convient notamment de vérifier l'adéquation avec la conception à chacune des étapes du projet. De plus, l'utilisation dans le résidentiel collectif de pompes à chaleur conçues pour des villas ou pour des applications industrielles est possible bien que non-optimal. Une augmentation de l'offre de pompes à chaleur spécifiques à ce type d'application permettrait d'atteindre plus facilement des performances énergétiques élevées.



Schémas hydrauliques (chapitre 4)

La recherche de schémas hydrauliques existants dans le contexte des bâtiments multi-logements pour une production de chaleur bivalente avec pompe à chaleur sur l'air a été peu fructueuse. Elle a révélé qu'extrêmement peu de fournisseurs disposent aujourd'hui de schémas standard à proposer. La raison en est un manque évident de la demande du marché qui n'a pas induit le développement de ces schémas. Il existe des schémas créés pour un fonctionnement bivalent avec des pompes à chaleur, mais les puissances prévues ne vont que jusqu'à environ 15 kW.

Afin de combler cette lacune, quatre schémas hydrauliques ont été développés à partir d'une revue de la littérature ainsi que d'échanges avec des fournisseurs et avec le GSP (Groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur). Chaque schéma est accompagné d'une analyse fonctionnelle, élément clé pour l'exploitation des systèmes. Le but est d'obtenir des schémas garantissant un bon fonctionnement des équipements.

Les schémas hydrauliques élaborés correspondent aux principaux cas qui peuvent se présenter lors de la conception d'un système avec pompe à chaleur pour la production de chaleur et d'eau chaude sanitaire dans les bâtiments collectifs existants, à savoir :

- **Fonctionnement pompe à chaleur monovalent** : répond au cas où il est possible (techniquement et financièrement) d'installer une PAC permettant de couvrir 100% de la puissance nécessaire
- **Fonctionnement parallèle avec une chaudière modulante** : répond au cas où une chaudière modulante existante ou neuve est utilisée
- **Fonctionnement parallèle avec une chaudière non-modulante** : répond au cas où une chaudière existante qui ne module pas est utilisée
- **Fonctionnement alternatif avec une chaudière non-modulante** : répond au cas où une chaudière existante qui ne module pas et qui sera déconnectée à terme est utilisée

Les schémas sont conçus pour avoir une part couverte par la pompe à chaleur aussi élevée que possible afin de maximiser l'efficacité globale des systèmes. De plus, une attention particulière est portée au placement de la chaudière afin que celle-ci ne perturbe pas le fonctionnement de la pompe à chaleur durant l'exploitation. Dans chaque cas, le système assure à la fois la production de chaleur pour le chauffage et pour l'eau chaude sanitaire.

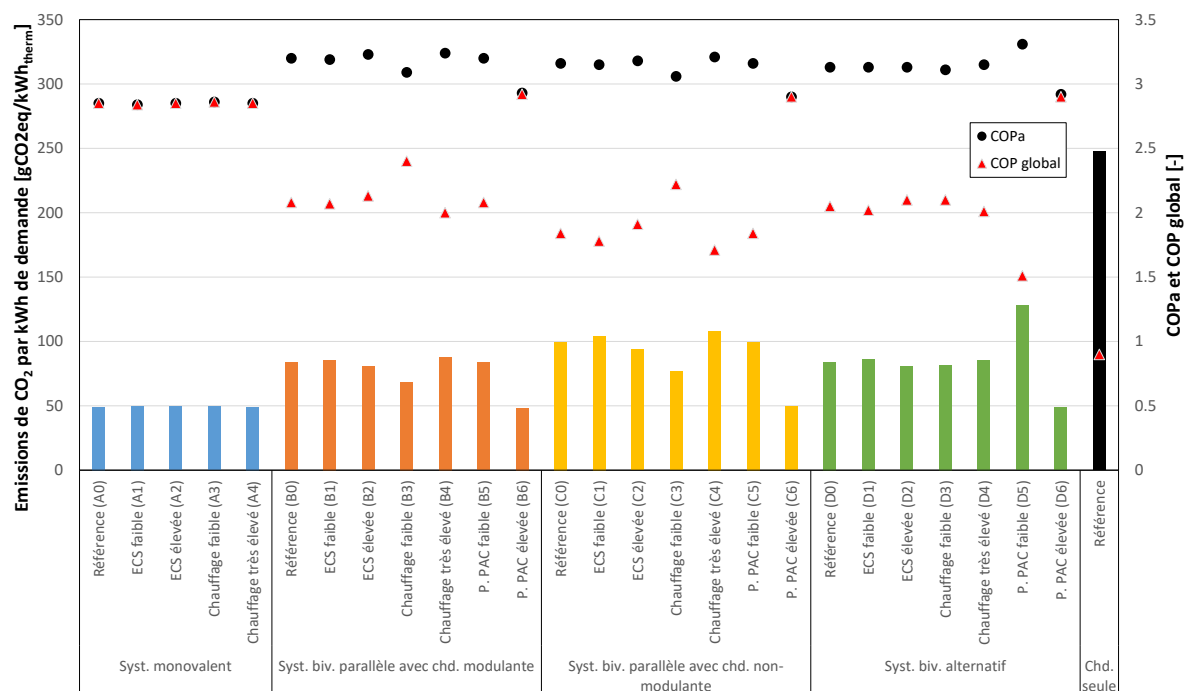
Modélisation des systèmes : validation et analyse de sensibilité (chapitres 6 et 7)

Afin d'évaluer les performances des schémas hydrauliques proposés, de les comparer entre eux et d'émettre des recommandations, des modèles énergétiques ont été mis en place à l'aide du logiciel TRNSYS. Dans un premier temps, le système monovalent a été simulé selon le fonctionnement réel observé sur un des sites pilotes, puis il a été validé à partir de mesures in situ. Les résultats obtenus ont montré que le modèle permet de reproduire de manière fidèle le système réel. En effet, les flux entrants et sortants du système sont correctement reproduits avec une erreur annuelle de 3% au maximum, à l'exception de la consommation électrique de la pompe à chaleur (erreur de 19%). Les écarts observés sont principalement dû à (i) la difficulté de considérer dans la simulation tous les changements manuels apportés au système réel au cours de la période d'étude et (ii) à la divergence entre la performance du fabricant de la pompe à chaleur et les mesures. Malgré cela, les corrélations simulations/mesures restent satisfaisantes pour que le modèle serve de base pour le développement des modèles des autres systèmes.



Les trois autres schémas hydrauliques proposés ont alors été modélisés à partir du modèle monovalent validé, selon les analyses fonctionnelles établies. Les quatre systèmes ainsi obtenus ont servi de référence pour une étude de sensibilité portant sur trois paramètres principaux : (i) le niveau de demande de chauffage, c'est-à-dire des bâtiments d'époques de constructions différentes et/ou dont l'enveloppe a été rénovée, (ii) le niveau de demande d'eau chaude sanitaire et (iii) un éventuel sous- ou surdimensionnement de la pompe à chaleur, dans le cas des systèmes bivalents uniquement. Au total, 26 variantes ont été simulées.

Pour les différentes variantes étudiées, le COP annuel (COPa) de la pompe à chaleur obtenu varie entre 2.8 et 3.3 et le COP global du système, qui inclut les performances de la chaudière, est compris entre 1.5 et 2.9. Les émissions de gaz à effet de serre des systèmes monovalents sont de l'ordre de 50 gCO₂eq par kWh de demande thermique, tandis que les systèmes bivalents atteignent dans la plupart des cas 80 à 100 gCO₂eq/kWh_{therm}.



Résultats de l'étude de sensibilité en termes d'émissions de CO₂ (barres, axe de gauche) et de COPa de la PAC et de COP global (points, axe de droite)

Cette étude de sensibilité a montré que l'optimisation des performances de la pompe à chaleur est intéressante, mais que c'est l'efficacité globale du système qui est à considérer pour minimiser la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre. De plus, avec le mix électrique suisse actuel, il semble plus avantageux de mettre en place un système monovalent que bivalent, malgré une certaine dégradation des performances de la pompe à chaleur en hiver. Un système bivalent peut cependant s'avérer être une alternative intéressante, bien que les émissions soient 1.4 à 2.2 fois plus élevées que pour un système monovalent. En effet, elles restent tout de même 2.3 à 3.5 fois plus faibles qu'un système comportant uniquement une chaudière. En particulier, les systèmes bivalents pourraient constituer une solution transitoire pour changer d'agent énergétique avant la rénovation de l'enveloppe du bâtiment.

En plus des problématiques de performances, l'aspect économique entre en jeu pour la prise de décision quant au système à installer. Celui-ci n'a pas été pris en compte dans cette étude, mais



plusieurs éléments relatifs au dimensionnement de la pompe à chaleur, intimement liés à l'aspect économique, ont été soulevés. D'une part, les systèmes monovalents requièrent l'installation d'une pompe à chaleur 2 à 3 fois plus puissante que pour des systèmes bivalents dimensionnés de sorte à assurer 80% de la production avec la pompe à chaleur. Il semblerait cependant que la capacité de la pompe à chaleur en monovalent pourrait être fortement réduite en ayant recours à un simple appoint électrique pour les journées les plus froides. D'autre part, la capacité de la pompe à chaleur pourrait également être réduite dans le cas de certains systèmes bivalents en assurant une partie de la production d'eau chaude sanitaire avec la chaudière. La pompe à chaleur ne serait alors plus obligée de disposer de la capacité suffisante lors des jours les plus froids comme c'est le cas dans les schémas hydrauliques proposés dans cette étude.



1 Introduction

1.1 Contexte et arrière-plan

L'énergie thermique des bâtiments représente 30% des émissions de CO₂ en Suisse, dont les $\frac{3}{4}$ pour l'habitat. Dans la région urbaine de Genève, 79% de la surface chauffée concernent des bâtiments résidentiels collectifs contre 21% pour les villas individuelles. Sur le plan national, le rapport est de 55% / 45%.

En zone urbaine, les gisements d'énergies renouvelables pour le chauffage de bâtiments collectifs sont le plus souvent très limités : distance au lac ou à une rivière trop grande, absence de nappe phréatique ou interdiction d'utilisation (protection des eaux), pas de réseau de chauffage à distance à proximité raisonnable, chaudière à bois interdite en zone d'émission excessive, solaire restreint ou nul à cause de la protection des bâtiments. Dans ce contexte, il apparaît que les pompes à chaleur sur l'air constituent le potentiel le plus important pour la réduction de la consommation du CO₂ en zone urbaine.

Le travail présenté se concentre sur les aspects de recherche énergétique appliquée pour la mise en œuvre de pompes à chaleur dans la rénovation de chauffages à mazout ou à gaz. Il s'agit d'identifier les barrières actuelles à leur mise en place dans des immeubles résidentiels collectifs, ainsi que de mettre au point des schémas hydrauliques qui assurent l'intégration du système complet, l'efficacité et la fiabilité de l'installation.

1.2 Objectifs du projet

Le projet AirBiVal poursuit plusieurs objectifs. Dans un premier temps, il s'agit de développer des schémas de systèmes de chauffage intégrant des PAC sur l'air avec et sans appoint pour les bâtiments résidentiels collectifs d'une puissance thermique d'environ 50-100 kW jusqu'à quelques centaines de kW thermiques adaptés au marché de la rénovation. L'objectif est ici de fournir des schémas fiables faisant le lien entre la théorie, les bonnes pratiques et la réalité du terrain.

Les schémas obtenus sont ensuite validés par des simulations calées sur des mesures in situ de longue durée issues d'un projet pilote. Des analyses de sensibilité avec différents niveaux de puissance pour la PAC et une variation de la demande en eau chaude sanitaire et en chauffage permettent finalement de comparer les systèmes entre eux selon le COPa de la pompe à chaleur mais aussi le COP du système complet ainsi que les émissions de CO₂ générées.

Les résultats de cette étude seront finalement disséminés en collaboration avec le GSP (Groupement professionnel des pompes à chaleur) à l'intention des ingénieurs, fournisseurs et installateurs.

En parallèle, le projet AirBiVal aura permis de contribuer à l'Annexe 50 de l'AIE « Heat pumps in multi-family buildings for space heating and DHW ».



2 Etat du marché et barrières à l'application de pompes à chaleur dans les bâtiments multifamiliaux en Suisse

Ce chapitre reprend différents rapports et publications élaborés au cours du projet. Par souci de lisibilité, les références bibliographiques de chaque publication sont données à la fin de chacun des sous-chapitres.

Il est à noter que, bien que ces documents aient été produits entre 2017 et 2019, les tendances observées n'ont que peu évoluées depuis et sont toujours d'actualité.

2.1 Etat du marché des PAC dans les bâtiments multi-familiaux, pour la production de chauffage et d'ECS

La contribution suisse au rapport de la Task 1 de l'Annexe 50 de l'IEA « Heat pumps in multi-family buildings for space heating and DWH » a été rédigée dans le cadre du projet AirBival. Ce sous-chapitre est issu de la traduction du rapport élaboré en 2017, et présente l'état du marché des PAC en Suisse.

2.1.1 Demande énergétique de la Suisse

Chiffres globaux

La consommation totale d'énergie finale en Suisse était de 854'300 TJ en 2016 [1]. La Figure 1 montre l'importance relative des différents vecteurs énergétiques pour les ménages, les industries, les services et les transports.

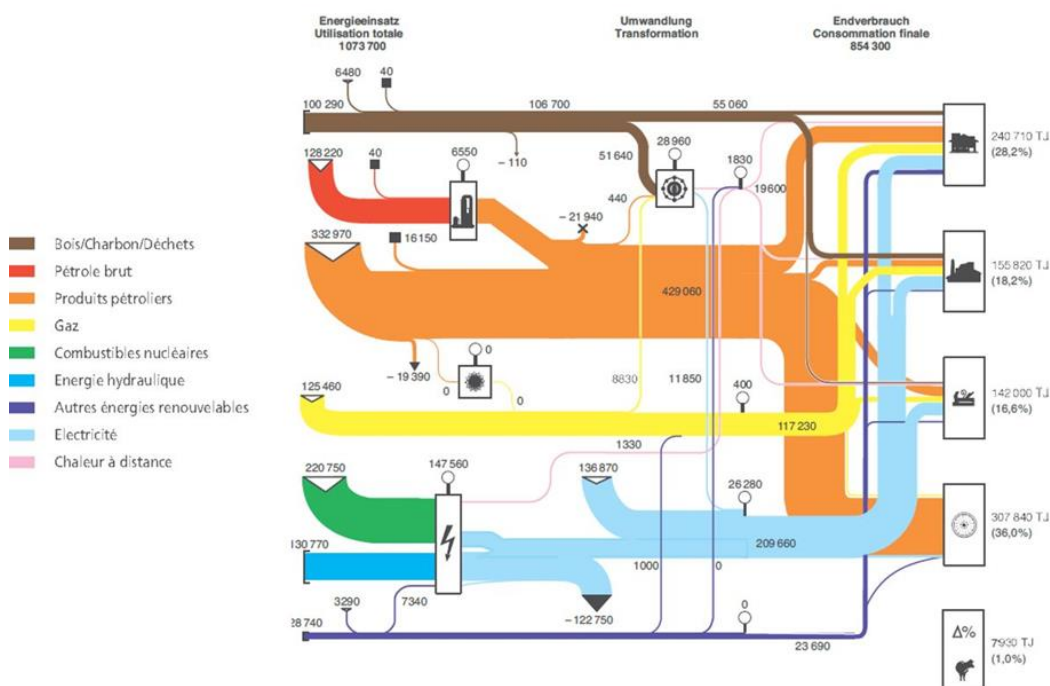


Figure 1 : Schéma détaillé des flux énergétiques de la Suisse en TJ pour 2016 [1].



Secteur des bâtiments

En 2016, les besoins énergétiques du secteur du logement représentent 240'710 TJ ou 28,2% de la consommation finale d'énergie nationale [1]. L'évolution du secteur des ménages montre une augmentation entre 2014 et 2016 comme présenté dans la Figure 2.

La part nationale des énergies renouvelables dans la fourniture de chaleur est d'environ 16% pour 2015 (dont 11% de systèmes à base de bois, 5% d'autres énergies renouvelables) [1, 2]. La part des énergies renouvelables pour la production de chaleur atteint 20,2% en 2016 (sans l'électricité). En 2016, les pompes à chaleur représentent 28% de la chaleur renouvelable dans le pays [3].

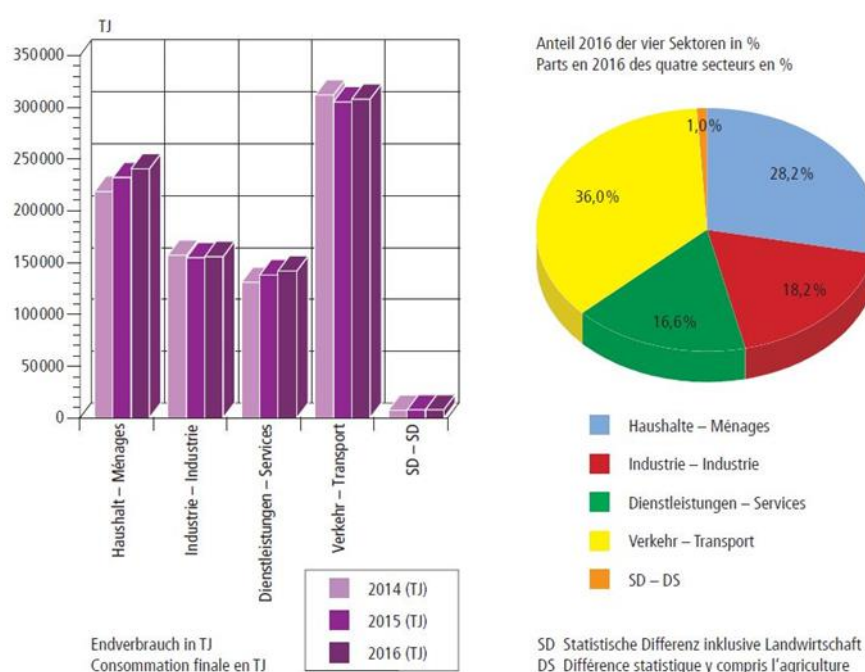


Figure 2 : Répartition de la consommation finale d'énergie par secteur pour 2016 [4]

Secteur domestique

Dans le secteur domestique, la part de marché des pompes à chaleur est passée de presque zéro dans les années 1990 à environ 50% aujourd'hui. Cette part atteint 90% dans les maisons individuelles et environ 10% dans les maisons plurifamiliales.

La Figure 3 illustre la répartition des pompes à chaleur sur le marché suisse en 2013. Les ventes de PAC sont en tête pour les puissances jusqu'à 100kW avec plus de la moitié des appareils de production de chaleur vendus. La gamme de puissance supérieure à 100kW indique en revanche une part marginale de pompes à chaleur utilisées pour des capacités plus importantes comme les immeubles multifamiliaux.

Les pompes à chaleur dans les maisons plurifamiliales ont une part modeste dans les nouvelles constructions et presque nulle dans la modernisation des systèmes existants.

L'énergie thermique pour le chauffage des locaux et la production d'eau chaude sanitaire représente environ 30% des émissions de CO₂ de la Suisse.

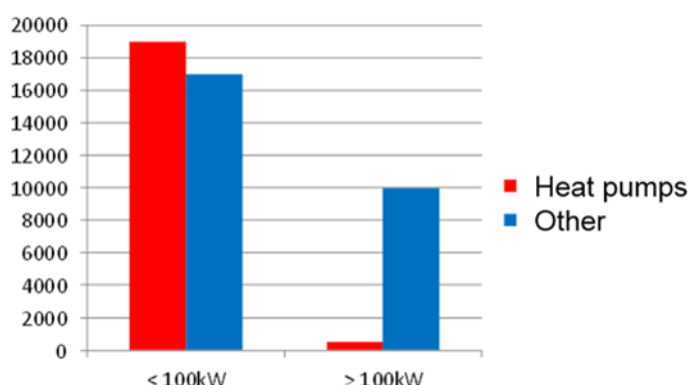


Figure 3 : Le marché suisse du chauffage en 2013 [5].

2.1.2 Cadre politique

La majorité de l'approvisionnement en chaleur de la Suisse (75%) provient de combustibles fossiles importés, dont 40% de fioul domestique, 33% de gaz naturel et 2% de charbon [1, 2]. Les objectifs de la politique fédérale suisse comprennent une diminution de 20% des émissions globales de carbone et une diminution de 40% des émissions des bâtiments en 2020 par rapport au niveau de 1990 [6-8]. En 2014, les émissions globales de carbone ont été réduites de 9% par rapport au niveau de 1990 [2]. Dans les bâtiments, les émissions ont été réduites respectivement de 30%, ce qui représente environ 5,2 millions de tonnes d'équivalent CO₂ à économiser d'ici 2020 [2]. Divers instruments politiques ont été mis en place pour réduire les émissions de carbone et promouvoir les solutions de chauffage renouvelable, notamment la taxe sur le carbone et le programme de subvention fédéral *Programme Bâtiment* [6, 7]. Cependant, il a été officiellement reconnu que ces solutions ne sont pas suffisantes pour atteindre le niveau souhaité d'émissions de carbone.

En plus des objectifs et des instruments de la politique fédérale, certains cantons entreprennent des actions pour promouvoir les solutions de chaleur renouvelable dans leurs juridictions géographiques. Dans le canton de Genève, le service public local Services Industriels de Genève (SIG) est mandaté par le canton pour soutenir l'adoption de la chaleur renouvelable par les consommateurs finaux, y compris les secteurs de l'habitat individuel et collectif. Ce soutien est mis en œuvre par le biais du portefeuille de programmes d'efficacité énergétique éco21 des SIG [9-12]. Dans le cas du secteur des habitations individuelles, éco21 offre des subventions qui couvrent environ 10% des coûts d'investissement initiaux (y compris les équipements et les services d'installation). Ce type de soutien n'est pas adapté aux maisons multifamiliales en raison des particularités de la législation suisse sur le logement.

Contrairement au secteur du logement individuel, la majorité des habitants des maisons multifamiliales sont des locataires [13]. Selon la loi suisse, les locataires paient les coûts d'énergie et d'entretien, tandis que le propriétaire du bâtiment est responsable des coûts d'investissement initiaux des systèmes de chauffage et n'a pas le droit de les répercuter sur les locataires via les factures d'énergie [14]. Actuellement, pour les bâtiments existants, les coûts d'investissement des systèmes de chauffage renouvelables tels que les pompes à chaleur sont de trois à cinq fois plus élevés que les solutions conventionnelles (à base de combustibles fossiles). Les propriétaires ne sont donc pas incités à opter pour les énergies renouvelables. Une possibilité de surmonter cet obstacle est le contrat d'énergie, lorsqu'une ESCO (compagnie de services énergétiques) investit dans un système de chaleur renouvelable et récupère ses coûts en vendant un service énergétique aux habitants du bâtiment. Cependant, cette solution n'est pas largement utilisée en raison du nombre limité d'ESCO sur le marché suisse et du manque d'expérience dans la mise en œuvre des technologies renouvelables. C'est



particulièrement le cas de l'intégration des pompes à chaleur dans les bâtiments existants, car cette solution exige de multiples services professionnels : développement du concept énergétique ; évaluation du bruit, de la statique et de la physique du bâtiment ; planification et mise en œuvre des travaux de chauffage, d'électricité et sanitaires ; procédures administratives.

Il y a un réel besoin de repenser la répartition entre les coûts payés par les propriétaires et les locataires et aucune subvention ne peut couvrir cet écart. La loi suisse prévoit une exception pour les systèmes de chauffage urbain à distance: une possibilité d'affecter les trois parties - l'investissement initial, l'énergie et les coûts de maintenance - au locataire [14]. L'interprétation de la loi tend à étendre l'exception du chauffage urbain à d'autres types de solutions de chauffage basées sur un contrat de vente de chaleur pour autant que l'augmentation annuelle des coûts de chauffage ne dépasse pas la limite de 10%. Toujours pour maintenir le coût annuel du chauffage presque constant pour le locataire, nous avons la possibilité de demander une contribution à l'investissement du propriétaire du bâtiment qui réduit l'investissement initial. Le montant dépend de l'état du système de chauffage existant ; si le système existant est vieux, le propriétaire du bâtiment dépense le montant équivalent d'un nouvel équipement fossile, mais s'il est neuf, le propriétaire du bâtiment ne contribue pas à l'investissement initial.

De plus, le remplacement d'une chaudière par une chaudière du même type ne nécessite aucune autorisation ou procédure supplémentaire. En revanche, une autorisation des services cantonaux de l'énergie et des constructions est obligatoire pour remplacer un système à combustible fossile par une pompe à chaleur air-eau. Un certain nombre de normes doivent être respectées, notamment en matière de niveau sonore, de sécurité électrique et de sécurité incendie. Le respect de ces normes nécessite souvent des investissements importants et augmente donc les coûts des projets de chaleur renouvelable. De ce point de vue, la législation actuelle crée plus d'obstacles à la mise en œuvre de solutions de chauffage renouvelable dans les maisons multifamiliales existantes qu'elle n'apporte de soutien (par exemple, des subventions fédérales). Le cadre juridique n'est pas prévu pour donner plus d'incitations à l'avenir. Par conséquent, le développement des contrats d'énergie par les sociétés de services énergétiques et les programmes énergétiques tels qu'éco21 peuvent être considérés comme le principal instrument potentiel pour la promotion de la chaleur renouvelable dans le parc immobilier des maisons multifamiliales existantes.

Réglementation des bâtiments

Le "Modèle de prescriptions énergétiques des cantons" (MoPEC) prescrit à quelles valeurs U les nouvelles constructions ou transformations doivent se conformer. Il n'y a pas d'obligation d'assainir les bâtiments mais si des transformations sont entreprises, les valeurs U doivent être respectées.

Le système de normes de la Société Suisse des Ingénieurs et Architectes (SIA) donne des objectifs de performance énergétique. Le dossier technique SIA 2040 pour une construction compatible avec la Société à 2000 Watts donne des valeurs objectives par secteur [15]. Le Tableau 1 montre les valeurs indicatives pour la construction, l'exploitation ainsi que la mobilité qui ont été établies pour atteindre les objectifs nationaux pour 2050.



Tableau 1 : Valeurs cibles pour le secteur du logement [15].

Habitations	Énergie primaire non renouvelable MJ/m ²		Émissions de gaz à effet de serre kg/m ²	
	Construction nouvelle	Transformation	Construction nouvelle	Transformation
Valeur indicative «construction»	110	60	8,5	5,0
Valeur indicative «exploitation»	200	250	2,5	5,0
Valeur indicative «mobilité»	130	130	5,5	5,5
Valeurs cibles	440		16,5	15,5

En ce qui concerne la production d'eau chaude sanitaire, la norme suisse SN546 385/1 "Installation d'ECS dans les bâtiments" stipule que pour un logement collectif avec une alimentation ECS centralisée, l'eau potable qui est restée à une température comprise entre 25°C et 50°C pendant plus de 24 heures sans être utilisée doit subir une désinfection thermique [16]. Cette dernière consiste en une phase de chauffage à 60°C pendant une heure. Pour les logements collectifs sans alimentation centralisée en eau chaude sanitaire, cette règle n'est qu'une recommandation. Suivant la même norme, la chaudière ECS doit être conçue pour pouvoir atteindre une température de sortie de 60°C, 55°C dans les conduites hydrauliques maintenues à température et 50°C aux points de puisage.

En pratique, le schéma appliqué est une désinfection thermique une fois par semaine par chauffage du ballon d'eau chaude à 60°C pendant une heure.

Label de haute performance énergétique

Le certificat énergétique cantonal des bâtiments (CECB) donne des informations sur l'efficacité de l'enveloppe du bâtiment, l'efficacité énergétique globale (électrique comprise) et les mesures de rénovation possibles. Il est établi par des experts accrédités et n'est pas obligatoire mais pourrait le devenir à l'avenir. Ce certificat est cependant exigé maintenant en cas de vente d'une maison.

Le label Minergie définit les valeurs minimales à atteindre dans différents domaines afin de certifier un bâtiment ou des modules selon Minergie. Il s'agit d'une démarche volontaire qui offre trois options de différents degrés d'exigence appelées Minergie, Minergie-P ou Minergie-A. Des options supplémentaires "ECO" sont proposées pour chaque type. Le standard Minergie répond aux exigences strictes du "Programme Bâtiment" décrit au paragraphe ci-dessous.

Programmes d'incitation

Le "Programme Bâtiment" accorde des incitations directes sous forme de subventions. Au niveau national, il encourage la rénovation énergétique de l'enveloppe des bâtiments. Dans la plupart des cantons, le programme soutient l'utilisation de sources d'énergie renouvelables, la récupération de chaleur et les installations techniques dans les bâtiments.

Les 26 cantons suisses ont développé un système commun de subventions. Ils partagent les mêmes critères pour toutes les technologies, mais les technologies soutenues peuvent varier d'un canton à l'autre. Par exemple, le canton urbain de Genève ne soutient pas les systèmes de chauffage au bois.

Dans la plupart des cantons, des réductions d'impôts sont obtenues en cas d'investissement dans les énergies renouvelables pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire.



Certificats d'économies d'énergie

Les conventions d'objectifs sont passées entre la Confédération et les entreprises. Elles sont un instrument utilisé pour augmenter l'efficacité énergétique de l'entreprise et réduire simultanément les émissions de CO₂. En tant que conventions d'objectifs, elles sont établies soit sur une base volontaire, soit comme instruments contraignants visant à libérer une entreprise de la taxe sur le CO₂.

Les objectifs sont élaborés et discutés en étroite collaboration entre les entreprises, la Confédération et les organisations mandatées par cette dernière. Vous trouverez des détails à ce sujet dans la "Directive sur les accords conceptuels avec la Confédération pour l'amélioration de l'efficacité énergétique". Les organisations mandatées par la Confédération - Act Cleantech Switzerland et l'Agence de l'énergie pour l'économie AEnEC - proposent différents modèles de conventions d'objectifs. Ainsi, les grands consommateurs déterminent eux-mêmes l'efficacité énergétique et un niveau de leurs émissions de CO₂, puis ils appliquent ces données comme des objectifs à atteindre. Les PME, qui utilisent des processus de production simples, fixent leurs objectifs d'économies d'énergie. Dans tous les cas, les mesures et les objectifs restent adaptés au potentiel économique de l'entreprise.

2.1.3 Caractéristiques du parc immobilier

Le parc immobilier suisse

L'Office suisse de la statistique considère que les maisons jumelles, groupées ou en rangée ayant chacune son propre accès depuis l'extérieur et séparées des autres par un mur porteur vertical commun du rez-de-chaussée au toit constituent un bâtiment indépendant. Toutes les constructions à usage exclusif ou partiel de logement sont prises en compte dans la statistique des bâtiments et des logements (StatBL). Le nombre total de bâtiments avec application logement s'élève à 1'712'893 en 2015. La plupart d'entre eux (83,7%) sont exclusivement à usage de logement.

Les maisons individuelles à usage exclusif d'hébergement représentent 57,4% du parc immobilier suisse. Près d'une famille sur quatre (23%) vit dans une maison individuelle.

Les bâtiments multifamiliaux à usage exclusif de logement s'élèvent à 26,3% alors qu'ils représentent 34,9% si l'on considère l'ensemble du parc des bâtiments multifamiliaux y compris l'usage partiel de logement [13].

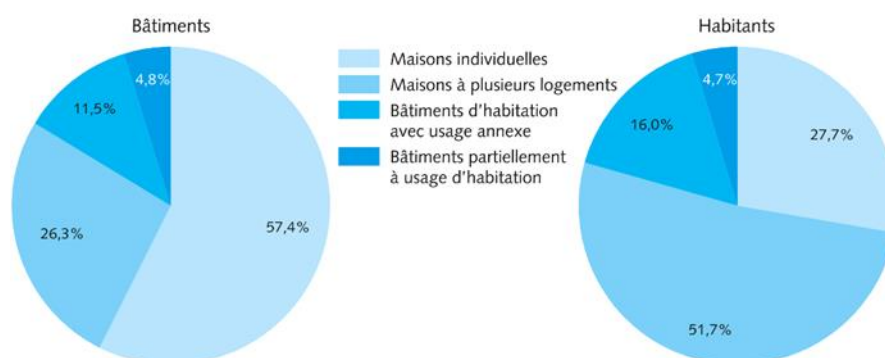


Figure 4 : Répartition des bâtiments et des habitants en fonction de la catégorie de bâtiment [13].

On observe une augmentation constante du taux de propriété depuis 1970, qui est particulièrement forte dans la propriété par étages (PPE) (+72%) [Panorama OFS 2017]. De grandes disparités existent entre les cantons urbains présentant un faible taux de propriété (Genève 18,2%, Bâle-Ville 16%) et les cantons ruraux (Appenzell Rhodes-Intérieures 57%, Valais 57,2%, Jura 54,2%).



La répartition du nombre de logements par bâtiment, telle que présentée dans la Figure 19 indique les variations géographiques qui ont lieu à travers le pays. Dans les zones urbaines comme le centre-ville de Genève, 79% des bâtiments sont des maisons multifamiliales, pour l'ensemble du canton la moyenne est d'environ 37%. La valeur moyenne nationale montre que 65% des bâtiments résidentiels sont destinés à des familles individuelles en 2015 [13].

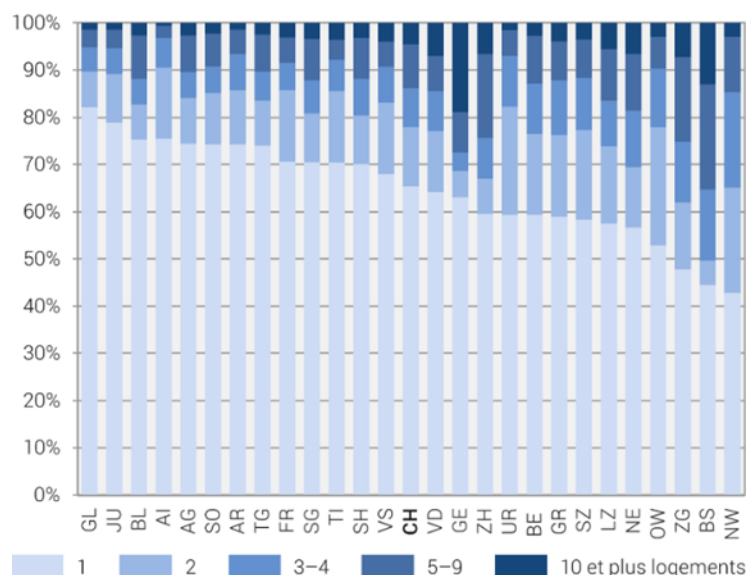


Figure 5 : Parc immobilier donné par le nombre de ménages pour chaque canton et la valeur moyenne suisse " CH " pour 2015 [13].

Consommation d'énergie dans les bâtiments en Suisse

Le Tableau 2 montre les valeurs et les tendances des besoins énergétiques des ménages suisses. En 2015, plus des deux tiers de la consommation d'énergie sont consacrés au chauffage des locaux ("Chauffage" 67,4%, 154,4 PJ) [17]. En considérant la consommation corrigée par la météorologie, la part du chauffage dans la consommation totale diminue au fil du temps, passant de 72,6% en 2000 à 70% en 2015. La préparation d'ECS a un poids important dans la consommation globale d'énergie puisqu'elle représente 13,9% ("Eau chaude" 31,9 PJ). Les autres applications présentent un impact plus faible.

Tableau 2 : Consommation d'énergie dans les ménages pour diverses applications en PJ [17].

	2000	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Δ '00-'15
Chauffage (des locaux)	167.5	192.2	149.0	168.1	185.5	139.7	154.4	-7.8%
Eau chaude	32.3	32.2	31.6	31.9	32.2	31.7	31.9	-1.2%
Climatisation, ventilation, technique du bâtiment	3.6	4.4	3.8	4.2	4.7	3.9	4.4	+21.9%
Médias de divertissement, I&C	5.4	5.5	5.3	5.1	5.0	4.8	4.6	-13.2%
Cuisson, lave-vaisselle	8.8	9.3	9.3	9.3	9.4	9.5	9.6	+8.8%
Eclairage	5.7	5.7	5.4	5.1	4.9	4.5	4.1	-28.9%
Lavage & séchage	2.6	4.9	5.0	5.1	5.1	5.1	5.0	+93.1%
Réfrigération & congélation	7.1	6.9	6.8	6.7	6.6	6.5	6.4	-10.2%
Autres appareils électriques	4.6	7.1	7.3	7.7	8.0	8.3	8.6	+86.8%
Total	237.7	268.2	223.4	243.4	261.3	214.2	229.1	-3.6%



Énergie pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire dans le parc immobilier

Chauffage

La part des pompes à chaleur utilisées pour le chauffage dans l'ensemble du pays est de 11,9% en 2015.

Le Tableau 3 montre l'évolution des différents vecteurs énergétiques dans le temps depuis 2000. Les pompes à chaleur destinées au chauffage ont vu leur utilisation presque tripler entre 2000 et 2015. La part de mazout reste prédominante puisqu'elle représente 47,4% du chauffage établi dans le parc immobilier suisse en 2015. Les valeurs sont indiquées en nombre et en pourcentage de bâtiments équipés des différentes technologies [13].

Tableau 3 : Évolution des vecteurs énergétiques pour le chauffage dans le parc immobilier suisse en nombre de bâtiments et en % par an [13].

	2000		2010		2015	
	absolu	en %	absolu	en %	absolu	en %
Mazout	814'827	56,0	841'036	51,3	810'889	47,4
Bois	189'571	13,0	198'624	12,1	206'249	12,1
Pompe à chaleur	60'109	4,1	140'844	8,6	203'169	11,9
Electricité	166'248	11,4	168'098	10,2	163'592	9,6
Gaz	200'187	13,8	248'048	15,1	273'468	16,0
Chaleur à distance	20'593	1,4	29'596	1,8	34'978	2,0
Charbon	1'057	0,1	2'180	0,1	1'126	0,1
Capteur solaire	944	0,1	2'242	0,1	4'851	0,3
Autres agents énergétiques	964	0,1	9'383	0,6	11'298	0,7

Les statistiques montrent que 7,4% du parc global de bâtiments multifamiliaux suisses utilisent des pompes à chaleur pour le chauffage [13]. Les bâtiments multifamiliaux représentent des logements à usage exclusif, des logements à usage annexe ainsi que des bâtiments à usage partiel de logement pouvant accueillir deux ou plusieurs familles. Sur ces 44'257 constructions 88,4% ont une PAC par bâtiment alors que 11,6% ont plusieurs bâtiments partageant une station de chauffage PAC.

Eau chaude sanitaire

La part d'eau chaude sanitaire produite par des pompes à chaleur en Suisse en 2015 est de 7%. La valeur de 1,7% en 2000 a été multipliée par plus de quatre sur cette période comme le montre le Tableau 4 [13]. L'évolution montre une tendance favorable à la diminution de l'utilisation du mazout qui reste prédominante et des chauffe-eau électriques qui diminuent également. La part du gaz a repris pour compenser cette tendance. L'utilisation des chauffe-eau solaires a triplé entre 2000 et 2015 mais reste marginale. Le chauffage urbain à distance fournit 1,8% de l'ECS en 2015.



Tableau 4 : Évolution des vecteurs énergétiques pour l'utilisation de l'eau chaude sanitaire dans le parc immobilier suisse [13].

	2000		2010		2015	
	absolu	en %	absolu	en %	absolu	en %
Mazout	555'451	38,0	586'041	35,7	570'302	33,3
Gaz	163'050	11,2	204'192	12,4	224'880	13,1
Electricité	590'932	40,4	649'054	39,5	628'473	36,7
Bois	62'461	4,3	75'379	4,6	83'448	4,9
Pompe à chaleur	25'543	1,7	69'388	4,2	119'289	7,0
Capteur solaire	3'190	0,2	16'029	1,0	36'874	2,2
Chaleur à distance	19'920	1,4	24'629	1,5	30'603	1,8
Autre agent énergétique	8'097	0,6	11'611	0,7	10'025	0,6

2.1.4 Marché des systèmes de chauffage dans les immeubles multifamiliaux

Bâtiments multifamiliaux neufs

Selon l'Office suisse de la statistique, les ménages suisses sont plus souvent locataires que propriétaires. Dans le pays, 56,2% des logements sont occupés par des locataires en 2015 [13]. La Figure 6 illustre l'état des logements occupés en Suisse en 2015.

Le taux de propriétaires, défini comme le taux de logements effectivement occupés par leur propriétaire divisé par le total des logements occupés montre une croissance constante depuis 1970. Ce taux atteint 38,4% en 2015 au niveau national mais présente de grandes disparités d'un canton à l'autre (15% - 56%). La problématique derrière la plus faible proportion de bâtiments occupés par leur propriétaire est qu'en Suisse, les locataires sont responsables du paiement des factures d'énergie, alors qu'il incombe aux propriétaires d'investir dans le système de chauffage. Les coûts d'investissement ne peuvent pas être transmis aux locataires par le biais des factures de chauffage [14]. Actuellement, pour les bâtiments existants, les coûts d'investissement des systèmes de chauffage renouvelables tels que les pompes à chaleur sont de trois à cinq fois plus élevés que les solutions conventionnelles (à base de combustibles fossiles). Les propriétaires ne sont donc pas incités à opter pour les énergies renouvelables.

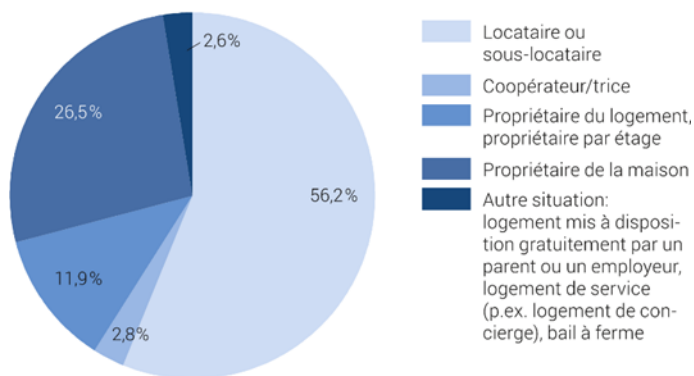


Figure 6 : État des logements occupés en Suisse en 2015 [13].



En 2015, 0,9% de plus de bâtiments à usage d'habitation ont été construits et on observe une augmentation de +7,4% des logements nouvellement construits. Pour cette même année, les nouveaux bâtiments individuels affichent une baisse de -0,6%. La Figure 7 illustre les tendances contrastées des constructions individuelles par rapport aux constructions collectives. La ligne jaune montre les bâtiments nouvellement construits avec l'utilisation des logements. Le rythme des nouvelles constructions s'est ralenti depuis 2004. Comme l'illustre la ligne verte, le nombre de ménages augmente dans les nouvelles constructions depuis 2001. Cela correspond à la construction d'un plus grand nombre de bâtiments multifamiliaux. Enfin, la ligne rouge montre une diminution des nouvelles maisons individuelles depuis 2004.

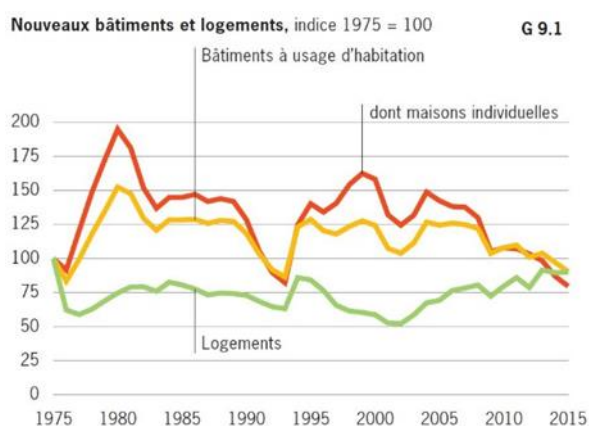


Figure 7 : Évolution des nouveaux bâtiments et logements par rapport aux valeurs de 1975, soit 100. La ligne jaune montre les bâtiments à usage d'habitation, la ligne verte l'évolution des ménages et la ligne rouge les maisons individuelles [13].

Marché des systèmes de chauffage dans les bâtiments multifamiliaux

Le chauffage des locaux

Le marché suisse du chauffage montre que la part des ventes de PAC représente 40,37% en 2016. En comparaison, il y avait 33,58% de chaudières à gaz, 22,58% de chaudières à mazout et 3,47% de chaudières à bois vendues cette année-là [18].

La Figure 8 illustre comment les pompes à chaleur ont augmenté en volume de vente au fil du temps et s'élèvent à 18'472 unités en 2016.

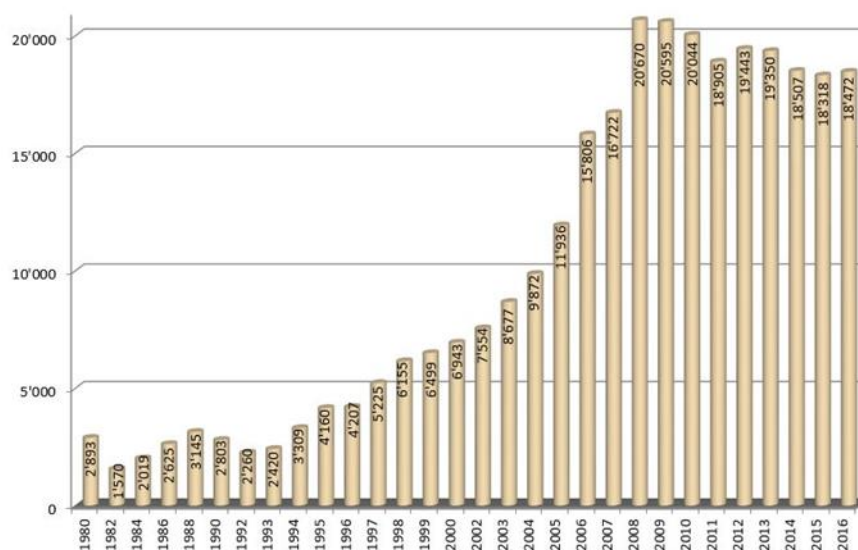


Figure 8 : Évolution des ventes de pompes à chaleur en Suisse de 1980 à 2016 [18].

La Figure 9 montre qu'une part massive du marché des pompes à chaleur en Suisse se situe en dessous de 20 kW. Cette part de 81,2% reflète le marché de l'habitat individuel. Sur les 18'472 pompes à chaleur vendues dans le pays en 2016, seules 3'465 ont des capacités supérieures à 20 kW. Ces dernières sont surtout utilisées pour les immeubles collectifs.

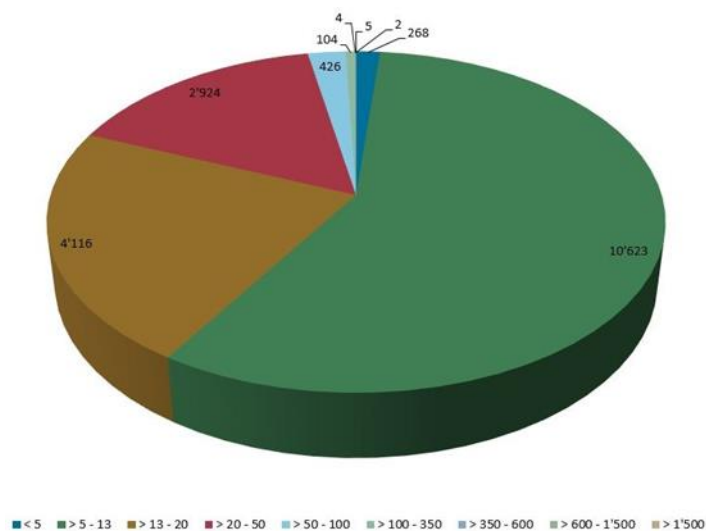


Figure 9 : Nombre de pompes à chaleur vendues par gamme de puissance en kW pour 2016 [SPG].

Chauffage de l'eau sanitaire

Dans presque tous les cas, l'eau chaude sanitaire des maisons multifamiliales est produite par le système de chauffage lui-même. Dans les bâtiments multifamiliaux, il n'y a que quelques cas où un chauffe-eau électrique est remplacé par une pompe à chaleur. Cependant, les cantons encouragent fortement la production d'eau chaude sanitaire par des systèmes solaires thermiques en combinaison avec le système de chauffage.



2.1.5 PAC pour les bâtiments multifamiliaux

PAC pour le chauffage

Dans les zones urbaines, les énergies renouvelables sont le plus souvent limitées ou insuffisantes : pas d'eau de surface comme un lac ou une rivière, ou trop éloignée, ou limitée (protection de l'eau potable), pas de chauffage urbain à proximité, bois interdit à cause de la pollution de l'air, solaire difficile ou impossible (pas de place sur le toit, bâtiment protégé). La seule source renouvelable disponible partout est l'air extérieur. Les pompes à chaleur air-eau sont donc la technologie qui présente le plus fort potentiel pour moderniser les systèmes de chauffage existants et réduire les émissions de CO₂ [19].

Le marché suisse des pompes à chaleur est résumé dans la Figure 10 [18]. Les sections bleues correspondent aux PAC air-eau qui dominent nettement avec 66,8%. Les installations eau glycolée/eau sont représentées en jaune et représentent près d'un tiers des ventes. Les pompes à chaleur eau/eau représentent moins de 2% du marché.

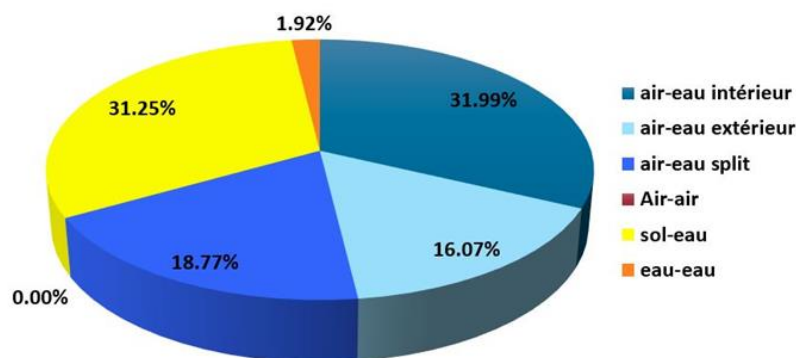


Figure 10 : Répartition détaillée des ventes de pompes à chaleur par type pour 2016 [18].

Pompes à chaleur air-air individuelles

Comme l'illustre la Figure 10, les ventes de pompes à chaleur air-air individuelles représente moins de 0,01% de l'ensemble des ventes annuelles de pompes à chaleur pour 2016 en Suisse. Ce marché est pour ainsi dire inexistant.

Pompes à chaleur air/air VDF (ventilation double-flux) collectives

La tendance des pompes à chaleur air/air VDF collectives suit la même tendance que les produits air/air individuels. Ce type de pompes à chaleur n'est pas présent sur le marché suisse à l'heure actuelle.

Pompes à chaleur géothermiques ou air/eau collectives

L'un des principaux défis techniques est lié à l'indisponibilité des pompes à chaleur air/eau spécialement conçues pour les logements collectifs. La plupart des pompes à chaleur résidentielles ont actuellement une capacité de 3 à 30 kW et sont adaptées aux maisons unifamiliales. La plupart des pompes à chaleur industrielles ont actuellement une capacité de 30 à 600 kW, mais leur niveau sonore est élevé. Pour intégrer la pompe à chaleur dans les immeubles collectifs, il faut trouver des solutions pour augmenter la taille des pompes à chaleur traditionnelles conçues pour les maisons individuelles ou pour adapter des équipements d'application industrielle sur le toit des immeubles collectifs. Parmi les autres défis techniques majeurs, citons l'obtention d'un bon rendement avec l'air extérieur comme source de chaleur, la prise en compte des exigences en matière de bruit et de statique, l'intégration de la pompe à chaleur dans le système de distribution existant de manière efficace et fiable. Parmi les aspects techniques



intégrés dans les études de faisabilité figurent l'ingénierie thermique, la statique en toiture, l'insonorisation, les vibrations, la capacité électrique et les limites de construction en hauteur. La prise en compte des aspects susmentionnés diffère considérablement selon le type de bâtiment et l'âge de la construction [19].

PAC pour l'ECS

Chauffe-eau à pompe à chaleur sur l'air vicié

Très peu de produits sont sur le marché et principalement pour les maisons individuelles. Il existe un nouveau produit pour les maisons multifamiliales.

Chauffe-eau à pompe à chaleur sur l'air extérieur

Les chauffe-eau à pompe à chaleur dédiés sont utilisés uniquement pour les maisons individuelles. Les chauffe-eau collectifs fonctionnant avec des pompes à chaleur à air extérieur que l'on trouve en bâtiments multifamiliaux suivent la tendance des PAC installés dans ce type de logement.

Les pompes à chaleur collectives haute température

Les PAC collectives atteignent des températures où il est intéressant de fournir du chauffage en même temps que de l'ECS à partir d'une même unité. Les PAC eau glycolée/eau présentes sur le marché suisse atteignent des températures de sortie maximales de 73°C (B0/W35) et même 90°C (B15) avec du fluide frigorigène HFO [20]. Les produits air-eau permettent des températures de sortie jusqu'à 70°C-75°C (non garanties toute l'année face à des températures d'air ambiant très froides). Les fluides de travail de ces machines sont le HFC, le HFO ou le propane.

Compte tenu de la puissance nécessaire à la production d'ECS dans les immeubles collectifs, l'utilisation d'un échangeur de chaleur externe est souvent dictée par le fait que la surface d'échange requise pour répondre aux besoins est trop grande pour être intégrée au chauffe-eau. Le cas échéant, un serpentin plongeant est recommandé pour une meilleure efficacité et une réduction des pertes de régulation, de température et de charge.

2.1.6 Références

- [1] Office fédéral de l'énergie (OFEN). (2016). Aperçu de la consommation d'énergie en suisse au cours de l'année 2015. Retrieved from http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00542/00631/index.html?lang=fr&dossier_id=00867
- [2] Office fédéral de l'environnement (OFEV). (2016). Vue d'ensemble des émissions. Retrieved from <http://www.bafu.admin.ch/klima/13879/13880/14486/index.html?lang=fr>
- [3] Office fédéral de l'énergie (OFEN). (2017). Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien – Ausgabe 2016. Retrieved from http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00543/?dossier_id=00772&lang=de
- [4] Office fédéral de l'énergie (OFEN). (2017). Statistique globale suisse de l'énergie 2016. Retrieved from http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00542/00631/index.html?lang=fr&dossier_id=00763
- [5] F. Rognon, CSD Ingénieurs SA. (2013). Own research.
- [6] L'Assemblée fédérale de la Confédération Suisse. (2011). Loi fédérale sur la réduction des émissions de CO₂ 641.71 (Loi sur le CO₂). Retrieved from <https://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/20091310/201301010000/641.71.pdf>



- [7] Le Conseil fédéral Suisse. (2012). Ordonnance sur la réduction des émissions de CO₂ 641.711 (Ordonnance sur le CO₂). Retrieved from <https://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/20120090/201306010000/641.711.pdf>
- [8] Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC). (2016). Politique climatique de la Suisse. Rapport explicatif relatif au projet mis en consultation. Retrieved from https://www.admin.ch/ch/f/gg/pc/documents/2801/Politique-climatique-de-la-Suisse-post-2020_Rapport-expl_fr.pdf
- [9] Services Industriels de Genève (SIG). (2016). éco21 energy efficiency program. Retrieved from <http://www.sig-ge.ch/eco21/Pages/home.aspx>
- [10] Yushchenko, A., & Patel, M. K. (2016). Contributing to a green energy economy? A macroeconomic analysis of an energy efficiency program operated by a Swiss utility. *Applied Energy*, 179, 1304–1320. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.028>
- [11] Cabrera, D., Seal, T., Bertholet, J.-L., Lachal, B., & Jeanneret, C. (2012). Evaluation of energy efficiency program in Geneva. *Energy Efficiency*, 5(1), 87–96. <https://doi.org/10.1007/s12053-011-9110-1>
- [12] Bertholet, J.-L., Cabrera, D., Lachal, B., & Patel, M. K. (2014). Evaluation of an energy efficiency program for small customers in Geneva. In 2014 International Energy Policy & Programme Evaluation Conference (IEPEC). Berlin. Retrieved from [http://www.iepec.org/conf-docs/papers/2014/Jean-Luc Bertholet.pdf](http://www.iepec.org/conf-docs/papers/2014/Jean-Luc%20Bertholet.pdf)
- [13] Office fédéral de la statistique. (2016, 2017). Construction et logement. Retrieved from <https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/construction-logement.html>
- [14] Le Conseil fédéral Suisse. (1990). Ordonnance sur le bail à loyer et le bail à ferme d'habitations et de locaux commerciaux 221.213.11 (OBLF). Retrieved from <https://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/19900092/201407010000/221.213.11.pdf>
- [15] Société suisse des ingénieurs et des architectes. Cahier technique 2040 La voie SIA vers l'efficacité énergétique. SIA 2011.
- [16] Société suisse des ingénieurs et des architectes. Norme SIA 385/1 Installation d'eau chaude sanitaire dans les bâtiments – Bases générales et exigences. SIA 2013
- [17] Prognos AG (2016). Der Energieverbrauch der Privaten Haushalte 2000-2015, Ex-Post-Analyse nach Verwendungszwecken und Ursachen der Veränderungen. BFE.
- [18] Groupement professionnel Suisse pour les pompes à chaleur (GSP). Statistiques 2016. <http://www.fws.ch/statistiques.html>
- [19] F. Rognon (CSD Engineers), A. Yushchenko, M. Rüetschi (Services Industriels de Genève). (2017). Retrofitting fossil-based heating systems with air to water heat pumps in multifamily houses. 12th IEA Heat Pump Conference 2017, Rotterdam.
- [20] Viessmann. (2017). VITOCAL 350-HT PRO Notice pour l'étude. <https://www.viessmann.ch/>
- [21] ait Schweiz AG. (2017). Schéma standard PAC air-eau H-L2-2-2160-1-2-20a.
- [22] Viessmann. (2017). Schéma standard PAC saumure-eau N° HE_Vitocal-350-G-Pro_BW_SPS_BX-E-UV-Z_P_M1-M2-M3.



2.2 Marché des pompes à chaleur dans les maisons à plusieurs logements : situation et opportunités

Le contenu de ce sous-chapitre provient d'un article présenté lors du Symposium du programme de recherche Pompes à chaleur et froid de l'OFEN en 2018 : « Marché des pompes à chaleur dans les maisons à plusieurs logements : situation et opportunités », Nicole Calame, CSD Ingénieurs SA, Fabrice Rognon, CSD Ingénieurs SA.

2.2.1 Résumé

L'air a un rôle important à jouer en tant que ressource renouvelable dans la fourniture de chaleur en milieu urbain. L'intégration de pompes à chaleur (PAC) dans les bâtiments multifamiliaux représente un potentiel important aujourd'hui sous-exploité. Il existe actuellement un manque sur le marché pour des PAC silencieuses permettant de fournir de grandes puissances. Un certain nombre d'autres barrières ont été identifiées sur le plan technique, commercial et légal. Une approche de type contracting énergétique semble prometteuse pour développer ce marché.

2.2.2 Introduction

La transition vers les énergies renouvelables est aujourd'hui une priorité dans beaucoup de pays, notamment européens. La production d'électricité renouvelable a été ciblée en priorité ces dernières années. Les efforts se tournent maintenant vers la fourniture de chaleur durable qui joue un rôle clé pour atteindre les objectifs de réduction d'émissions de CO₂ qui ont été fixés.

Le mouvement de promotion de l'utilisation des pompes à chaleur dans le cadre de la rénovation en Suisse est en marche depuis longtemps. Le Swiss Retrofit Heat Pump Programme lancé dans les années 1990 avait pour but de développer un concept de PAC capable de produire de la chaleur à un niveau suffisant pour permettre le remplacement des chaudières dans le cas d'assainissement de bâtiments existants de petite puissance [1]. Ce projet a clairement stimulé ce segment du marché. Des produits standards sont maintenant disponibles pour les petites puissances et la part de marché des PAC dans les ménages a atteint environ 50% ces dernières années. Cette évolution est très encourageante même si la part concernée par la rénovation est minoritaire. Près de 25 ans plus tard pourtant, la problématique est toujours d'actualité dans les bâtiments de plus grande taille où le recours à la technologie PAC fait encore cruellement défaut.

La proportion d'énergie dévolue au chauffage par rapport aux besoins en eau chaude sanitaire (ECS) dans le cadre de bâtiments existants est largement plus importante dans les bâtiments à plusieurs logements que pour les bâtiments individuels. La Figure 11 illustre clairement cette tendance.

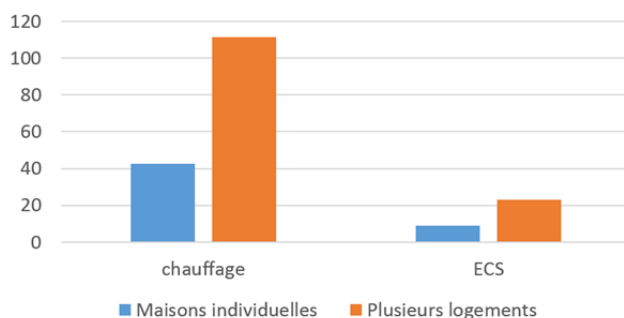


Figure 11 : Besoins thermiques en [PJ] dans le parc immobilier suisse en 2016 selon le type de besoin et le nombre de logements dans le bâtiment [2].



Situation du marché suisse

La part de marché des pompes à chaleur dans les ménages est passée de près de zéro dans les années 1990 à environ 50% aujourd'hui. La proportion actuelle est de 90% pour les maisons mono-familiales contre 10% pour les bâtiments à plusieurs logements [3]. La Figure 12 illustre la distribution des pompes à chaleur sur le marché Suisse du chauffage en 2016. La gamme de puissance jusqu'à 50 kW montre que cette technologie est presque à parité avec les chaudières d'autres types. Au-delà de 50 kW par contre, leur présence est marginale dans la tranche des plus grandes puissances qui concerne notamment les bâtiments multifamiliaux. La part des PAC dans les maisons à plusieurs logements est modeste dans les nouvelles constructions et presque nulle dans les assainissements d'installations existantes.

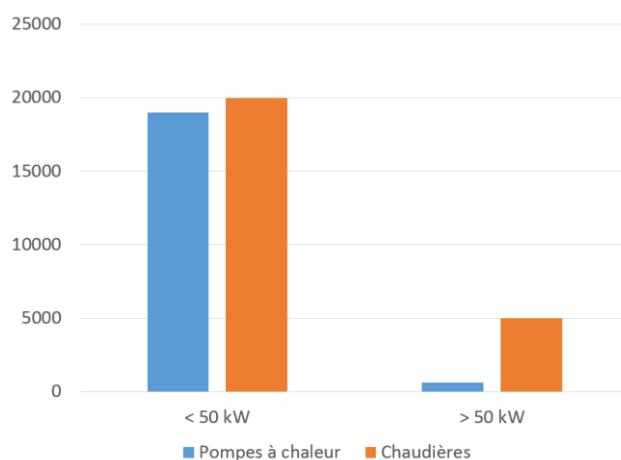


Figure 12 : Marché du chauffage en Suisse pour 2016 selon la gamme de puissance, en nombre d'unités vendues.
Statistique partielle [4].

Pourtant, si les machines de grande puissance sont peu nombreuses, elles représentent un potentiel significatif par unité et promettent un chiffre d'affaire intéressant par rapport aux machines de petite puissance. Le potentiel énergétique et économique que cette part de marché représente est important.

Les statistiques du parc immobilier suisse doivent être abordées avec précaution. En effet à l'échelle du pays, la majorité des bâtiments sont des maisons individuelles. Pourtant, la part de la population vivant dans celles-ci n'est que de 27.7% comme l'illustre la Figure 13 [5]. Ainsi les besoins thermiques issus de près des trois quarts de la population nationale sont générés par des bâtiments multifamiliaux. Le potentiel de développement des énergies renouvelable réside donc en majorité dans les grands bâtiments locatifs puisque ce sont eux qui constituent la plus grande part des besoins thermiques des ménages suisses. Une grande part du marché potentiel pour les PAC se situe ainsi dans les zones urbaines.

D'autre part, ces grandes puissances génèrent de larges émissions de CO₂, que le pays s'est engagé à diminuer selon la Stratégie Énergétique 2050. Il s'agit donc d'une problématique à la fois importante et urgente à adresser.

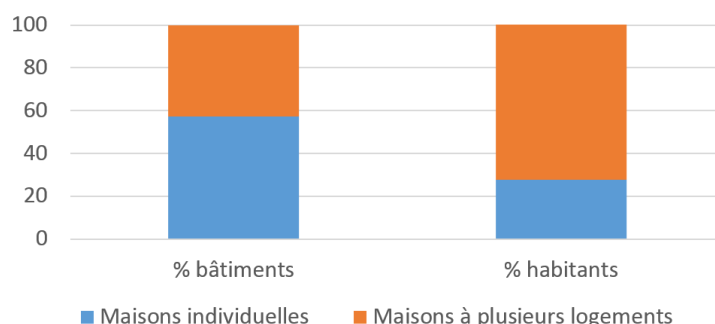


Figure 13 : Répartition du parc immobilier selon maison individuelle ou à plusieurs logements, en pourcentage du nombre de bâtiment et en pourcentage de la population résidente pour 2016 [5].

Les ressources renouvelables disponibles en zone urbaine peuvent varier fortement. En effet une ville située au bord d'un lac disposera d'un large potentiel de chaleur qui peut être produit à partir de cette ressource. Les sondes géothermiques verticales sont sujettes aux autorisations de forage et ne peuvent pas être utilisées dans toutes les zones. D'autre part, le bois ne peut être considéré que si le milieu urbain n'est pas déclaré en zone d'émissions excessives. Ainsi le panachage des ressources varie en fonction du contexte local. Seul l'air est disponible partout, en tout temps et sans restrictions. Dans le cadre de scénarios durables mais économiquement et politiquement réalistes, il faut toujours y recourir pour couvrir l'entier des besoins. Sa part varie selon les cas de quelques pourcents à 30% [6]. À titre d'exemple, la Figure 14 illustre les ressources disponibles pour deux communes du plateau suisse d'environ 12'000 habitants chacune qui ne disposent pas d'accès à un lac. La Commune 1 peut exploiter la géothermie alors que la Commune 2 n'a pas moyen d'y recourir. La part correspondant aux machines fonctionnant sur l'air est indiquée en vert.

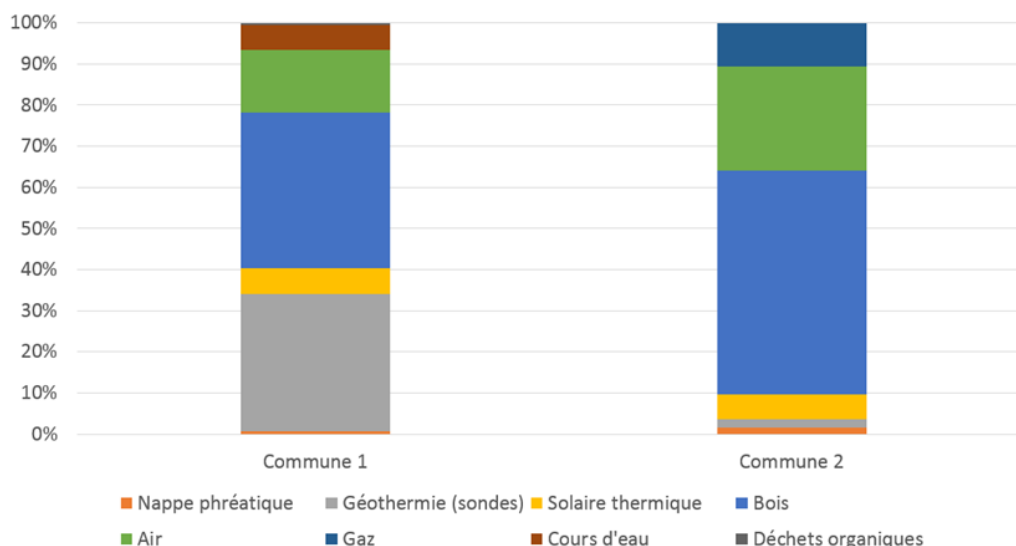


Figure 14 : Couverture des besoins utiles de deux communes selon des scénarios durables à l'horizon 2050, pourcentage des sources disponibles [6].

Ainsi l'air ambiant a un rôle clé à jouer dans la transition vers les énergies renouvelables dans les zones fortement urbanisées.



Lacunes du marché

Lors de projets concrets, les ingénieurs se heurtent au manque de disponibilité sur le marché de produits standards adaptés aux contraintes d'une application dans le contexte des bâtiments multifamiliaux. Les unités de plus de 20 kW à -7°C atteignent ou dépassent typiquement 60 dB(A). La combinaison de plusieurs machines pour atteindre la puissance nécessaire induit un cumul des émissions sonores qui peuvent alors largement dépasser les valeurs admissibles légalement. Pour mémoire, l'ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB) fixe les valeurs limite d'immissions sonores à 55 dB(A) en zone 3 (zone mixte) et 50 dB(A) en zone 2 (zone d'habitation) [4].

D'un autre côté, les machines conçues pour une application industrielle ont l'avantage d'exister dans une gamme de puissance adaptée (environ 50 kW à 500 kW). Elles génèrent par contre une puissance acoustique entre 70 dB(A) et 80 dB(A) ce qui pose problème pour son intégration dans le voisinage.

En conclusion, il n'existe actuellement pas de machines d'au-moins 50 kW et d'une puissance acoustique inférieure à 60 dB(A), idéalement autour de 50 dB(A).

Barrières et opportunités

Barrières technico-commerciales

Au-delà du manque de machines adéquates en termes acoustiques et de capacité suffisante pour l'application souhaitée, il existe d'autres barrières qui entravent une plus large application des pompes à chaleur dans le contexte des bâtiments à plusieurs logements. L'encombrement est un aspect critique, surtout s'il faut recourir à plusieurs machines. Lors de projets d'assainissements, les locaux techniques existants n'ont pas forcément la place d'accueillir des installations volumineuses. De plus, lorsqu'il est nécessaire d'implanter des machines en toiture, leur masse peut s'avérer décisive pour le succès du projet. Il serait donc souhaitable que les PAC soient aussi compactes et légères que possible.

L'efficacité des pompes à chaleur est dépendante de la température de l'air ambiant. Des températures extérieures basses sur de longues périodes induisent une péjoration du rendement et surtout une réduction de la puissance ce qui peut rendre pertinent un appoint selon la zone climatique et/ou les températures de distribution nécessaires.

De manière analogue une température de distribution trop élevée dans un système existant peut péjorer l'efficacité, voir être impossible à atteindre pour une PAC. Là aussi un appoint par chaudière constitue une solution pragmatique.

Les coûts d'exploitation sont fortement dépendants de l'efficacité de la pompe à chaleur, d'où l'importance de l'exploiter dans de bonnes conditions de fonctionnement.

Sur le plan technique, il y a un manque de solutions standard pour les grandes puissances, notamment dans le cadre d'applications bivalentes avec un autre producteur de chaleur. En effet, dans la rénovation d'installations existantes, il faut composer avec les éléments disponibles pour optimiser les coûts. Le remplacement complet en une fois de la totalité de l'installation n'est en général financièrement pas viable. Le marché quasi-inexistant lié aux PAC dans les bâtiments à plusieurs logements n'a à l'évidence pas encore poussé les fournisseurs à élaborer des schémas standards incluant des machines sur l'air.

Un projet de rénovation de chauffage à l'échelle d'un bâtiment multifamilial se traduit par un projet plus global que le simple remplacement d'une chaudière par une autre. La maîtrise des « travaux annexes » n'est pas à sous-estimer. En effet, selon la configuration (par exemple PAC en toiture) et le nombre d'étages, ceux-ci peuvent représenter jusqu'à la moitié du budget et demandent des compétences qui vont bien au-delà du simple raccordement du nouvel appareil par l'installateur.



Cadre légal

La plus grande part de la fourniture de chaleur en Suisse (75%) est d'origine fossile. Celle-ci inclut 40% de mazout, 33% de gaz naturel et 2% de charbon [8, 9]. La Confédération vise 20% de réduction des émissions globales de CO₂ et 40% de réduction des émissions liées aux bâtiments en 2020 par rapport à 1990 [10, 11, 12]. En 2014, les émissions de dioxyde de carbone étaient réduites de 9% par rapport aux valeurs de 1990. Dans les bâtiments, le chiffre se monte à 30%. Il reste encore environ 5.2 millions de tCO₂-éq. à économiser d'ici 2020. Divers instruments réglementaires tels que la taxe sur le CO₂ et le programme fédéral de subsides Programme Bâtiment ont été mis en place pour atteindre la baisse des émissions fixée et promouvoir des solutions renouvelables. Toutefois, il a été reconnu officiellement que ces solutions ne sont pas suffisantes pour atteindre le seuil d'émissions de CO₂ visé.

En plus des réglementations fédérales, certains cantons entreprennent des actions pour promouvoir des solutions renouvelables liées au chauffage. Dans le canton de Genève par exemple, les Services Industriels (SIG) sont mandatés par le canton pour soutenir le développement des ressources renouvelables auprès des consommateurs (bâtiments mono- et multifamiliaux). Ce support est implémenté via le programme d'efficacité énergétique des SIG éco21 [13-16]. Dans le cas des maisons individuelles, éco21 offre des subsides à hauteur de 10% des coûts d'investissement initiaux. Ce type de soutien n'est pas applicable dans le cas des bâtiments à plusieurs logements du fait de singularités dans le droit du bail en Suisse.

En Suisse d'un point de vue législatif, les projets d'assainissement de bâtiments à plusieurs logements se heurtent au droit du bail. Contrairement au secteur individuel, une large majorité des habitants de bâtiments multifamiliaux sont locataires [5]. Selon la loi suisse, ces derniers ont à leur charge les coûts d'énergie et de maintenance alors que le propriétaire est responsable des investissements initiaux du système de chauffage et n'a aucun droit de les répercuter aux locataires sur leurs factures d'énergie [17]. Ainsi lors de la rénovation d'une chaufferie, l'investissement supplémentaire généré par une variante technologique efficiente et renouvelable incombe au propriétaire de l'immeuble. Par contre, la répercussion sur les économies d'énergie est totalement au bénéfice des locataires qui paieront moins de charges. Ce schéma n'incite pas les investissements dans un système comprenant des PAC, plus efficient mais également plus onéreux lors de l'installation et qui ne bénéficie au final pas financièrement à celui qui le paie.

Une possibilité de remédier à ce problème serait d'appliquer le principe de contracting énergétique et /ou de financer des transformations par un contrat de performance énergétique (CPE). Toutefois cette solution n'est que peu répandue en Suisse. Le nombre limité d'acteurs de ce type sur le marché national et le manque d'expérience dans l'implémentation d'énergies renouvelables ne joue pas en faveur de ce modèle.

La demande d'autorisation nécessaire auprès des autorités cantonales lors du remplacement d'une chaudière par une PAC air-eau est un autre aspect légal qui constitue un frein au développement. Cette démarche n'est en effet pas requise lors du remplacement d'une chaudière par une chaudière du même type. Un certain nombre de normes doivent également être satisfaites sur les aspects du niveau sonore, de la conformité électrique et de la sécurité incendie. Ces démarches ont un coût significatif qui augmente d'autant le budget d'un projet de chaleur renouvelable.



Défis et opportunités de développement

Des barrières identifiées découlent deux défis principaux :

- a) technique avec des unités de >50 kW silencieuses et faciles à intégrer et
- b) commercial avec une offre susceptible de plaire aux propriétaires : la rénovation doit être un produit complet qui comprend toutes les prestations et les procédures nécessaires.

Malgré ce contexte contraignant, des expériences pilotes menées par SIG montrent que des projets exemplaires sont possibles avec les produits actuels et réalisés dans un cadre exigeant.

2.2.3 Conclusion et perspectives

L'air en tant que ressource renouvelable joue un rôle important dans la transition énergétique de la fourniture de chaleur en milieu urbain. L'intégration de PAC dans les bâtiments multifamiliaux représente un potentiel important aujourd'hui sous-exploité. Les lacunes du marché décrites plus haut se traduisent en opportunités de développement pour des produits adaptés qui permettront de stimuler les projets de ce type. La réduction des émissions de CO₂ liées au remplacement de chaudières à combustible fossile constitue un moteur en soi pour la promotion de ce type d'installation de grande puissance. Un certain nombre de barrières existent sans être pour autant insurmontables. L'expérience montre que le droit du bail est un sujet politiquement difficile. Nous sommes d'avis que le développement d'offres de type contracting énergétiques et les programmes tels que éco21 sont les plus prometteurs dans ce marché. Le projet AirBiVal s'inscrit dans la perspective d'étendre le PAC Système Module pour des puissances plus élevées et fournir ainsi des outils permettant de promouvoir une plus large application des PAC dans les bâtiments à plusieurs logements.

2.2.4 Références

- [1] M. Zogg, 2002, The Swiss Retrofit Heat Pump Programme, 7th IEA Heat Pump Conference, Beijing.
- [2] Prognos AG : Der Energieverbrauch der Privaten Haushalte 2000-2015, Ex-Post-Analyse nach Verwendungszwecken und Ursachen der Veränderungen. BFE, 2016.
- [3] Groupement professionnel Suisse pour les pompes à chaleur (GSP) : Statistiques 2016, <http://www.fws.ch/statistiques.html>
- [4] Gebäude Klima Schweiz (GKS), 2016, Statistik für Heizkessel, Brenner, Wärmepumpen, Solaranlagen, Energiespeicher, Warmwasserwärmer.
- [5] Office fédéral de la statistique (OFS), 2016, 2017, Construction et logement, <https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/construction-logement.html>
- [6] CSD Ingénieurs SA, 2017 Documents d'études.
- [7] Le Conseil Fédéral Suisse : Ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB) 814.41, <https://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/19860372/201601010000/814.41.pdf>
- [8] OFEN, 2016, Aperçu de la consommation d'énergie en Suisse au cours de l'année 2015, http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00542/00631/index.html?lang=fr&dossier_id=00867



- [9] OFEN, 2016, Vue d'ensemble des émissions, <http://www.bafu.admin.ch/klima/13879/13880/14486/index.html?lang=fr>
- [10] L'Assemblée fédérale de la Confédération Suisse, 2011, Loi fédérale sur la réduction des émissions de CO₂ 641.71 (Loi sur le CO₂), <https://www.admin.ch/opc/fr/classifiedcompilation/20091310/201301010000/641.71.pdf>
- [11] Le Conseil fédéral Suisse, 2012, Ordonnance sur la réduction des émissions de CO₂ 641.711 (Ordonnance sur le CO₂), <https://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/20120090/201306010000/641.711.pdf>
- [12] Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC), 2016, Politique climatique de la Suisse. Rapport explicatif relatif au projet mis en consultation, https://www.admin.ch/ch/f/gg/pc/documents/2801/Politiqueclimatique-de-la-Suisse-post-2020_Rapport-expl_fr.pdf
- [13] Services Industriels de Genève (SIG), 2016, éco21 energy efficiency program, <http://www.sig-ge.ch/eco21/Pages/home.aspx>
- [14] Yushchenko, A., & Patel, M. K. 2016, Contributing to a green energy economy? A macroeconomic analysis of an energy efficiency program operated by a Swiss utility. *Applied Energy*, 179, 1304-1320, <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.028>
- [15] Cabrera, D., Seal, T., Bertholet, J.-L., Lachal, B., & Jeanneret, C., 2012, Evaluation of energy efficiency program in Geneva. *Energy Efficiency*, 5(1), 87-96. <https://doi.org/10.1007/s12053-011-9110-1>
- [16] Bertholet, J.-L., Cabrera, D., Lachal, B., & Patel, M. K. 2014, Evaluation of an energy efficiency program for small customers in Geneva. In 2014 International Energy Policy & Programme Evaluation Conference (IEPEC). Berlin, [http://www.iepec.org/confdocs/papers/2014/Jean-Luc Bertholet.pdf](http://www.iepec.org/confdocs/papers/2014/Jean-Luc%20Bertholet.pdf)
- [17] Le Conseil fédéral Suisse, 1990, Ordonnance sur le bail à loyer et le bail à ferme d'habitations et de locaux commerciaux 221.213.11 (OBLF), <https://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/19900092/201407010000/221.213.11.pdf>



2.3 Pompes à chaleur air-eau pour la rénovation des systèmes de chauffage dans les zones urbaines : comprendre un défi à plusieurs facettes

Le contenu de ce sous-chapitre est tiré de la traduction d'un article présenté lors de la conférence CISBAT en 2019 et a été publié dans Journal of Physics Conference Series 1343 012079 : "Air to water heat pumps for heating system retrofit in urban areas: understanding the multi-faceted challenge", Nicole Calame, Alisa Freyre, Fabrice Rognon, Simon Callegari, Matthias Rüetschi.

2.3.1 Résumé

L'air a un rôle important à jouer en tant que ressource renouvelable pour fournir de la chaleur dans les zones urbaines. La mise en œuvre de pompes à chaleur dans les bâtiments multifamiliaux représente un potentiel de développement important et sous-exploité. La comparaison financière des coûts de chauffage en fonction de la taille du bâtiment et de la technologie de production de chaleur montre comment les projets de rénovation avec des pompes à chaleur air/eau se comparent au gaz. Un retour d'expérience basé sur des projets pilotes présente les différents défis rencontrés et propose des solutions.

2.3.2 Introduction

La transition énergétique vers les ressources renouvelables est actuellement une priorité dans de nombreux pays. Après avoir mis l'accent sur la production d'électricité verte, les efforts se concentrent désormais sur la fourniture de chaleur durable, qui joue un rôle clé dans la réalisation des objectifs de réduction des émissions de CO₂.

Les études de faisabilité ont révélé les difficultés pour les propriétaires d'augmenter la part des énergies renouvelables dans un contexte urbain : le solaire n'est pas techniquement réalisable (vieux toit compliqué, bâtiment sous protection du patrimoine historique, pas d'espace disponible pour le stockage de l'eau), les installations géothermiques, à bois et à biomasse ne sont pas autorisées par la loi en raison des réglementations sur la protection de l'eau et de l'air. Les pompes à chaleur air-eau (PAC) sont donc souvent la seule solution réalisable pour fournir de l'énergie renouvelable aux bâtiments à des fins de chauffage lorsque le chauffage urbain à distance ne couvre pas la zone. L'air ambiant a donc un rôle important à jouer en tant que ressource renouvelable pour la production durable de chaleur dans les zones urbaines.

État actuel dans le canton de Genève, Suisse

L'énergie thermique produite pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire en Suisse est responsable d'environ 30% des émissions de CO₂ du pays [1]. Le parc immobilier bâti du canton de Genève compte environ 44'000 bâtiments résidentiels, dont 58% sont des maisons individuelles. Cependant, la part de ces villas atteint moins de 30% de la puissance installée dans le canton (2,24 GW au total) [2] [3]. Un important potentiel d'amélioration réside dans la modernisation des unités de production de chaleur des grands bâtiments multifamiliaux (MFB) qui totalisent 1,58 GW. La capacité de chauffage totale des bâtiments résidentiels représente environ 64% de toutes les constructions à Genève. Les ressources énergétiques utilisées aujourd'hui sur l'ensemble du canton de Genève pour le chauffage des bâtiments se répartissent comme suit : 51% de gaz, 32% d'huile de chauffage, 12% de chauffage à distance et 5% d'autres ressources.



2.3.3 Comparaison financière en fonction de la technologie et de la taille du bâtiment

Méthodologie

Afin de comparer les coûts de chauffage des projets de rénovation, les deux axes suivants sont proposés dans un récent travail de thèse [4] : comment les pompes à chaleur air/eau (A/E), eau/eau (E/E) et géothermique (G/E) se comparent-elles aux chaudières à gaz et quel est l'impact de la taille du bâtiment sur les coûts. Trois catégories ont été définies pour cette dernière question : maisons unifamiliales, maisons multifamiliales de taille moyenne et grandes maisons multifamiliales. Les hypothèses pour chaque catégorie sont présentées dans le Tableau 5 ci-dessous. Le champ d'application de cette étude ne s'étend pas aux maisons nouvellement construites où la température de distribution de la chaleur est plus basse et où le rapport entre les besoins en eau chaude sanitaire (ECS) et les besoins en chauffage est beaucoup plus élevé.

Le calcul des coûts de chauffage tient compte de l'efficacité de la technologie, de l'investissement initial (y compris l'annuité), de l'entretien, du coût de l'énergie (sans taxe sur le CO₂) et de la taxe sur le CO₂ pris séparément [4].

Tableau 5 : Hypothèse pour le calcul financier en fonction du type de bâtiment. SRE : surface de plancher chauffée, IDC : demande énergétique annuelle spécifique [4].

Building type	Heat + DHW [kWh/yr]	SRE [m ²]	IDC [MJ/m ² /yr]	Thermal power [kW]	Gas price [CHF/kWh]	Electricity price [CHF/kWh]	Interest rate [%]
Single family	26'400	198	480	23	0.090	0.212	4.5
Average MFB	225'000	1'700	476	113	0.080	0.205	4.5
Big MFB	500'000	3'750	480	250	0.075	0.160	4.5

Résultats de la comparaison des coûts de chauffage

Les résultats des calculs sont présentés dans les graphiques ci-dessous. Leur correspondance avec les valeurs de retour sur le terrain est satisfaisante [5]. La Figure 15 donne un aperçu de la manière dont la pompe à chaleur air/eau est effectivement la solution la plus rentable dans un projet de rénovation d'un bâtiment unifamilial, d'environ 6,3 % (0,16 CHF/kWh) par rapport à une chaudière à gaz (0,17 CHF/kWh) et une pompe à chaleur géothermique (0,17 CHF/kWh). Par rapport au gaz, l'investissement initial plus élevé est compensé par des coûts d'entretien et d'énergie plus faibles sur la durée d'exploitation.



Figure 15 : Coûts de chauffage dans un bâtiment unifamilial pour une chaudière à gaz (à gauche), une chaudière air/eau (au milieu) et une chaudière géothermique (à droite). Le graphique à barres représente les investissements et la ligne orange les coûts de chauffage



Les résultats pour les bâtiments multifamiliaux moyens et grands (tous deux présentés dans la Figure 16) suivent des tendances comparables avec des coûts de chauffage similaires malgré la grande différence entre leurs montants d'investissement. Les solutions de pompes à chaleur sont globalement plus coûteuses, notamment parce qu'il n'existe pas actuellement de solution standardisée proposée par les fournisseurs pour les bâtiments résidentiels. La similitude des résultats entre les maisons de taille moyenne et les grandes maisons s'explique par les mêmes défis et la même complexité de projet que ceux rencontrés lors de la mise à l'échelle des pompes à chaleur pour les grands bâtiments multifamiliaux. Ces aspects sont abordés au chapitre 3.

La Figure 17 donne un aperçu des performances d'une technologie en termes de coûts en fonction de la taille du bâtiment. Le graphique de gauche montre que les bâtiments de taille moyenne sont les moins favorables aux projets de pompes à chaleur air/eau (0,17 CHF/kWh), avec des coûts de chauffage plus élevés que ceux des bâtiments plus petits (0,16 CHF/kWh) ou plus grands (0,15 CHF/kWh). Comme prévu, les chaudières à gaz indiquées à droite sont de moins en moins chères à mesure que leur taille augmente.

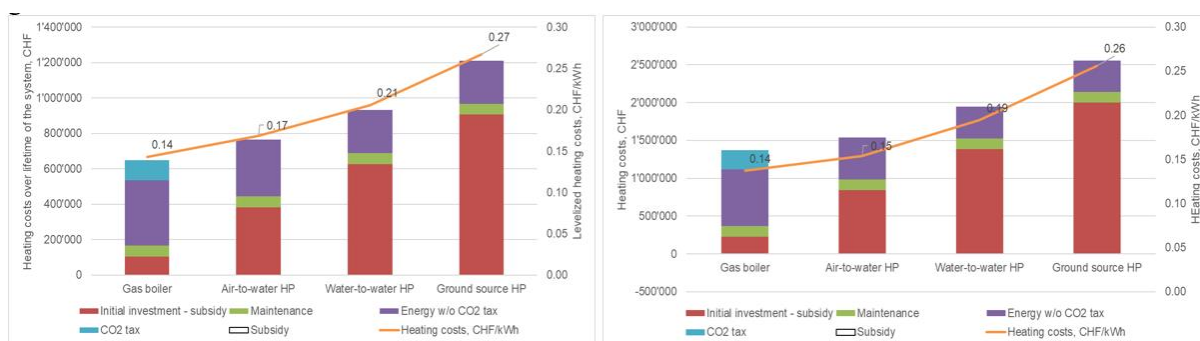


Figure 16 : Coûts de chauffage pour des bâtiments multifamiliaux moyens (à gauche) et grands (à droite) selon la technologie : chaudière à gaz, air-eau HP, eau-eau HP et géothermie HP. Le graphique à barres se réfère aux investissements et la ligne orange aux coûts de chauffage en CHF/kWh [4].

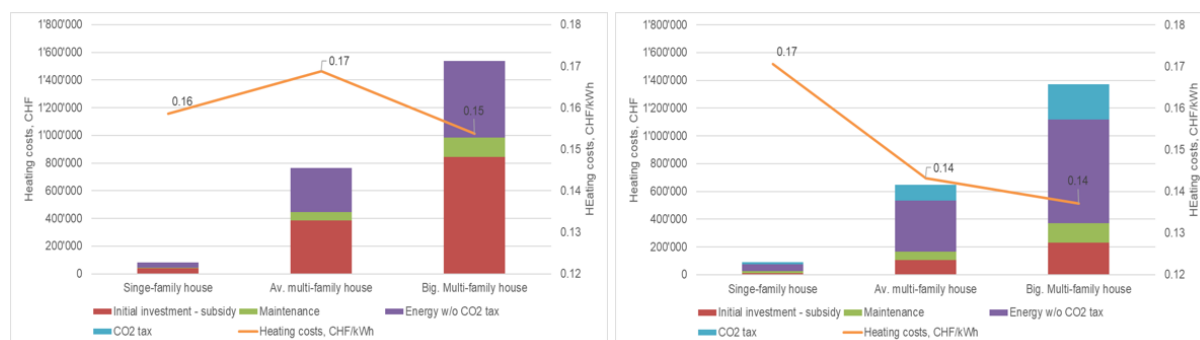


Figure 17 : Coûts de chauffage pour les pompes à chaleur air/eau (à gauche) et le gaz (à droite) pour une maison individuelle, une maison multifamiliale moyenne et une grande maison multifamiliale. Le graphique à barres se réfère aux investissements et la ligne orange aux coûts de chauffage en CHF/kWh [4].

On peut donc en tirer des recommandations quant à la solution technique la plus économique en fonction du type de bâtiment. Pour les villas, les solutions de pompes à chaleur A/E standardisées disponibles sur le marché sont désormais compétitives par rapport au gaz. Pour les immeubles collectifs moyens et grands, les pompes à chaleur A/E et G/E restent beaucoup plus chères que les installations au gaz. Les projets de pompes à chaleur air/eau dans les grands bâtiments (Figure 17, à gauche)



impliquent des solutions sur mesure comprenant des aspects tels que l'acoustique, la statique, la connexion électrique, les schémas hydrauliques qui entraînent des coûts supplémentaires. Ces complications augmentent le coût de l'investissement initial en plus de la pompe à chaleur elle-même qui est environ trois fois plus chère que la chaudière à gaz. Les investissements initiaux pour une installation de pompe à chaleur A/E sont 3 à 6 fois plus élevés en bâtiment multifamiliaux par rapport à un système de chauffage au gaz : le renforcement électrique peut augmenter le coût total de 30%, l'isolation acoustique peut augmenter le coût total de 20% et les schémas statiques et hydrauliques peuvent augmenter le coût total de 20% supplémentaires. Dans le cas des grands immeubles multifamiliaux, cependant, le prix moins élevé du marché de l'électricité compense ces aspects, les coûts de chauffage (0,15 CHF/kWh) étant même moins élevés que pour les maisons individuelles, malgré un investissement plus important. Ce n'est pas le cas pour les bâtiments résidentiels de taille moyenne qui représentent une part importante du parc immobilier construit et pour lesquels les systèmes de chauffage devront être remplacés. Cette catégorie pourrait faire l'objet de subventions afin de favoriser l'émergence d'un plus grand nombre de projets renouvelables dans les zones urbaines.

2.3.4 Retour d'information et diffusion

Retour d'expérience sur des projets de maisons multifamiliales

La rénovation d'une pompe à chaleur dans le contexte d'un grand immeuble résidentiel consiste en un projet à multiples facettes. Les sous-chapitres suivants soulignent certains des aspects rencontrés, proposent des solutions et présentent les projets pilotes en cours à Genève.

Défis techniques et économiques

Ces obstacles concernent les bâtiments multifamiliaux de taille moyenne à grande dans lesquels les pompes à chaleur sont destinées à une rénovation car des solutions standardisées sont déjà disponibles pour les maisons individuelles (produits, schémas hydrauliques standard). Il y a actuellement un manque de pompes à chaleur silencieuses (< 60 dB (A) de puissance acoustique) et de grande taille (50-100 kW/module) sur le marché [6]. L'ingénieur est donc confronté à deux choix pour fournir une grande capacité de chauffage avec les pompes à chaleur disponibles : soit mettre à l'échelle les petites installations et mettre en cascade plusieurs modules PAC, soit se tourner vers des produits industriels plus grands qui ne sont pas conçus pour un usage résidentiel (bruit, vibrations). Les schémas hydrauliques doivent être développés spécifiquement avec le fabricant afin d'intégrer de manière fiable les pompes à chaleur avec les contraintes des systèmes de distribution de chaleur et d'eau chaude sanitaire existants. Pour une implantation en toiture ou dans de petits locaux techniques existants, les dimensions et le poids des grosses machines sont également critiques. Les aspects statiques, acoustiques et vibratoires doivent être pris en compte. La complexité de tels projets implique une bonne gestion des travaux annexes qu'il ne faut pas sous-estimer. Cela se reflète également dans les investissements initiaux qui sont environ 3 à 6 fois plus élevés que ceux des systèmes de chauffage à base de combustibles fossiles. La température de distribution élevée dans les bâtiments existants peut être fournie par des pompes à chaleur, bien qu'elle ait un impact sur le rendement de la machine, tout comme le climat local. Un complément de production au gaz (en conservant une installation existante par exemple) peut être une solution pragmatique pour garantir la satisfaction de l'ensemble des besoins de chauffage sur l'année sans surdimensionnement, bien que de grandes installations de pompes à chaleur monovalentes soient réalisées aujourd'hui [5]. Par ailleurs, le raccordement électrique du bâtiment pourrait devoir être renforcé en raison de la puissance massive absorbée par les PAC.



Droit Suisse du bail

Contrairement au secteur du logement individuel, les grands immeubles sont principalement habités par des locataires [1]. Ces derniers paient leurs factures d'énergie mais aucun investissement dans un système de chauffage renouvelable tel qu'une pompe à chaleur ne peut leur être transmis. En revanche, les locataires bénéficieraient de charges énergétiques moins élevées grâce à un tel remplacement. Les propriétaires ne sont donc pas incités à opter pour les énergies renouvelables. Un système de contrat d'énergie (ESCO) a été mis en place à Genève par les Services Industriels de Genève (SIG), dans le cadre de son programme énergétique éco21, pour aider à réaliser de tels projets [7]. Cette solution s'adresse en particulier aux pompes à chaleur air/eau, car elles représentent la solution la plus adaptée en milieu urbain.

Procédures légales

Il n'y a pas de procédure administrative pour remplacer un système existant (fioul ou gaz) par un système similaire, c'est assez simple. L'installation d'une pompe à chaleur, quelle qu'elle soit, implique de passer par un processus de demande avec une requête officielle. Cette demande circule dans tous les bureaux concernés de l'administration : énergie, environnement, sécurité et sûreté de la population, protection des monuments et sites historiques... Chaque bureau donne un avis. Si l'un d'entre eux émet un avis négatif, la demande est rejetée. En ville de Genève, il y a 14 formulaires différents à remplir. Les procédures administratives nécessaires à la rénovation des pompes à chaleur sont donc inadaptées par rapport à la volonté de se tourner vers une production de chaleur durable. Le blocage des projets portés par les propriétaires d'entreprises est préjudiciable à un développement plus large et nécessaire dans cette direction.

Écart de performance avec les données des fournisseurs de pompes à chaleur

La question se pose de savoir dans quelle mesure la valeur de performance (COP) fournie par un fournisseur de pompes à chaleur est réellement représentative du comportement de la machine qui peut être mesuré ultérieurement pendant son fonctionnement. Un récent mémoire de maîtrise basé sur l'analyse in situ de 12 villas à Genève [8] a évalué cet écart de performance. Des pompes à chaleur installées dans trois maisons unifamiliales non rénovées et non isolées ont été surveillées pendant plusieurs mois afin de recueillir des données sur le rendement pour une gamme de températures extérieures représentatives de ce que l'on peut rencontrer à tout moment de l'année. Les valeurs ont ensuite été projetées sur le profil d'une année de chauffage typique sur la base des efficacités mesurées. Les résultats tracés dans la Figure 18 montrent une correspondance satisfaisante avec le COP annoncé par le fournisseur (ligne rouge). Les points bleus indiquent les valeurs horaires mesurées tandis que les cercles noirs correspondent aux valeurs journalières. Les COP mesurés se situent entre 2,9 et 3,1, ce qui est légèrement inférieur aux valeurs annoncées par le fournisseur. Les écarts de rendement annuel (COPA) pour les trois sites sont de -6,7% (pour 44,9 MWh), -4% (pour 37,2 MWh) et -14% (pour 27,1 MWh). L'expérience montre que les écarts les plus importants par rapport aux performances attendues sont plus susceptibles de provenir de la phase de réalisation, qui doit faire l'objet d'un suivi attentif. Des difficultés peuvent apparaître lors du suivi et une période de rodage de plusieurs mois devrait être accordée pour fixer et optimiser l'installation jusqu'à ce que les résultats puissent être considérés comme définitifs.

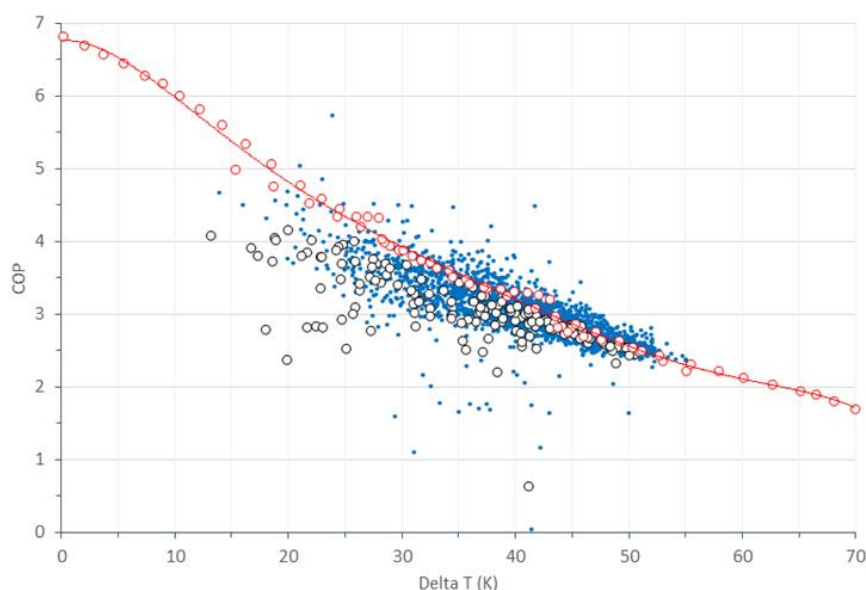


Figure 18 : Performance mesurée de la pompe à chaleur (nuage de points : valeurs horaires en points bleus, valeurs journalières en cercles noirs) comparée au COP annoncé par le fournisseur (ligne rouge) [8].

Études de cas en cours d'analyse

Trois projets pilotes visant à remplacer les systèmes de chauffage fossiles par des pompes à chaleur air-eau dans des immeubles multifamiliaux à Genève sont réalisés par SIG dans le cadre de son portefeuille de programmes énergétiques éco21 [5]. Les projets sont mis en œuvre avec un propriétaire de 600 bâtiments à Genève, qui a l'obligation légale de réduire la consommation d'énergie et/ou d'augmenter la part des énergies renouvelables dans son parc immobilier. Les études de faisabilité ont révélé que les pompes à chaleur air-eau sont la seule solution pour fournir de l'énergie renouvelable aux bâtiments. Trois différents types de bâtiments multifamiliaux ont été choisis pour les projets pilotes, qui représentent les types de construction les plus courants à Genève (sans isolation thermique spécifique). Le défi est de taille : les bâtiments et leurs systèmes de distribution sont anciens, l'espace disponible est limité et les coûts d'investissement sont élevés, ce qui nécessite une production d'énergie très efficace.

Deux des projets (immeubles de 53 et 68 appartements) ont été réalisés et sont actuellement en cours de suivi, montrant ainsi que ce type de solution renouvelable est techniquement et économiquement réalisable grâce à une ingénierie de qualité, des efforts d'optimisation des coûts et des contrats d'énergie qui ont permis de lever les barrières légales et financières.

Les principaux défis techniques sont l'intégration des installations en toiture (accès difficile, calculs statiques de déformation, transmission de vibrations solides, ajustement de l'infrastructure en toiture pour résister aux forces de compression, conformité légale en matière d'incendie) ; la fourniture de la totalité de la demande de chaleur (pompes à chaleur seules ou système bivalent) ; le développement de schémas hydrauliques spécifiques (systèmes fiables et efficaces, optimisation du point de commutation de la chaudière à gaz existante) ; les machines disponibles (pompes à chaleur standard en cascade, insonorisation des installations industrielles). Il est intéressant de noter qu'une "optimisation" effectuée par un installateur dans un cas a conduit à de moins bonnes performances. La raison en est qu'il a recherché la fiabilité mais pas l'efficacité. Ces deux aspects doivent bien sûr être pris en compte ensemble.



Diffusion

La rénovation des systèmes de production de chaleur avec des pompes à chaleur dans les grands bâtiments est un projet nécessairement transdisciplinaire. Les retours d'expérience ont été rassemblés dans un guide pratique visant à diffuser les bonnes pratiques et à soutenir les projets futurs. Le document intitulé "Vademecum pour les pompes à chaleur air-eau en toiture" a été conçu et rédigé conjointement par SIG et CSD Ingénieurs SA suite aux deux projets pilotes menés ensemble et a été soutenu par la confédération suisse [9].

2.3.5 Discussion et recommandations

Il existe un potentiel important et sous-exploité pour les pompes à chaleur air/eau dans les zones urbaines. Ces projets peuvent contribuer efficacement à atteindre les objectifs environnementaux en réduisant les émissions de CO₂ des chaudières à combustible fossile.

Les résultats de l'étude montrent que les coûts de chauffage des maisons unifamiliales sont aujourd'hui plus intéressants pour les pompes à chaleur air-eau, malgré des investissements initiaux plus élevés que pour les chaudières à gaz. Les bâtiments multifamiliaux de taille moyenne représentent financièrement le cas le plus défavorable pour l'intégration des pompes à chaleur. Les contrats d'énergie se sont avérés être un outil efficace pour permettre la réalisation de projets dans les bâtiments multifamiliaux.

La rénovation de grands bâtiments avec des pompes à chaleur est un projet complexe qui nécessite des experts dans les domaines du chauffage, de l'électricité, de l'acoustique et de la statique. Le manque de produits adaptés sur le marché est l'un des principaux défis à relever. Le cadre juridique concernant les pompes à chaleur implique des autorisations et des procédures supplémentaires ainsi que le respect d'un certain nombre de normes (contrairement à la modernisation d'une chaudière par le même type de chaudière), ce qui augmente encore les coûts et ne favorise pas un développement plus large de ces projets innovants.

2.3.6 Références

- [1] Office fédéral de la statistique (OFS). <https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home.html>
- [2] Office cantonal de la statistique (OCSTAT), Genève. <https://www.ge.ch/statistique/>
- [3] Système d'information du territoire à Genève (SITG). <https://ge.ch/sitg>
- [4] Freyre, A. (2019). Energy programs for buildings analysis in the context of the swiss energy transition. Thesis work. University of Geneva.
- [5] Services Industriels de Genève (SIG). (2016). Éco21 energy efficiency program. <http://www.sigge.ch/eco21/Pages/home.aspx>
- [6] Calame, N., Rognon, F. (2018). Marché des pompes à chaleur dans les maisons à plusieurs logements : situation et opportunités. 24. Symposium de la recherche sur les pompes à chaleur et le froid de l'Office fédéral de l'énergie. Burgdorf.
- [7] Rognon, F., Yushchenko, A., Rüetschi, M. (2017). Retrofitting fossil-based heating systems with air to water heat pumps in multifamily houses. 12th IEA Heat Pump Conference. Rotterdam.
- [8] Callegari, S. (2018). Pompes à chaleur air-eau : évaluation des performances réelles dans un projet pilote à Genève, Mémoire MUSE, Université de Genève
- [9] Services Industriels de Genève (SIG), CSD Ingénieurs SA. (2018). Vademecum PAC air-eau en toiture, Guide pratique pour l'implémentation de pompes à chaleur air-eau en toiture dans les immeubles résidentiels de petite et moyenne taille. Office Fédéral de l'Energie.



3 Retours d'expérience sur installations pilotes

3.1 Contexte

Dans le canton de Genève, les émissions de CO₂ du système énergétique représentent environ 4.2 t/hab, dont 2.2 sont émises par le secteur de l'approvisionnement en chaleur des bâtiments, 1.1 par le secteur des transports (sans compter l'aéroport), et 0.8 par le secteur de l'électricité (Quiquerez 2016). En conséquence, le plus grand potentiel de réduction des émissions de CO₂ se situe dans le secteur de l'approvisionnement en chaleur des bâtiments, qui représente par ailleurs près de la moitié de la consommation d'énergie finale délivrée aux consommateurs. En 2014, la consommation d'énergie de ce secteur (corrigée climatiquement) se chiffre à 5'444 GWh ou 40.6 GJ/hab, et est essentiellement basée sur les combustibles fossiles.

Une des options pour valoriser des ressources renouvelables locales consiste à utiliser des pompes à chaleur (PAC). Aujourd'hui, cette filière représente moins de 1% de la production de chaleur du Canton. Cependant, un ensemble de scénarios prospectifs développés récemment (Quiquerez 2016) montre que le développement des PAC, en combinaison avec d'autres filières de production tels que la géothermie de moyenne profondeur, le développement de réseaux de chauffage à distance, ainsi que la réduction de la demande du parc de bâtiments, permettraient de réduire à environ 1 t/hab les émissions de CO₂ liées au chauffage des bâtiments, un niveau compatible avec les objectifs 2035 de la politique énergétique du canton.

Dans ce contexte, SIG-éco21 développe un programme de soutien aux solutions de chauffage renouvelable de types pompes à chaleur en remplacement des chaudières traditionnelles alimentées par des énergies fossiles ou par du chauffage électrique (Programme Chaleur Renouvelable). Ce programme a débuté par des solutions visant les bâtiments résidentiels individuelles et est maintenant en train de développer des solutions spécifiques pour les bâtiments résidentiels collectifs (Rognon et al. 2017).

En effet, en zone urbaine les gisements d'énergies renouvelables pour le chauffage de bâtiments collectifs sont le plus souvent très limités : distance au lac ou à une rivière trop grande, absence de nappe phréatique ou interdiction d'utilisation (protection des eaux), pas de réseau de chauffage à distance à proximité raisonnable, chaudière à bois interdite en zone d'émission excessive, solaire restreint ou nul à cause de la protection des bâtiments. Ainsi, il apparaît que les pompes à chaleur sur air constituent le potentiel le plus important pour la réduction de la consommation du CO₂ en zone urbaine.

A cet égard, il est cependant crucial de connaître et maîtriser d'une part les performances réelles de systèmes de PAC, en situation d'usage ; d'autre part, la demande thermique effective des bâtiments en condition d'utilisation. Ces points sont particulièrement cruciaux en ce qui concerne les bâtiments résidentiels collectifs, qui représentent à Genève 79% de la surface résidentielle, contre 21% pour les villas.

La question du potentiel et des contraintes de l'utilisation de PAC pour les bâtiments résidentiels collectifs est étudiée dans une thèse de doctorat (De Sousa Fraga 2017). Ce travail se base sur un retour d'expérience d'un système innovant de PAC avec source froide solaire, implémenté dans un nouveau complexe résidentiel. Le potentiel de ce système est analysé par simulation numérique, pour différents types de bâtiments résidentiels collectifs, et comparé à celui de 5 autres sources froides (air, géothermie, lac, rivière, nappe phréatique).

La question de la performance thermique réelle des bâtiments résidentiels collectifs a également été abordée au niveau du parc existant et des rénovations énergétiques (Khoury 2014). Un écart important



entre les valeurs prévues et la réalité a été mis en évidence, en bonne partie en lien avec des températures de chauffage supérieures aux valeurs normées.

En complément à ces études, les questions suivantes restent cependant ouvertes :

- Quels sont les potentiels et les contraintes des systèmes de PAC sur air, en particulier pour les bâtiments résidentiels collectifs existants ?
- Quelles sont les performances de ce type de systèmes en conditions réelles de fonctionnement ?

3.2 Périmètre de l'étude

Afin de répondre aux questions ci-dessus, cette partie de l'étude se focalise sur l'analyse du fonctionnement, en situation d'usage réel, de deux projets pilotes du programme Chaleur renouvelable des SIG.

Etudes de cas

Plus précisément, elle concerne l'analyse énergétique de la production (renouvelable et non renouvelable) et de la consommation de chaleur de deux immeubles résidentiels collectifs existants, dont le système de production de chaleur fossile a été remplacé partiellement (système bivalent) ou entièrement (système monovalent) par un système de PAC sur air. Dans l'un et l'autre cas, ces immeubles n'ont pas subi de rénovation de l'enveloppe, ni du système de distribution de chaleur.

Les deux systèmes en question sont les suivants :

- **Daru, système PAC bivalent** : cet immeuble résidentiel collectif a été construit en 1992, avec une SRE de 7'563 m². Le système de production de chaleur (2 chaudières à gaz) a été partiellement remplacé par six pompes à chaleur sur air de type villa. Une des chaudières à gaz a été supprimée, l'autre est restée sur place pour l'appoint.
- **St-Julien, système PAC monovalent** : cet immeuble résidentiel collectif a été construit en 1972, avec une SRE de 4'047 m². Le système production de chaleur (une chaudière à mazout) a été remplacé par deux pompes à chaleur sur air de type industrielle. La chaudière a provisoirement été gardée en tant que système de secours.

Dans l'un et l'autre cas, le retour d'expérience s'est déroulé sur une période de 2 ans, faisant suite à la mise en service du système.

Groupe de suivi

Afin de permettre un feedback ainsi qu'un échange d'information tout au long de l'étude, il a été constitué un groupe de suivi rassemblant les représentants des divers acteurs impliqués (exploitants, ingénieurs projet, propriétaires). Des réunions semestrielles ont permis de mettre l'ensemble des acteurs au courant de l'avancement du projet, ainsi que de le réorienter en fonction des questions soulevées.

3.3 Positionnement des bâtiments par rapport au parc immobilier genevois

3.3.1 Consommations de chaleur pour le chauffage et l'ECS

La demande de chauffage a été comparée avec d'autres bâtiments résidentiels collectifs de la même époque de construction à partir de la Figure 19. Cette image montre la répartition de la demande de



chauffage (avec correction climatique) du parc immobilier résidentiel collectif à Genève, regroupée selon trois grandes périodes de construction (Khoury 2014). Bien que cette répartition soit celle du parc genevois, une étude a montré que la distribution est similaire si l'on utilise les données du CECB au niveau national (Schneider et al. 2018).

Sur cette figure, les points bleus représentent les demandes respectives des bâtiments St-Julien (277 MJ/m²/an) et Daru (259 MJ/m²/an). On constate que même si leurs enveloppes thermiques n'ont pas été rénovées, leur demande de chauffage est inférieure à la médiane pour leur époque de construction.

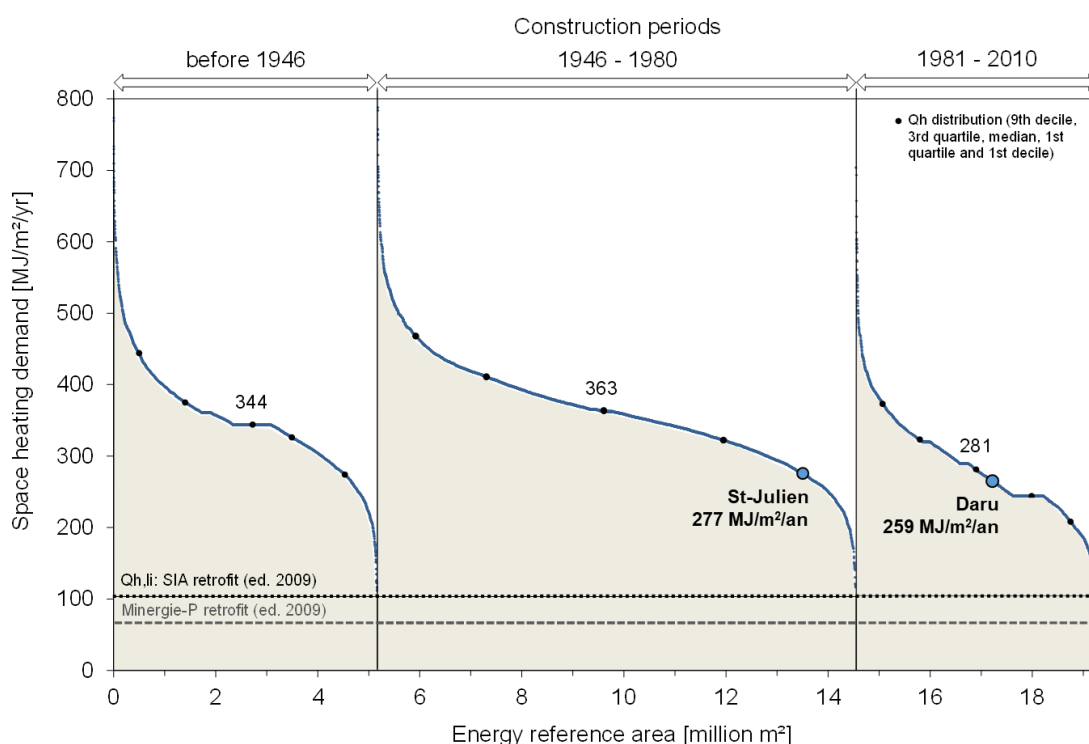


Figure 19 : Demande de chauffage du parc résidentiel collectif genevois classé en trois périodes de construction (Source : Khoury 2014). Les points bleus correspondent respectivement aux demandes de chauffage corrigées climatiquement des bâtiments de St-Julien et de Daru.

On peut également situer ces projets vis-à-vis d'un benchmark de demande de chaleur pour la production d'ECS. La Figure 20 montre la consommation de chaleur pour la production d'ECS (y compris les pertes de chaleur de stockage et de distribution) de 61 sous-stations raccordées au réseau de chaleur CADSIG à Genève. Ce dernier alimente 434 bâtiments résidentiels collectifs (environ 1 million de m² de surface chauffée). Les points bleus représentent la demande en chaleur pour la production d'ECS des bâtiments de St-Julien (55 kWh/m²/an) et de Daru (30 kWh/m²/an), ainsi que la moyenne (35 kWh/m²/an) pour les 61 sous-stations du benchmark. On remarque que la valeur pour St-Julien correspond aux valeurs les plus élevées observées pour les bâtiments résidentiels collectifs à Genève.

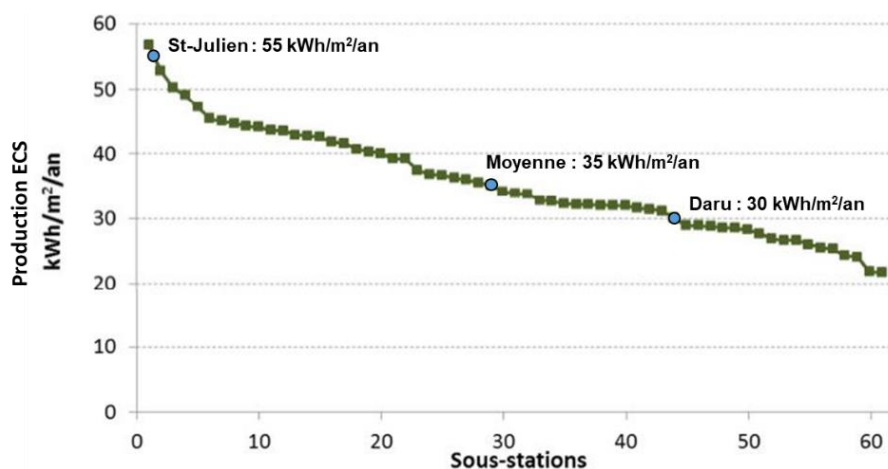


Figure 20 : Distribution des consommations de chaleur pour la production d'ECS de 61 bâtiments résidentiels genevois raccordés au réseau de chaleur CADSIG (Source : Quiquerez 2017).

3.3.2 Températures de distribution en chauffage

À partir des mesures in situ, il est possible de déterminer les courbes de chauffe des deux sites pilotes. Si l'on compare les résultats à un benchmark effectué sur 68 bâtiments d'affectation variée (Quiquerez et al. 2013), on observe que les températures de ces sites pilotes sont dans la même plage de valeur que les autres bâtiments (Figure 21). De plus, les températures de distribution sont semblables à celles des bâtiments construits durant la même période (Figure 22), bien que légèrement plus faibles pour les températures extérieures les plus basses (-5°C) dans le cas du site « St-Julien ».

Il est à noter que, les années étudiées n'ayant pas eu un hiver très froid, les températures de distribution mesurées qui sont indiquées à la Figure 21 ne vont pas au-delà de 0°C. Les valeurs à -5°C de la Figure 22 ont donc été obtenues par extrapolation des mesures.

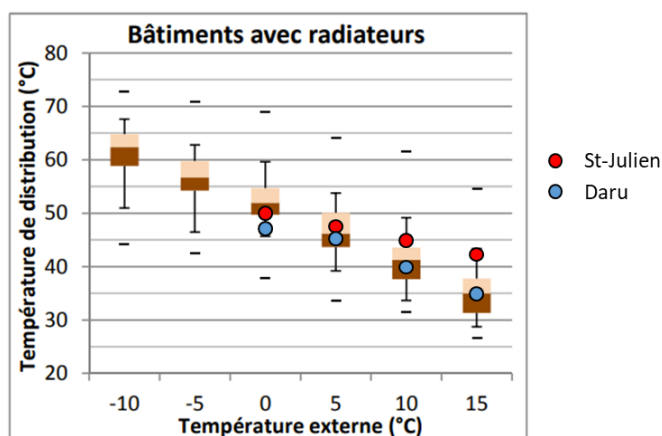


Figure 21 : Températures de distribution issues d'un benchmark réalisé sur 68 bâtiments d'affectations variées (Quiquerez et al. 2013) et températures de distribution mesurées sur les sites pilotes

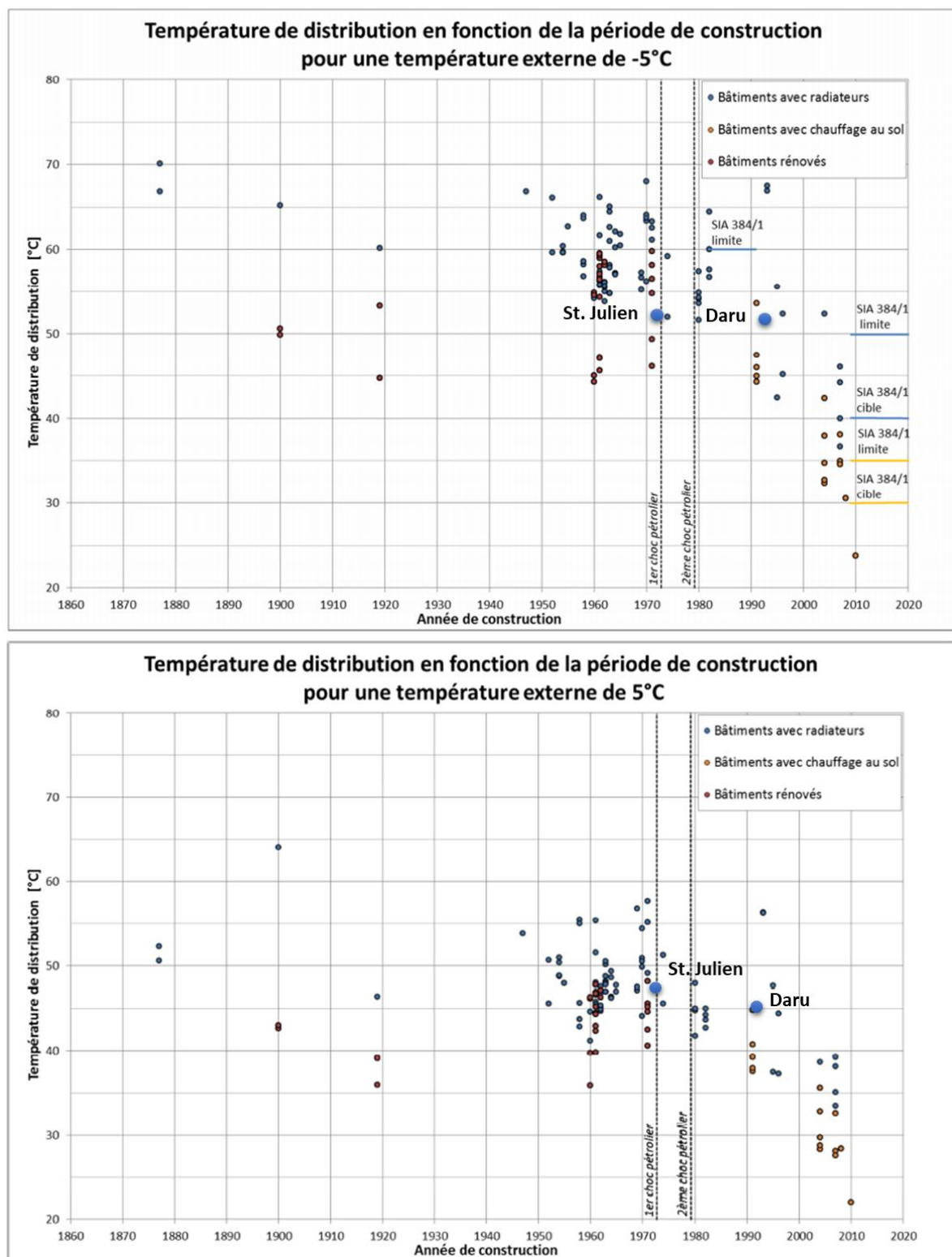


Figure 22 : Températures de distribution de divers bâtiments pour une température extérieure de -5°C (en haut) et 5°C (en bas) (Quiquerez et al. 2013). Le point bleu correspond à la valeur mesurée sur le site pilote « St-Julien ».



3.4 Daru : système PAC bivalent

3.4.1 Description du site

Le bâtiment en question se situe dans le canton de Genève et a été construit en 1992 (à gauche dans la Figure 23). Il comporte 68 appartements et des commerces (arcades), et sa surface chauffée totale de 7'563 m² est répartie sur 5 niveaux.

Son enveloppe thermique n'a pas été rénovée depuis sa construction, mais l'installation de production de chaleur a été modifiée en 2017 par l'ajout de 6 PAC air-eau en toiture (6 x 31 kW = 186 kW) (Figure 23), et en ne conservant qu'une des deux chaudières à gaz existante (200 kW) en appoint.

Les PAC sont d'un modèle destiné au secteur résidentiel, ayant un COP annoncé de 3.5 au point de fonctionnement A2/W35 (2 compresseurs), et disposent chacune de leur propre circulateur. Trois PAC sont destinées uniquement à la production de chaleur pour le chauffage, tandis que les trois autres assurent prioritairement la production d'ECS, tout en pouvant également fournir de la chaleur pour le chauffage. La chaudière à gaz peut assurer le complément de chaleur à la fois pour le chauffage et pour l'ECS. La distribution de chaleur pour le chauffage des appartements et commerces se fait via les radiateurs déjà existants.

Avant remplacement du système de production de chaleur, la consommation de gaz (énergie finale) était de 143 kWh/m² par an, corrigé climatiquement.

Le Tableau 6 résume les caractéristiques principales du projet Daru.

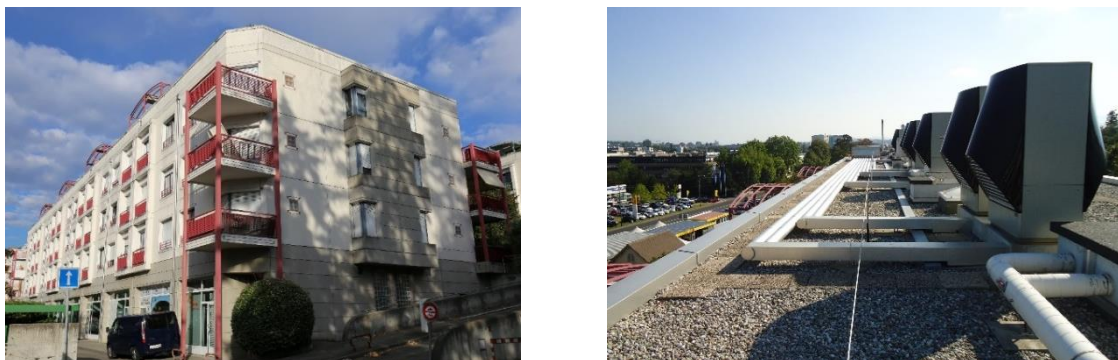


Figure 23 : Bâtiment du REX « Daru » (à gauche) et vue des pompes à chaleur air-eau en toiture pour le chauffage et l'ECS (à droite)

Tableau 6: Résumé des principales caractéristiques du site pilote "Daru"

Type de bâtiment	Résidentiel collectif + arcades commerciales au rez
Année de construction	1992
SRE	7'563 m ²
Ancienne installation de chauffage	Chaudières à gaz (2 x 200 kW)
Nouvelle installation de chauffage	Système PAC air-eau (6 x 31 kW) bivalent avec chaudière gaz (200 kW)
Besoins de chaleur pour le chauffage (sans / avec correction climatique)	64 kWh/m ² .an (du 1 ^{er} juillet 2018 au 1 ^{er} juillet 2019) ou 72 kWh/m ² .an (259 MJ/m ² .an) corrigés climatiquement
Besoins de chaleur pour la production d'ECS	30 kWh/m ² .an
Période de monitoring	1 ^{er} juillet 2017 au 1 ^{er} juillet 2019



Le schéma hydraulique simplifié du système est montré dans la Figure 42. Les PAC en toiture alimentent un ballon « PAC » pour le chauffage (1 m³) et un échangeur pour la production d'ECS.

La chaleur pour le chauffage provenant du ballon de chauffage « PAC » passe par l'intermédiaire du ballon de chauffage « chaudière » (1 m³), dont la température peut être rehaussée par la chaudière, avant d'être distribuée dans deux circuits (appartements et commerces).

L'eau potable froide pour la production d'ECS est chauffée dans un premier ballon (1 m³) par les PAC, puis passe dans un second ballon (1 m³) dont la température peut être rehaussée par la chaudière, via un échangeur, avant d'être distribuée. Le retour du bouclage ECS arrive dans ce ballon.

Le flux de retour des circuits de chauffage est dévié vers la chaudière lorsque sa température est incompatible (trop élevée) avec le fonctionnement des PAC, principalement par des températures extérieures négatives. Il s'agit d'une modification hydraulique effectuée à la suite des problèmes de fonctionnement constatés durant le premier hiver 2018-2019 (cette liaison hydraulique est visible en bleu foncé sur la Figure 42, entre le retour du chauffage et le retour de la chaudière).

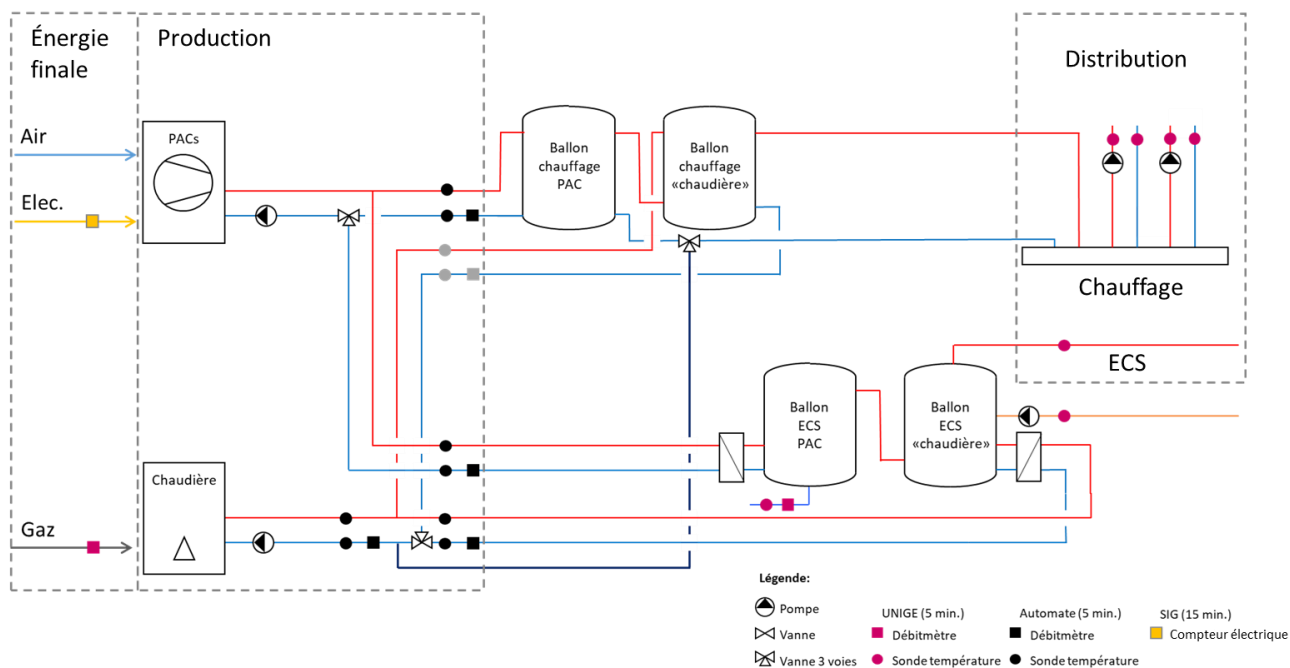


Figure 24 : Schéma hydraulique simplifié de l'installation « Daru » : énergie finale, production et distribution de chaleur, avec points de mesure principaux. Les six PAC en toiture sont représentées schématiquement par une seule machine.

Pour la production de chaleur pour le chauffage, les PAC sont régulées par une gestion de cascade automatique (leur propre logiciel gère les enclenchements et la répartition des heures de fonctionnement entre les compresseurs et les machines), tandis que pour la production d'ECS, les PAC sont programmées manuellement pour s'enclencher à des paliers de températures différents dans le ballon ECS PAC afin de correspondre au mieux à la demande de soutirage ECS. Cette programmation est changée annuellement pour équilibrer les heures de fonctionnement des PAC ECS et de leurs compresseurs.



3.4.2 Bilan énergétique annuel

Le bilan énergétique annuel effectué sur la période du 1^{er} juillet 2018 au 30 juin 2019 est présenté dans la Figure 25 (diagramme de Sankey) et dans la Figure 26.

La production de chaleur (94 kWh/m²) a été couverte à 67 % par les PAC (COP annuel y compris auxiliaires de 2.3), et à 33 % par la chaudière à gaz (efficacité de 69 % sur PCS). Le COP global de la production de chaleur (PAC + chaudière) est de 1.28 pour cette période (voir définition à la section 6.4.1). Cette valeur est relativement faible mais s'explique par : (i) le faible rendement de la chaudière (69% sur PCS) et (ii) les deux pannes survenues durant cette période au cours desquelles la production était assurée entièrement par la chaudière (voir section 3.4.4). Avec un rendement de 90% sur PCS pour la chaudière et sans pannes des PAC, le COP global de ce système s'élèverait à 1.7 environ.

La demande de chaleur annuelle totale est répartie à 68 % pour le chauffage (64 kWh/m²) et 32 % pour la production d'ECS (30 kWh/m²). Afin de ramener la demande de chauffage au climat « standard » (2'659 DJ_{18/12} selon l'OCEN (2020)), il est possible d'effectuer une correction climatique par rapport au climat observé sur la période en question à Genève (2'368 DJ_{18/12}). La demande de chauffage avec correction climatique est de 72 kWh/m².

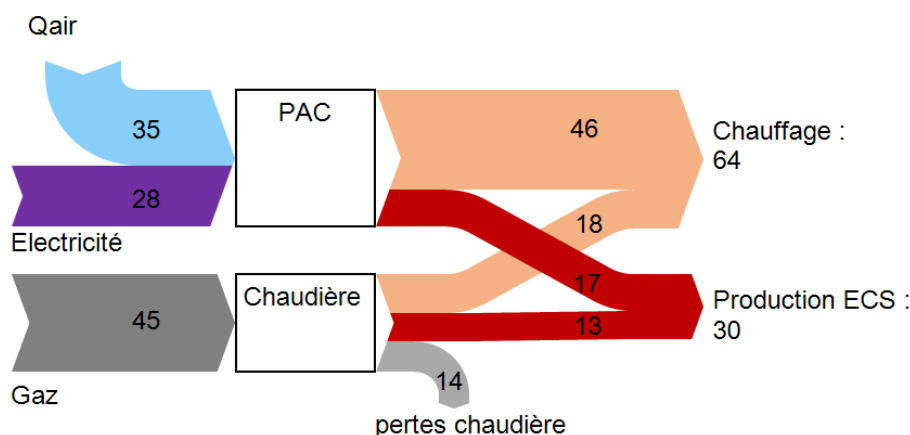


Figure 25 : Diagramme de Sankey du projet « Daru » pour la période du 1^{er} juillet 2018 au 30 juin 2019 (kWh/m²/an).

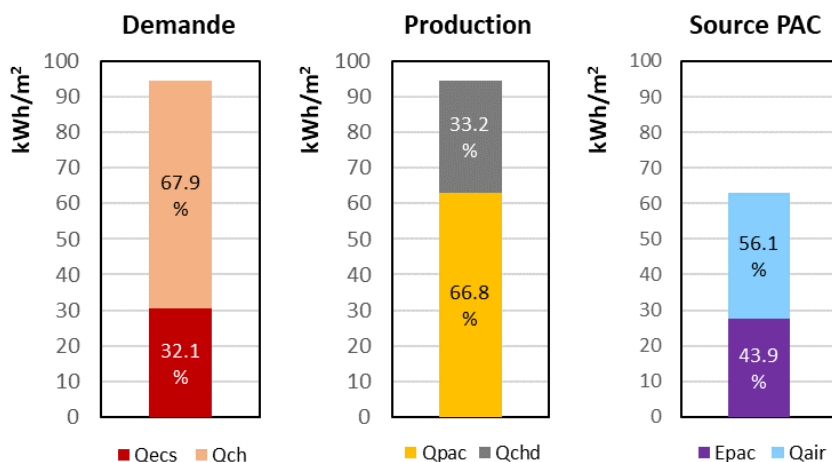


Figure 26 : Bilan énergétique annuel du projet « Daru » en terme de demande (incluant les pertes de stockage et de distribution), de production et de source d'énergie des PAC (du 1^{er} juillet 2018 au 30 juin 2019)



3.4.3 Dynamique de la demande de chaleur

La Figure 27 montre la dynamique de la demande en chaleur pour le chauffage et la production d'ECS sur les deux premières années de fonctionnement, du 1er juillet 2018 au 30 juin 2019. Le début de la deuxième saison de chauffage est très marqué, et provient du choix d'enclencher le chauffage le plus tardivement possible après son arrêt manuel durant l'été. La demande en ECS baisse nettement en été, à environ 0.5 MWh/jour.

La signature énergétique sur la même période (à droite sur la Figure 27) indique des demandes en chaleur à une température extérieure de 0°C d'environ 3 MWh/jour pour le chauffage, et d'environ 0.8 MWh/jour pour l'ECS. On observe également sur la signature énergétique que la température extérieure de non-chauffage se situe vers 17°C (en moyenne journalière).

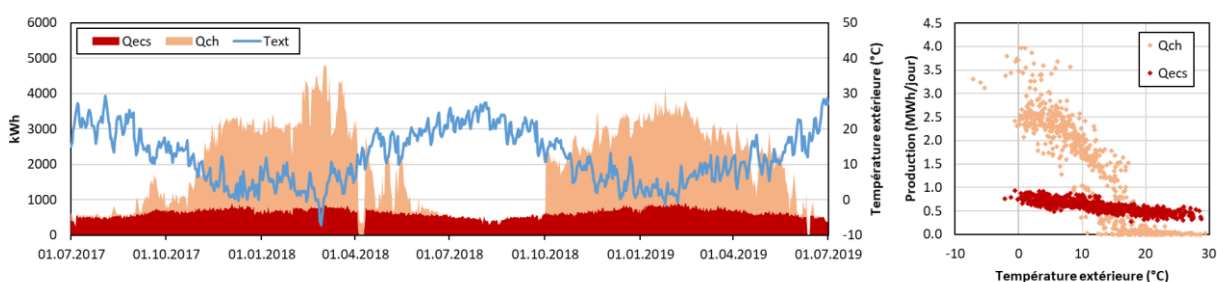


Figure 27 : Dynamique de la demande en chaleur (gauche), et signature énergétique (droite) du projet Daru du 1er juillet 2017 au 30 juin 2019 (valeurs journalières). Des valeurs manquantes apparaissent sous la forme d'intervalles vides pour la demande en ECS.

La Figure 28 montre les températures de distribution des circuits de chauffage en fonction de la température extérieure, variant d'environ 35°C à la limite de non-chauffage (17°C à l'extérieur), jusqu'à 45-50°C par 0°C extérieur.

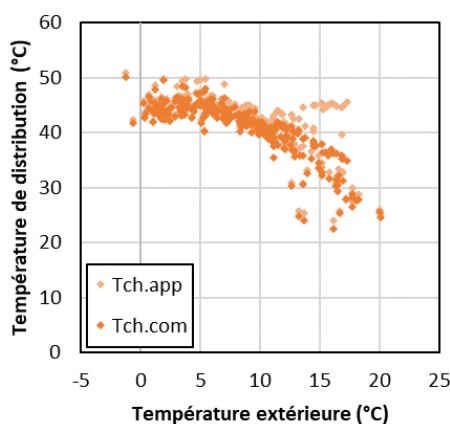


Figure 28 : Températures de distribution pour le chauffage des appartements (Tch.app) et des commerces (Tch.com) en fonction de la température extérieure, sur la période du 1^{er} juillet 2018 au 1^{er} juillet 2019 (valeurs journalières).



3.4.4 Dynamique de la production de chaleur

La Figure 29 présente la dynamique de production de chaleur par les PAC et la chaudière à gaz, décomposée entre la production pour l'ECS et pour le chauffage.

Durant la première saison de chauffage (hiver 2017-2018), de nombreuses pannes des PAC liées à des températures de retour du chauffage élevées ont eu lieu. Cela a multiplié les périodes durant lesquelles la chaudière assurait la production de chaleur pour le chauffage, tandis que les PAC parvenaient en tous temps à assurer la moitié de la production ECS. Ce problème a été partiellement résolu par une modification du système hydraulique permettant de détourner une partie du flux de retour du chauffage directement vers la chaudière quand sa température devient incompatible avec celle acceptée en retour par les PAC (i.e. quand la température extérieure descend en-dessous de 0°C environ).

Le début de la 2^e saison de chauffage (hiver 2018-2019) est marqué par une couverture des besoins en chaleur pour le chauffage assurée par la chaudière uniquement. Ceci est la conséquence d'une vanne manuelle restée fermée lors de la mise en fonction du chauffage début novembre 2018, empêchant la distribution de chaleur par les PAC pour le chauffage. La vanne en question a ensuite été ouverte fin novembre 2018. Entre mars et avril 2019, à la suite de pannes sur les PAC assurant le chauffage, la demande en chauffage a été assurée par la chaudière.

Durant l'été, on constate que la chaudière fonctionne et produit environ la moitié de l'ECS, les PAC ne parvenant pas à atteindre la température de production ECS malgré la faible demande et les températures extérieures élevées. Des réglages des horaires et débits sur la boucle de recirculation ECS effectués au début de l'été 2019 ont permis par la suite l'arrêt complet de la chaudière durant l'été et une production ECS uniquement par les PAC à ce moment-là.

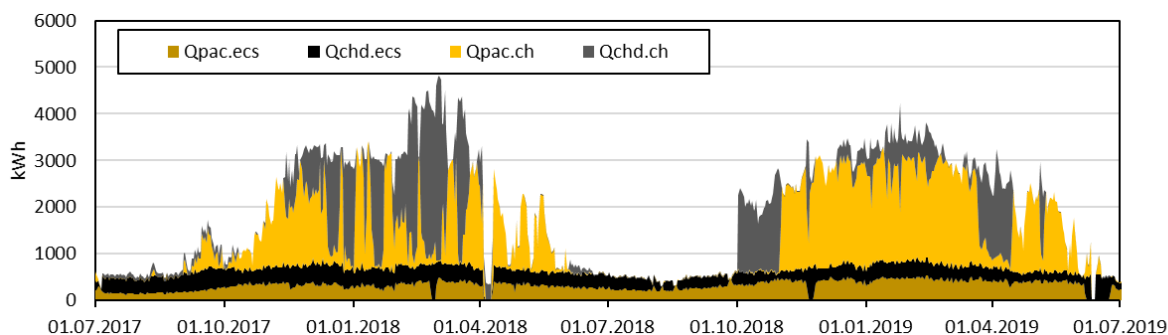


Figure 29 : Dynamique de production de chaleur par les PAC et la chaudière (Daru, du 1er juillet 2018 au 30 juin 2019). Valeurs journalières. Des valeurs manquantes apparaissent sous la forme d'intervalles vides pour la production ECS.



3.4.5 Performances des pompes à chaleur et des chaudières

La Figure 30 montre la dynamique de production de chaleur des PAC avec leur consommation électrique (y compris auxiliaires) et le COP journalier correspondant.

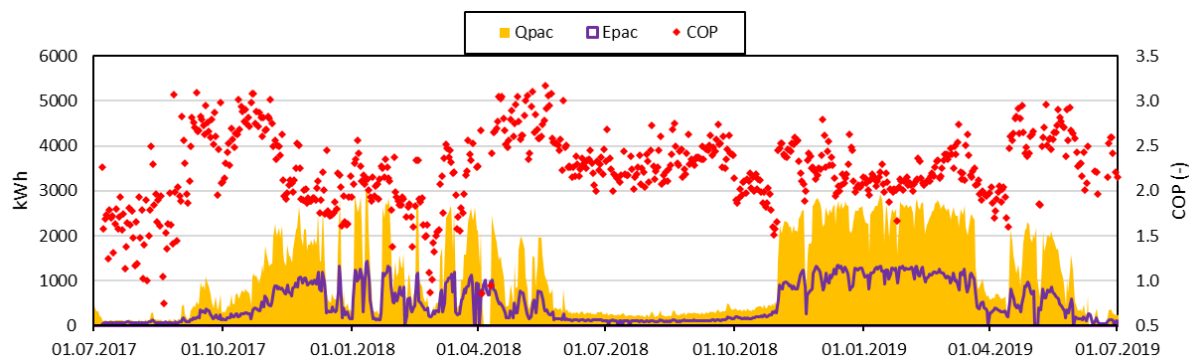


Figure 30 : Production de chaleur et consommation électrique par les PAC, avec coefficients de performance des PAC (ensemble des 6 PAC, y compris électricité auxiliaires et pertes thermiques de distribution). Valeurs journalières.

Été comme hiver, le COP observé des PAC varie entre 2 et 3, ce qui est à priori modeste vis-à-vis des performances annoncées par le constructeur.

Cependant, la consommation électrique mesurée pour les PAC inclut leur circulateur individuel, ainsi que l'électricité utilisée en chaufferie (circulateurs, chaudière...). De plus, la chaleur produite par les PAC n'est mesurée qu'en chaufferie, alors que les PAC se situent en toiture et que les conduites de distribution se situent à l'extérieur. Des analyses ont donc été menées dans le but de comparer correctement les performances réelles des PAC aux performances annoncées par leur constructeur. En effet, au vu de ce qui précède, les mesures disponibles ne correspondent pas aux situations normalisées de test des PAC, soit hors électricité auxiliaire et pertes thermiques de distribution.

Dans le but de se rapprocher des conditions standard pour l'évaluation de la performance des PAC, des mesures complémentaires de température et débits en sortie de PAC ont été menées simultanément à des mesures de consommation électrique individuelle des PAC et de leur circulateur.

De plus, afin d'estimer les pertes thermiques des conduites isolées situées à l'extérieur entre les PAC en toiture et la chaufferie, des mesures supplémentaires ont été effectuées sur les températures aux extrémités des conduites de distribution, couplées à des mesures de débit dans ces mêmes conduites. Cette analyse est détaillée dans la section suivante (3.4.6).

Le résultat de ces investigations est présenté sur la Figure 31, montrant le COP en fonction de la différence de température entre source chaude (sortie condenseur) et froide (air extérieur). On constate qu'il est possible d'expliquer l'écart entre performances observées (selon le système de comptage énergétique existant) et performances annoncées par le constructeur, en tenant compte des consommations électriques auxiliaires (estimées à 3 kW), et des pertes thermiques entre les PAC et le comptage en chaufferie (estimées à 760 kWh/jour en hiver). Cela se traduit sur la figure par les valeurs du COP sans auxiliaires ni pertes thermiques (en vert) correspondant globalement aux performances annoncées par le constructeur des PAC (en gris). Quelques valeurs aberrantes apparaissent cependant nettement au-dessus des valeurs constructeur, du fait de l'utilisation d'une estimation fixe pour les pertes thermiques, une simplification ne tenant pas compte des variations de température extérieure ni des variations de quantité de chaleur produite par les PAC.

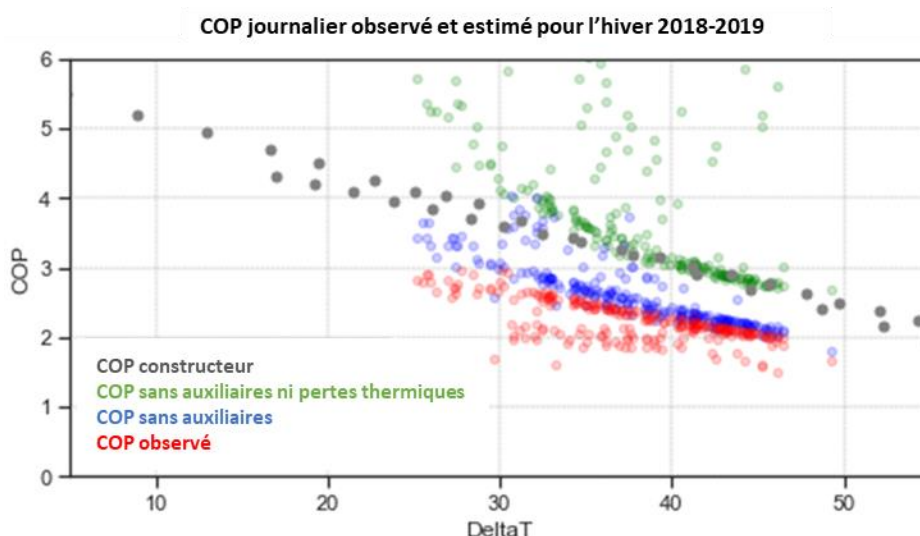


Figure 31 : Graphique du COP observé en fonction de la différence de température entre le condenseur et l'air extérieur (DeltaT) durant l'hiver 2018-2019 (rouge), comparé au COP calculé sans auxiliaires (bleu), au COP calculé sans auxiliaires ni pertes thermiques (vert), et au COP annoncé par le constructeur (gris). Valeurs journalières.

Pour ce qui est de la chaudière à gaz existante conservée lors de la modification du système de production de chaleur, la Figure 32 indique sa production journalière de chaleur en fonction de sa consommation de gaz (PCS). La régression traduit une efficacité de fonctionnement de 70 % (sur PCS), à comparer à la valeur de 69 % (sur PCS) obtenue en bilan annuel. Ce rendement est relativement faible, mais cohérent pour une chaudière de ce type (en fonte, ne tolérant pas la condensation), datant de la construction de l'immeuble, et ayant une consigne fixe de maintien en température à 70°C. Initialement conservée puisque destinée seulement à servi d'appoint, cette chaudière est finalement tombée en panne fin 2019 et a été remplacée en décembre 2019 par une chaudière à condensation (De Dietrich, C 230-210 Eco, 217 kW) ayant un rendement mesuré de 91 % sur PCS.

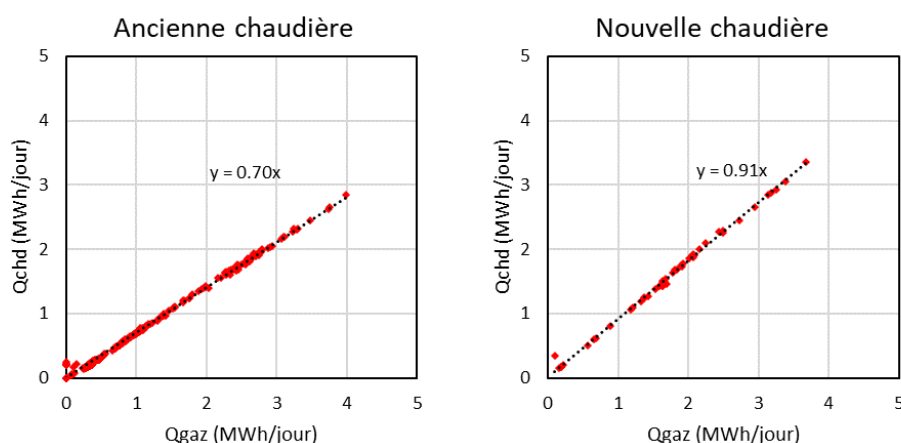


Figure 32 : Efficacité de l'ancienne chaudière à gaz existante jusqu'à fin 2019 (période du 1^{er} juillet 2018 au 30 juin 2019), et de la nouvelle chaudière (période du 18 décembre 2019 au 5 février 2020). Production de chaleur en fonction de la consommation de gaz (PCS). Valeurs journalières.



3.4.6 Problèmes rencontrés/identifiés et optimisations

Au cours des deux premières années d'opération du nouveau système de production de chaleur bivalent du site « Daru », différents dysfonctionnements concernant les PAC ont été identifiés : des retours chauds causant des pannes PAC, un début de saison de chauffage sans distribution de chaleur pour le chauffage par les PAC, un fonctionnement estival nécessitant le fonctionnement de la chaudière, des performances observées des PAC nettement inférieures aux attentes, et des nuisances sonores dues aux PAC constatée pour un appartement.

Pannes PAC causées par des retours chauds

Tout d'abord, durant le premier hiver de fonctionnement, un problème de retours chauds vers les PAC est apparu, causant des arrêts des PAC (pannes « haute pression »), et ayant pour origine la température élevée du retour de la distribution de chauffage quand la chaudière fonctionne. Une correction à cette situation a été faite par une modification du circuit hydraulique, permettant de dévier le flux de retour du chauffage directement vers la chaudière lorsque sa température est trop élevée pour le fonctionnement des PAC. Ceci se produisait notamment lors de températures extérieures négatives. Le débit de cette liaison hydraulique est régulé en fonction de la température extérieure par une vanne trois voies.

Vanne empêchant le chauffage par les PAC

Au début du second hiver, la demande de chauffage a été couverte durant un mois uniquement par la chaudière, alors que les PAC étaient en état de marche et produisaient une partie de l'ECS. Ceci s'est produit car une vanne manuellement fermée empêchait la distribution de chaleur des PAC vers le chauffage. Cette vanne avait été fermée pour empêcher du chauffage non désiré par les PAC durant l'été, et a finalement été ré-ouverte un mois plus tard.

Couverture de la production ECS par les PAC

Au cours des deux premiers étés de fonctionnement, la demande en ECS n'a pas pu être couverte entièrement par les PAC, contrairement aux attentes. La chaudière était en effet nécessaire en appoint afin d'atteindre une température d'ECS distribuée suffisante, malgré la faible demande estivale. Cette situation provient d'une part des températures effectives de production PAC inférieures au projet, et d'autre part de pertes en températures importantes dans le circuit de distribution de l'ECS. La température maximale de production en continu des PAC est de 58°C d'après les données techniques du constructeur, tandis que la température disponible mesurée en chaufferie pour la production d'ECS par les PAC ne dépasse pas 55°C. Après optimisation de la boucle de recirculation d'ECS (réglage des horaires de fonctionnement et des débits), la production d'ECS a pu être assurée par les PAC, et la chaudière arrêtée pendant les périodes estivales.

Performances observées des PAC

La constatation de performances observées des PAC nettement inférieures aux attentes a nécessité la mise en place de mesures complémentaires spécifiques à cette problématique, portant d'une part la mesure de l'électricité réellement consommée par les PAC, et d'autre part sur les pertes thermiques de distribution entre les PAC en toiture et le comptage en chaufferie.



- Électricité consommée par les PAC

Des mesures ponctuelles ont fait apparaître un écart entre la consommation électrique individuelle de chaque PAC (incluant son circulateur) et la consommation électrique mesurée par le compteur électrique PAC. Cette dernière s'avère inclure également toutes les consommations électriques de la chaufferie, soit une puissance électrique supplémentaire d'environ 2 kW. Cette consommation électrique provient principalement des circulateurs de distribution du chauffage et de l'ECS, des circulateurs alimentant les échangeurs de production ECS, du circulateur et du ventilateur/brûleur de la chaudière. En addition aux auxiliaires en chaufferie, chaque PAC dispose de son propre circulateur en toiture, qui représentent au total (six circulateurs) une puissance électrique absorbée d'environ 1 kW.

- Pertes thermiques de distribution PAC

Au vu de l'importance des longueurs de conduites reliant les PAC à la chaufferie, certes isolées mais se situant à l'extérieur de l'immeuble (Figure 33), une campagne de mesure ayant pour but de déterminer les pertes thermiques de distribution dans ces conduites a été menée.

Sur la toiture, chaque PAC est connectée individuellement par une paire (aller-retour) de conduites jusqu'à la liaison entre le toit et la chaufferie. La liaison entre le toit et la chaufferie se fait au moyen de deux paires de conduites (aller-retour), une pour la chaleur PAC destinée au chauffage et l'autre pour la production ECS PAC. La tuyauterie en toiture représente au total 216 m linéaires de conduites isolées (ayant une surface externe de 116 m²), et la liaison entre le toit et la chaufferie est constituée de 64 m linéaires de conduites isolées (surface externe de 48 m²).



Figure 33 : Aperçu des conduites de liaison en toiture (gauche), et en façade entre la toiture et la chaufferie (droite).

Les températures de contact sous l'isolation ont été mesurées aux quatre extrémités de la plus longue paire de conduites en toiture (30 m). Il s'agit des températures de départ-retour au plus proche de la PAC, et avant connexion à la liaison toiture-chaufferie. Couplées avec une mesure de débit dans ces mêmes conduites via un débitmètre externe à ultrasons, les données récoltées permettent de calculer la puissance dissipée dans la paire de conduite, lorsque la PAC fonctionne ou non. En effet, même à l'arrêt, un débit continu était constaté dans les conduites. Les résultats, présentés dans la Figure 34 en fonction de la température extérieure, indiquent des pertes en fonctionnement de 7.5 kW, et de 5 kW à l'arrêt, à comparer à la puissance thermique de la PAC de 31 kW (au point de fonctionnement A2/W35).

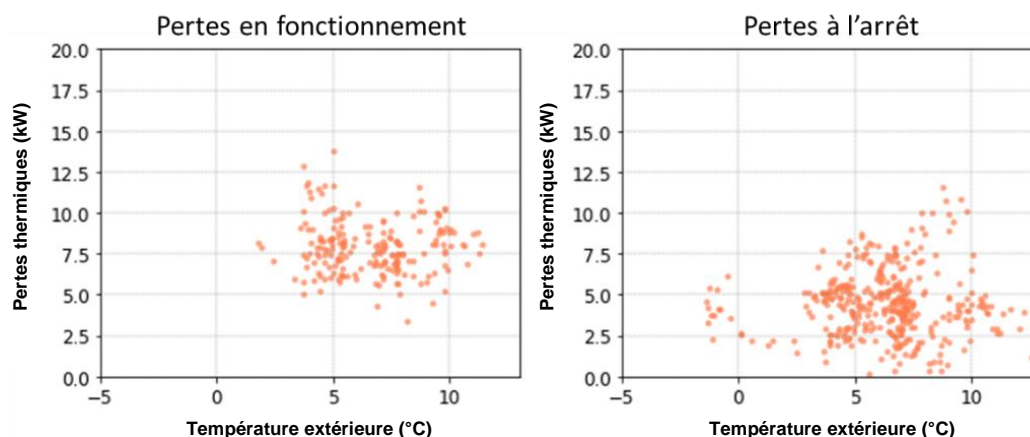


Figure 34 : Pertes thermiques en fonction de la température extérieure, pour la plus longue paire de conduites aller-retour en toiture, lorsque la PAC fonctionne (gauche) et lorsqu'elle est à l'arrêt avec son circulateur en marche (droite).

En appliquant ces résultats à l'ensemble des conduites extérieure en toiture, on estime les pertes thermiques entre les PAC et la chaufferie à environ 760 kWh/jour en hiver. Au vu du fait que les mesures ont été effectuées sur une PAC assurant prioritairement la production d'ECS, il s'agit probablement d'une estimation haute des pertes, puisque les températures dans les conduites sont maximales dans ce cas comparativement à la production de chaleur pour le chauffage.

En conclusion, le comptage de chaleur se faisant en chaufferie, l'effet de ces pertes sur les performances des PAC se traduit par une performance apparente inférieure aux attentes, comme déjà présenté sur la Figure 31 dans la section 3.4.5.

A la suite de ces constatations, des optimisations ont été menées principalement sur l'ajustement du fonctionnement des circulateurs des PAC en toiture, afin d'éviter leur fonctionnement et des pertes inutiles lorsque les PAC sont à l'arrêt.

Emissions sonores excessives des PAC

Les habitants d'un appartement situé au dernier étage de l'immeuble ont signalé un excès de bruit en provenance des PAC, perceptible à l'extérieur depuis l'embrasure des fenêtres parmi les plus proches des PAC. Des mesures acoustiques ayant confirmé les faits, les capots externes protégeant les entrées et sorties d'air des PAC ont été remplacés avant l'hiver 2019-2020 par un modèle muni d'un absorbant phonique. De nouvelles mesures acoustiques ont ensuite confirmé le respect des niveaux sonores légaux de jour et de nuit indiqués dans l'ordonnance de protection contre le bruit.



3.5 St-Julien : système PAC monovalent

3.5.1 Description du site

Situé à Genève et construit en 1972, le bâtiment du site pilote de St-Julien (Figure 35) dispose d'une surface chauffée totale de 4'047 m². Cet immeuble de type résidentiel collectif comporte 114 habitants. 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). Avant le remplacement du système, la consommation de mazout (énergie finale) pour la production de chauffage et d'ECS était d'environ 158 kWh/m² par an, après correction climatique. La chaudière est conservée pendant les premières années de fonctionnement du nouveau système, mais elle sera démantelée par la suite.

Le COP constructeur des PAC installées est de 3.42, pour 7°C en entrée d'évaporateur et 45°C en sortie du condenseur. Chaque PAC comporte 4 compresseurs scroll, offrant quatre niveaux de puissance en fonction de la charge ou de la température de la source (AERMEC 2016). Les deux PAC ont leur propre circulateur intégré à débit fixe (30 m³/h chacune).

Les principales caractéristiques du site pilote sont résumés dans le Tableau 7 ci-dessous.

Tableau 7: Résumé des principales caractéristiques du site pilote "St-Julien"

Type de bâtiment	Résidentiel collectif
Année de construction	1972
SRE	4'047 m ²
Nombre d'habitants	114
Ancienne installation de chauffage	Chaudière à mazout (319 kW)
Nouvelle installation de chauffage	Système PAC air-eau monovalent (2 x 156 kW)
Besoins de chaleur pour le chauffage (sans / avec correction climatique)	58 kWh/m ² .an (du 1 ^{er} juillet 2018 au 1 ^{er} juillet 2019) ou 77 kWh/m ² .an (277 MJ/m ² .an) corrigés climatiquement
Besoins de chaleur pour la production d'ECS	55 kWh/m ² .an
Période de monitoring	1 ^{er} juin 2018 au 1 ^{er} juin 2020



Figure 35 : Bâtiment chauffé dans le cadre du retour d'expérience « St-Julien » (à gauche) et pompes à chaleur air-eau en toiture pour le chauffage et l'ECS (à droite)



Le schéma du nouveau système est présenté dans la Figure 36. D'une part, le système de chauffage comprend un ballon de 1 m³ et deux circuits de distribution (nord-ouest et sud-ouest). Chaque secteur de distribution possède sa propre vanne trois voies et son circulateur. D'autre part, le sous-système pour la production d'ECS dispose de deux ballons de 1 m³ chacun connectés en série, séparés de la production par deux échangeurs à plaques.

Les PAC fournissent de la chaleur pour le chauffage et l'ECS alternativement afin de maintenir les ballons à leur température de consigne. Les consignes de chauffage et d'ECS sont fixées au sommet de chaque ballon et vérifiées par une sonde de température.

Une « vanne d'isolement motorisée » positionnée à l'entrée du ballon de chauffage oriente la production vers le circuit d'ECS ou de chauffage. Lorsque les PAC sont en mode chauffage, la vanne reste ouverte afin d'envoyer la production vers le circuit de chauffage. En revanche, lorsqu'elles sont en mode ECS, la vanne est fermée et la production est dirigée vers les échangeurs à plaques. Dans le cas d'une demande simultanée entre l'ECS et le chauffage, la priorité est donnée à l'ECS.

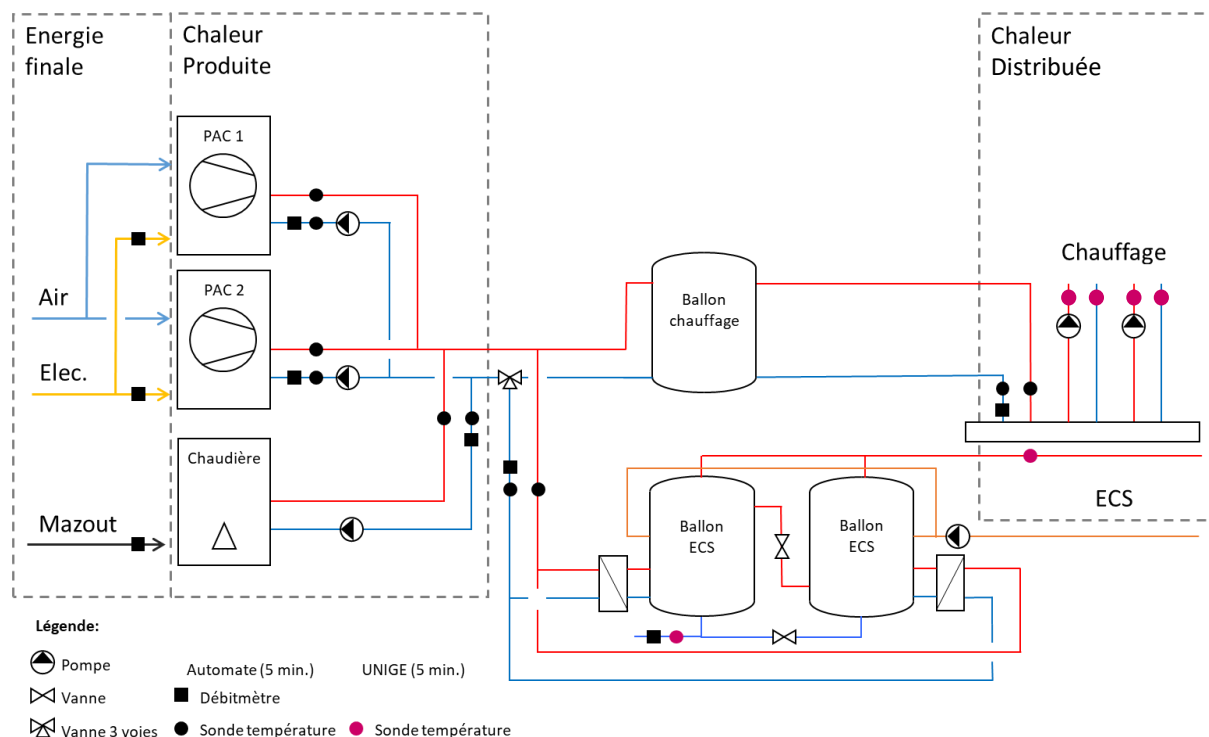


Figure 36 : Schéma du système monovalent du site pilote « St-Julien »

3.5.2 Bilan énergétique annuel

Un bilan annuel effectué sur la période du 1^{er} juillet 2019 au 30 juin 2020 est représenté sur la Figure 37 et la Figure 38, en kWh/m². La production de chaleur (113 kWh/m²) a été entièrement couverte par les pompes à chaleur, avec un COP annuel de 2.3, auxiliaires inclus.

La production annuelle de chaleur s'élève à 113 kWh/m², dont 49% pour l'ECS (55 kWh/m², incluant les pertes de stockage et de distribution) et 51% pour le chauffage (58 kWh/m²). Afin de ramener la demande de chauffage au climat « standard » (2'659 DJ_{18/12} selon l'OCEN (2020)), il est possible d'effectuer une correction climatique par rapport au climat observé sur la période en question à Genève (2'007 DJ_{18/12}). La demande de chauffage avec correction climatique est de 77 kWh/m².

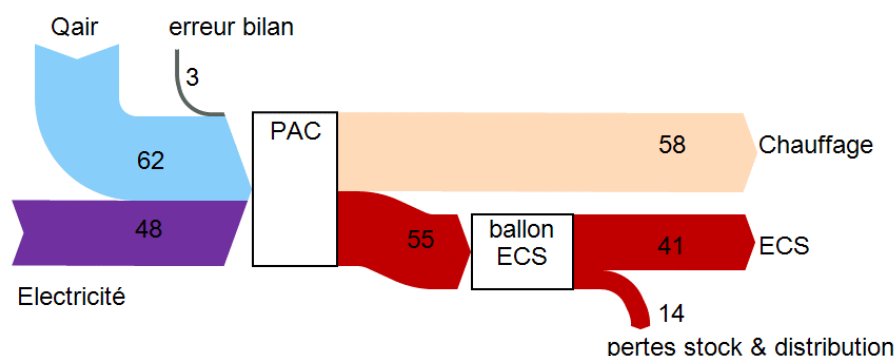


Figure 37 : Diagramme de flux du bâtiment de St-Julien, du 1^{er} juillet 2019 au 30 juin 2020 (en kWh/m²/an)

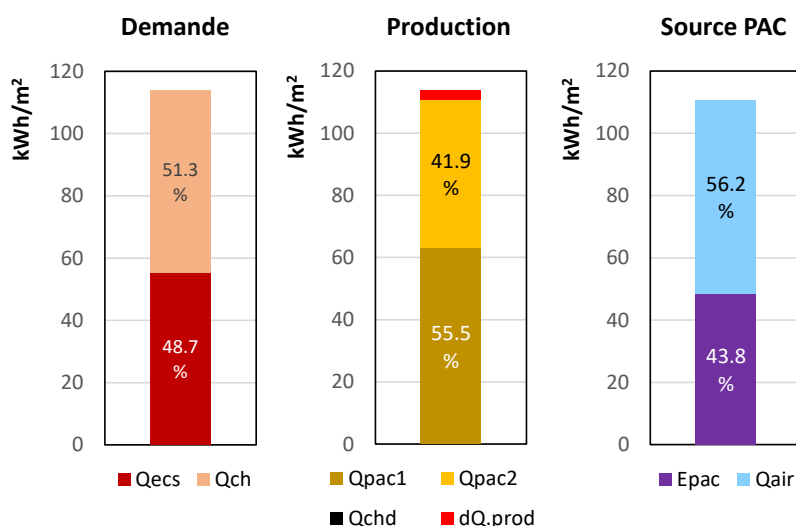


Figure 38 : Bilan énergétique annuel du projet « St-Julien » en terme de demande (incluant les pertes de stockage et de distribution), de production et de source d'énergie des PAC (du 1^{er} juillet 2019 au 30 juin 2020)

3.5.3 Dynamique de la demande de chaleur

La Figure 39 montre la dynamique de la demande de chaleur pour la production d'ECS et pour le chauffage (au niveau de la distribution) du 1^{er} juin 2018 au 30 mai 2020, soit deux années complètes. Les deux périodes de chauffage s'étendent de mi-octobre 2018 à mi-mai 2019 et de début octobre 2019 à début mai 2020. La pointe de demande totale est de l'ordre de 2'700 kWh/jour (soit 27.8 W/m², en moyenne journalière) et survient généralement au milieu de la période de chauffage. Il est à noter que le pic à 3'500 kWh en mars 2019 ne représente pas la demande réelle. Il est dû à l'enclenchement de la chaudière qui a produit à des températures élevées non contrôlées. A l'exception de quelques pics de l'ordre de 1'700 kWh/jour en octobre et novembre 2019, la demande d'ECS varie entre 250 et 1'250 kWh/jour environ, avec une augmentation temporaire inexplicable à la fin de l'hiver 2018-2019.

La signature énergétique (à droite sur la Figure 39) indique que la demande de chauffage de pointe s'élève à 2 MWh/jour pour la température extérieure minimale de 0°C sur la période étudiée. La température de non-chauffage se situe entre 15°C et 18°C. La demande d'ECS (au niveau de la production, incluant les pertes de stockage et de distribution) augmente en hiver, lorsque la température extérieure baisse.

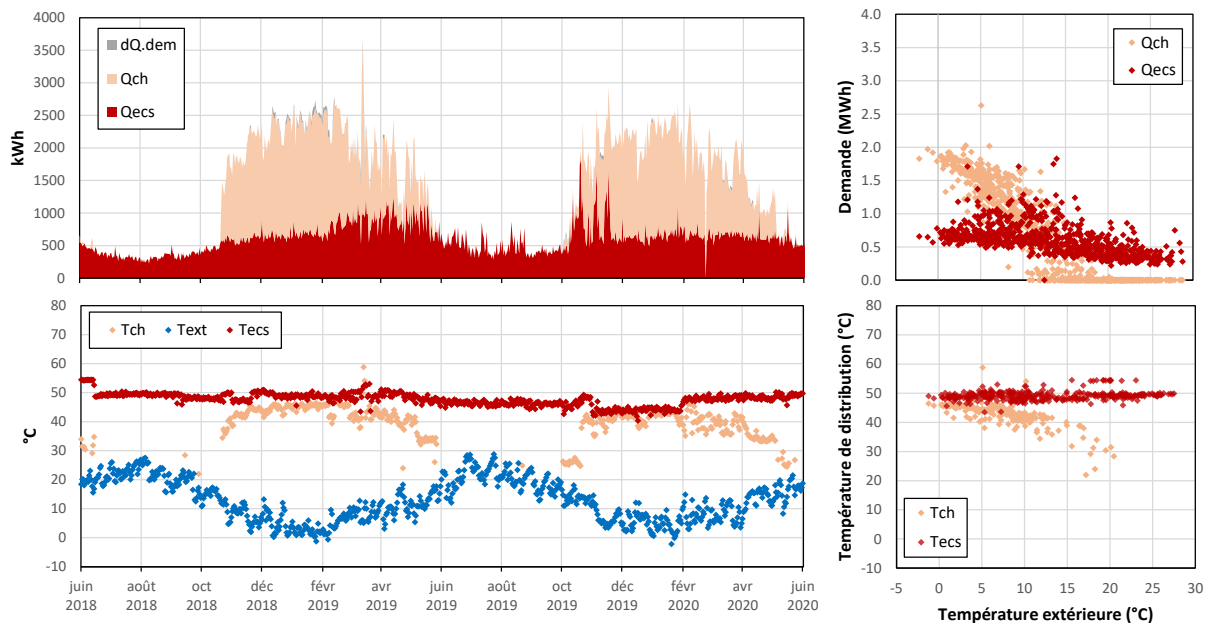


Figure 39 : Dynamique de la demande thermique et signature énergétique (valeurs journalières)

En dehors des périodes de panne des PAC, la température journalière distribuée pour l'ECS en sortie des ballons (Figure 39) oscille entre 44 et 54°C (48°C en moyenne annuelle). Ces valeurs sont 0.7 à 7°C plus faibles (4°C en moyenne annuelle) que la température de charge des ballons (Tecs) présentée à la Figure 40. La température de demande de chauffage, c'est-à-dire la température mesurée après la vanne trois voies, résulte de la courbe de chauffe programmée dans la vanne : elle diminue lorsque la température extérieure augmente.

3.5.4 Dynamique de la production de chaleur

La production journalière de chaleur est représentée sur la Figure 40. Il est important de mentionner que la production de chaleur a été presque entièrement couverte par les deux PAC sur ces deux premières années, sans diminution du confort thermique des locataires. Au milieu de l'hiver 2018-2019, il a eu deux pannes des PAC (février et mars 2019), où la chaudière à mazout a dû être exceptionnellement mise en marche. Les pannes auraient pu être traitées plus rapidement si les techniciens avaient été plus habitués et/ou mieux formés à ce type de systèmes de chauffage et s'ils avaient disposé de pièces en réserve. Cela souligne l'importance de la formation professionnelle pour ce type de systèmes.

Jusqu'à décembre 2018, les températures de production des PAC (Tpac1 et Tpac2), ainsi que les températures de production pour l'ECS et le chauffage (Tecs et Tch), sont relativement élevées et constantes. Par la suite, en hiver, une courte baisse des températures de production des PAC (51°C) est observée, liée à la diminution de la consigne pour le chauffage ; bien que celle de l'ECS soit restée constante. Pendant les pannes des PAC, les températures de production et de distribution non contrôlées de la chaudière sont montées jusqu'à 70-75°C.

Jusqu'en mai 2019, la température de production en chauffage (Tch) était relativement élevée et proche de celle de l'ECS. Cela s'explique par le fait que la consigne de production pour le chauffage était fixe, au lieu de dépendre de la température extérieure. Ce problème a finalement pu être résolu à la fin de la première saison de chauffage (mai 2019), avec l'introduction d'une courbe de chauffage dans la PAC.



De cette manière, la PAC fournit une température de production en fonction de la température extérieure. De ce fait, une courte baisse de température de production (T_{pac1}) est observée au cours du mois de mai 2019, pendant laquelle la température de distribution pour le chauffage est descendue à 35°C (pour une température extérieure au-dessus de 10°C). Cette régulation est appliquée tout au long de la seconde période de chauffage puisque la température de production en mode chauffage varie alors entre 25°C et 45°C, contre un minimum de 47°C l'année précédente avant les réglages.

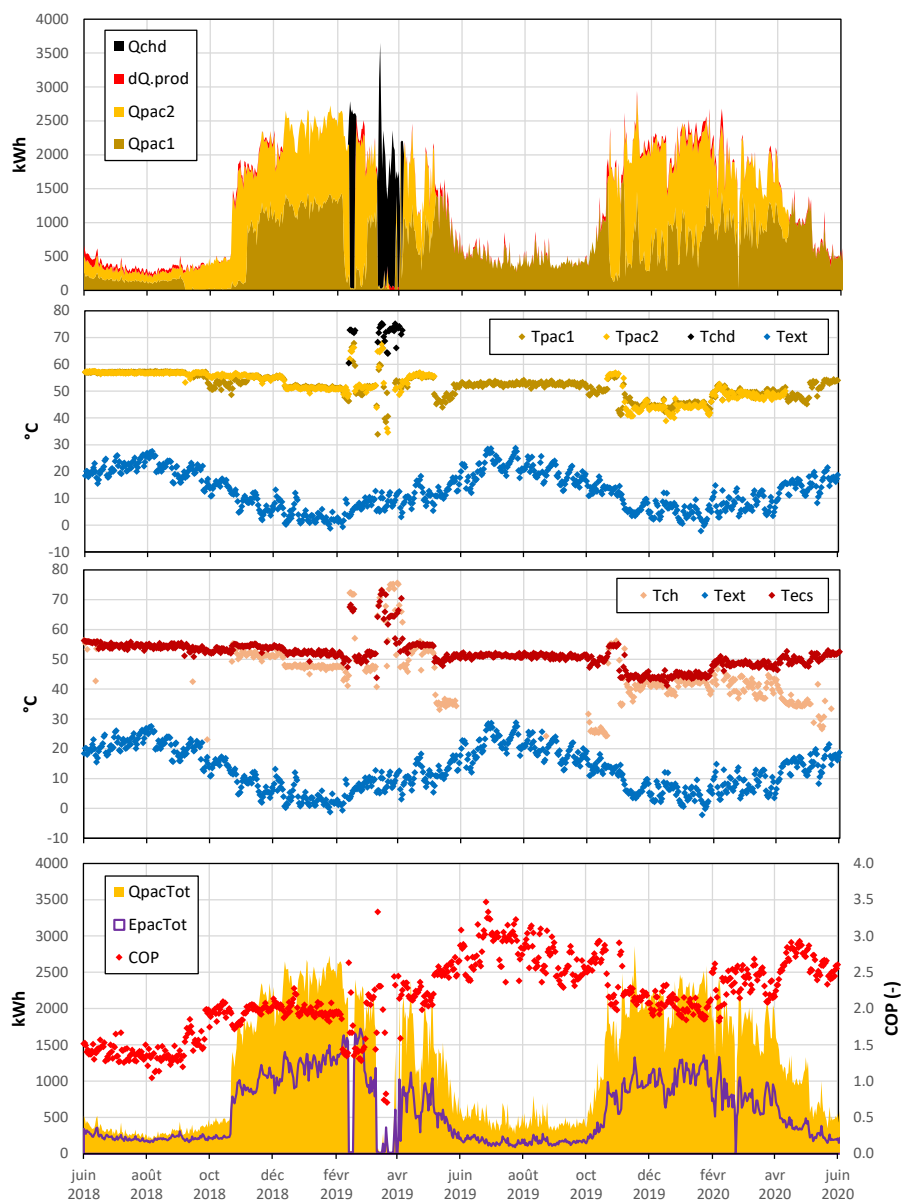


Figure 40 : Dynamique de la production de chaleur et COP journalier des pompes à chaleur COP incluant l'électricité des auxiliaires (valeurs journalières)

L'évolution des performances des PAC au cours de la période de mesure est illustrée au bas de la Figure 40. L'été 2018 présente le plus faible COP (incluant la consommation des auxiliaires), inférieur à 1.5, malgré des températures de l'air élevées. Cela est dû à trois raisons :



- Les températures de production sont relativement élevées, soit environ 57-58°C.
- A cette période, la pompe de circulation de la PAC1 est activée constamment, même si la PAC est à l'arrêt. Cela provoque alors une surconsommation d'électricité très élevée comparativement à la production de chaleur de la PAC. Davantage de détails sur ce point sont disponibles dans la section 3.5.6.
- Initialement, une vanne trois voies était positionnée avant la séparation des circuits ECS et chauffage. En mode de production ECS, elle avait pour objectif de réduire le débit vers les échangeurs ECS (2.3 m³/h), par rapport au débit en provenance des PAC (30 m³/h par PAC), afin d'éviter le tremblement des tuyaux avant les échangeurs à plaques. Pendant cet été, l'utilisation de cette vanne mélangeuse provoquait des températures de retour très hautes (environ 56°C) vers les PAC, ce qui péjorait leur performance. Cette vanne a donc été mise hors service à partir de novembre 2018 (sans problème de tremblement du côté des échangeurs).

La performance des PAC augmente à partir d'octobre 2018. En effet, comme la production de chaleur augmente, la surconsommation d'électricité de la pompe de circulation commence à avoir moins d'impact sur la performance. Par exemple, en été 2018, l'électricité consommée par le circulateur activé durant une journée (72 kWh/jour) pouvait dégrader le COP de 2.1 à 1.5, alors qu'en hiver, il ne diminue que de 2.1 à 2.0.

A la fin de la période de chauffage, le COP augmente de manière significative en raison de réglages effectués en mai 2019 pour atteindre des valeurs supérieures ou égales à 2.5. Parmi ces réglages se trouvent :

- Comme mentionné précédemment, une courbe de chauffe pour la production de la PAC a été appliquée au niveau de l'automate centralisé à la fin de la période de chauffage. Cet ajustement a permis de diminuer la température de production du chauffage et d'obtenir un gain d'efficacité.
- Une seule PAC est maintenant utilisée en été pour répondre à la demande de chaleur afin d'améliorer le facteur de charge, et faire des économies d'électricité.
- Il n'y a plus de surconsommation d'électricité liée à l'activation constante de la pompe de circulation.

Au milieu de l'été 2019, la performance passe à environ 3.1 lorsque la température extérieure est la plus élevée.

Durant la deuxième année de fonctionnement, les performances de la PAC suivent globalement les fluctuations de température extérieure. Au cœur de l'hiver le COP des PAC est de l'ordre de 2 et il atteint environ 2.5 durant les périodes de mi-saison.

3.5.5 Performances des pompes à chaleur

Dans cette section, la performance des PAC mesurée est comparée à celle annoncée par le fabricant en examinant le COP en fonction du ΔT_{pac} (différence entre température de production et température extérieure). Dans le cas des valeurs du fabricant, le COP est donné pour un fonctionnement continu à pleine puissance, en considérant une différence de température de 5°C au condenseur. Afin de se rapprocher de ces conditions, les données horaires issues du monitoring ont été filtrées pour ne conserver que les heures où la PAC a travaillé pendant au moins 30 minutes.

La Figure 41.a montre le COP journalier (y.c. le circulateur) classé par saison, et les COP du constructeur. Comme attendu, le COP mesuré diminue avec l'augmentation du ΔT_{pac} . Les performances les plus faibles correspondent à l'été 2018 en raison (i) de la consommation d'électricité induite par



l'activation constante de la pompe de circulation, (ii) des retours chauds, et (iii) des températures de production élevées. Pour l'hiver 2018-2019 et l'été 2019, le COP mesuré varie entre 3.7 et 1.8 pour un ΔT_{pac} de 20 et 50 K, respectivement. Durant ces périodes la plupart des ajustements qui ont aidé à améliorer la performance ont été effectués. Par conséquent, les valeurs mesurées se sont rapprochées de celles du fabricant, et en suivent la tendance. Étant donné que les données du constructeur ne prennent pas en compte l'électricité du circulateur, contrairement aux mesures disponibles de consommation électrique des PAC, un certain écart demeure.

La Figure 41.b compare le COP excluant l'énergie liée au circulateur avec celui du constructeur. La consommation d'électricité du circulateur (environ 3 kW) a été déduite de la consommation électrique mesurée en fonction du type de débit de chaque période (constant / variable). On note que les valeurs obtenues sont plus élevées que celles de la Figure 41.a, réduisant ainsi l'écart avec les COP du fabricant. Les valeurs de l'été 2018 sont désormais alignées avec celles des périodes optimisées. Cela confirme la cause des faibles COP incluant les circulateurs obtenus pour cette période. De plus, cela met en évidence l'influence de l'activation constante de la pompe de circulation sur la performance en été. Enfin, les COP mesurés sans le circulateur sont légèrement inférieurs à ceux du fabricant, comme fréquemment observé lors de mesures in situ tel que De Sousa Fraga et al. (2015), Mermoud et al. (2014) et Tornare et al. (2017). En conclusion, les faibles COP mesurés ne sont pas dus à une défaillance des PAC, mais à un fonctionnement non optimal du système, qui diffère des conditions standard de test des pompes à chaleur, et principalement lié à la régulation.

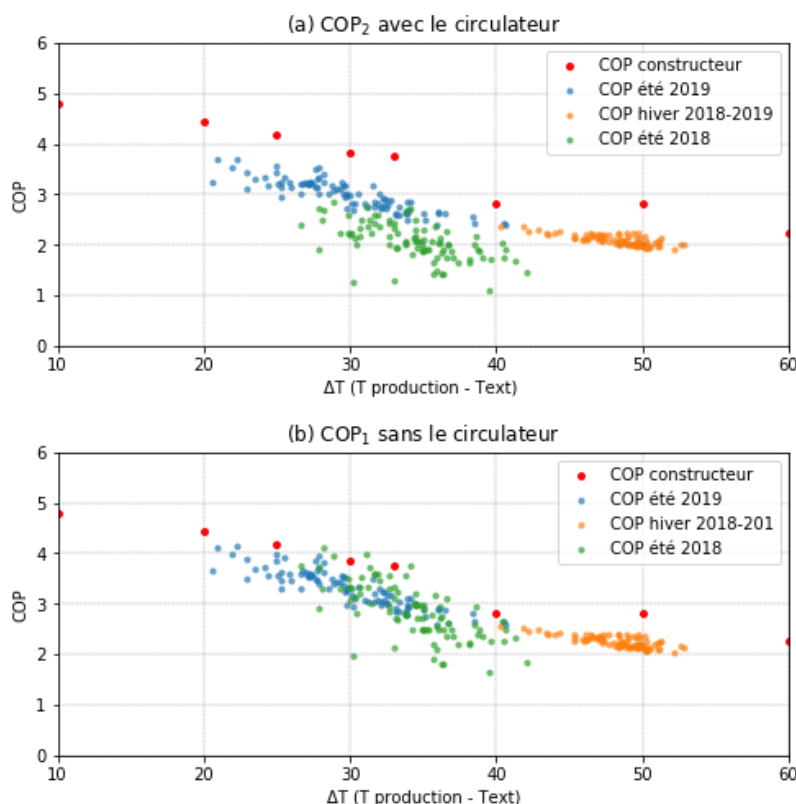


Figure 41 : COP journalier (par saison) avec et sans électricité consommée par le circulateur et COP fabricant, en fonction de la différence de température entre production et température extérieure



3.5.6 Problèmes rencontrés/identifiés et optimisations

Cette section présente davantage de détails concernant les problématiques rencontrées au cours du suivi de ce projet pilote, à savoir : la régulation des circulateurs des PAC et les paramètres de production en mode chauffage. Cette section traite également d'une analyse complémentaire concernant les pertes de chaleur du sous-système pour la production d'ECS.

Avant de rentrer dans les détails, il convient de remarquer que les problèmes de régulation identifiés provenaient tous deux de réglages d'usine qui ne correspondaient pas à l'analyse fonctionnelle établie par le concepteur (non mandaté en phase de réalisation). Ce retour d'expérience montre donc l'importance de vérifier l'adéquation avec la conception à chaque étape du projet, sans quoi les performances énergétiques du système peuvent être fortement dégradées.

Régulation des circulateurs des PAC

Comme mentionné dans la section 3.5.4, des ajustements ont été réalisés quant à la régulation des circulateurs des PAC du site. Des changements ont également été effectués sur la régulation des compresseurs des PAC. Pour rappel, chaque PAC possède 4 compresseurs. Les modifications apportées ayant principalement eu lieu au cours de la première année de fonctionnement, l'analyse détaillée ici se concentre sur la période du 1^{er} juin 2018 au 30 septembre 2019.

Tout d'abord, quelle que soit la période, l'enclenchement/déclenchement des PAC se fait de la manière suivante :

- Si l'automate indique que la température en haut des ballons de chauffage ou d'ECS est inférieure à la consigne basse de l'hystérésis, alors la PAC se met en marche.
- Dans le cas d'une demande de chauffage simultanée, la priorité est donnée à la production d'ECS.
- Lorsque les ballons de chauffage et d'ECS ont atteint la consigne haute de l'hystérésis, la PAC s'arrête.

Pour chaque PAC, le débit de circulation est fixe (30 m³/h) et la variation de puissance est contrôlée par l'activation successive des compresseurs, de telle sorte à maintenir un ΔT_{cond} fixe (programmé par le chauffagiste) entre l'aller et le retour côté condenseur.

La gestion en cascade des PAC peut être réalisée de deux façons :

- Enclenchement des PAC en série : la priorité est donnée à l'une des PAC, dont les compresseurs sont activés de façon progressive, en fonction de la puissance soutirée ; lorsque les 4 compresseurs sont actifs et ne peuvent plus garantir la puissance (c'est-à-dire le ΔT_{cond}), la deuxième PAC est activée, avec enclenchement successif de ses compresseurs.
- Enclenchement des PAC en parallèle : l'activation successive des compresseurs se fait en alternance entre les deux PAC, qui montent en puissance de façon parallèle (1^{er} compresseur de la PAC 1, 1^{er} compresseur de la PAC 2, 2^{ème} compresseur de la PAC 1, 2^{ème} compresseur de la PAC 2, etc.).

Au long de la première année d'opération, la gestion en cascade a été modifiée de la manière suivante (Figure 42.a) :

- De juin à août, les PAC 1 et 2 ont fonctionné en parallèle, à charge partielle, pour la production d'ECS.
- De septembre à octobre, la priorité a été donnée à la PAC 2, qui a couvert l'essentiel de la production.



- De novembre à avril (hormis pendant les périodes de panne), les deux PAC ont à nouveau été gérées en parallèle, afin de couvrir la demande de chauffage et d'ECS.
- Dès la fin de la période de chauffage, la priorité a été donnée à la PAC 1, qui a couvert l'essentiel de la production.

La gestion des débits de circulation n'a cependant pas suivi la gestion ci-dessus de façon optimale (Figure 42.b) :

- De juin à novembre (sauf de septembre à octobre, lorsque la PAC 2 était la seule activée), le circulateur de la PAC 1 a fonctionné 24/24h, même lorsque celle-ci était à l'arrêt. Cette erreur de régulation a provoqué une surconsommation de 72 kWh/jour d'électricité. En été, cette quantité représente en moyenne de 31% de l'électricité totale consommée par les PAC. En début de saison de chauffage, avec l'augmentation de la chaleur produite, cette surconsommation est devenue proportionnellement moins importante, et ne représente en moyenne « plus que » 5% de l'électricité consommée par les PAC.
- Cette erreur de régulation a été résolue à la mi-décembre, suite à quoi les enclenchements des circulateurs et des PAC ont été synchronisés.

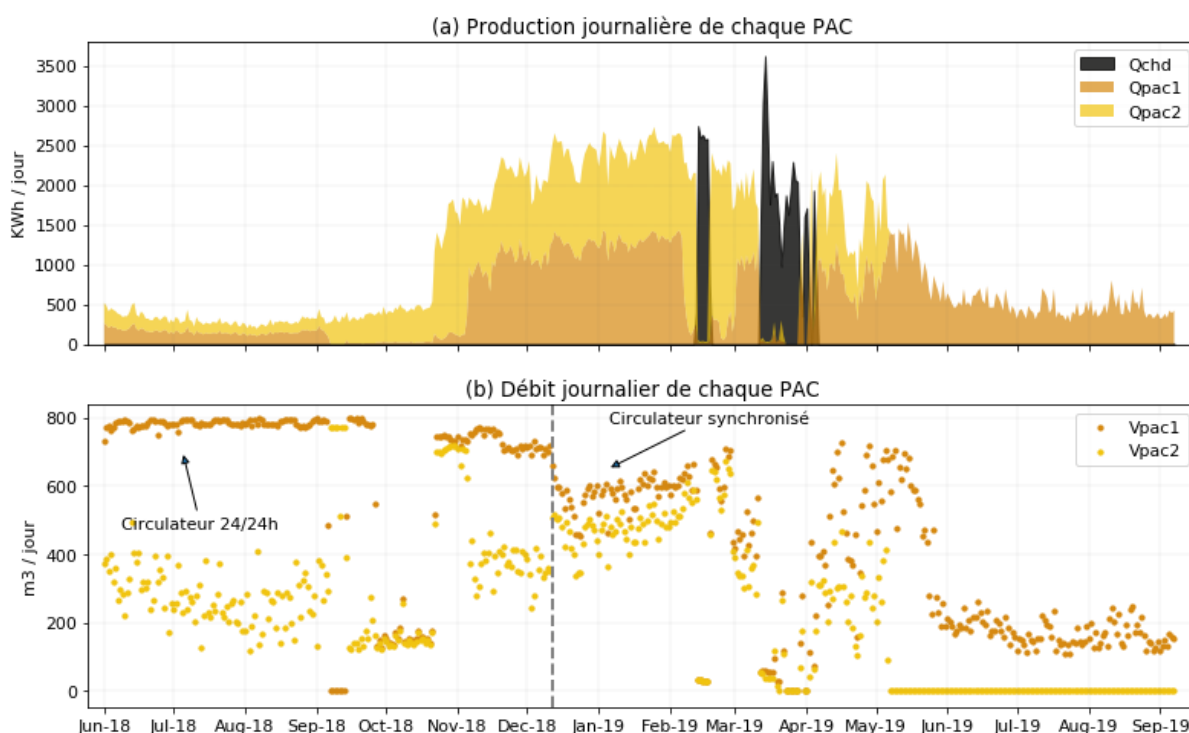


Figure 42 : (a) Production de chaleur et (b) débit de chaque PAC en valeur journalier. La ligne pointillée représente le réglage du circulateur de la PAC1

Ce fonctionnement est illustré de façon détaillée, par tranche de 5 minutes, pour deux journées représentatives. La Figure 43 représente une journée d'août 2018 (avant régulation du débit de la PAC 1). On observe 4 cycles d'enclenchements de la PAC 2, ainsi que de son circulateur, pour la production d'ECS. Bien que la PAC 1 n'ait pas fonctionné, sa pompe de circulation est activée 24h/24h.



La Figure 44 illustre une journée de janvier 2019 (après régulation du débit de la PAC 1). Les deux PAC fonctionnent en parallèle, et quasiment en continu, pour la production de chauffage et d'ECS. Pour l'une et l'autre des PAC, production de chaleur et débit sont synchronisés.

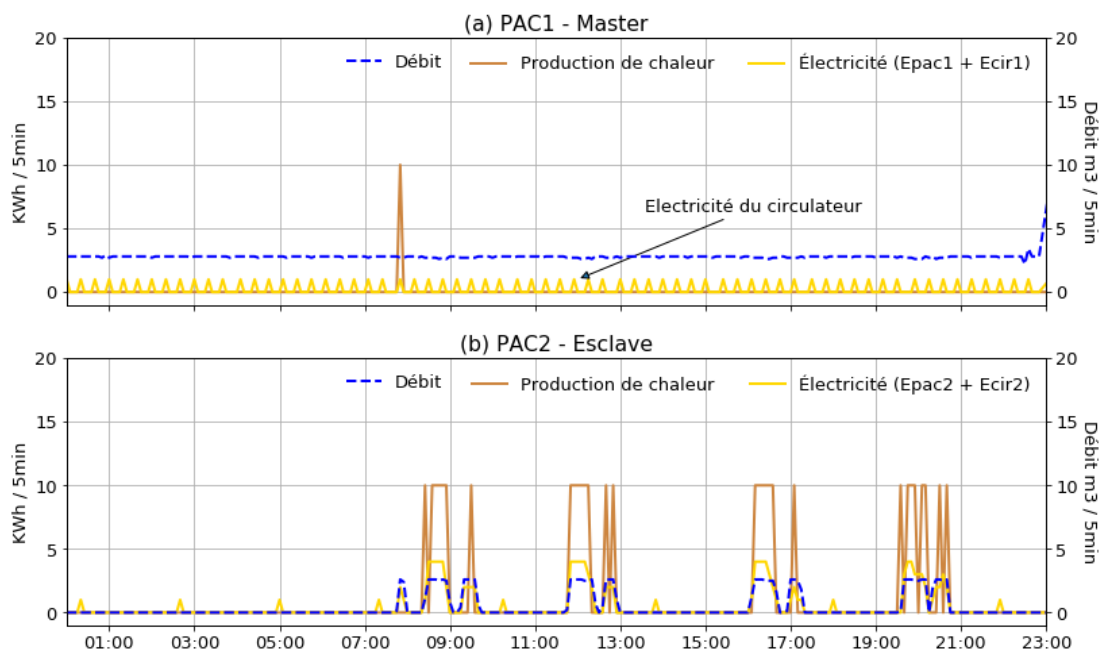


Figure 43 : Fonctionnement de la PAC master et de la PAC esclave au cours de la journée du 16 septembre 2018 (pas de temps de 5 min.). L'électricité correspond à la consommation de la PAC et de son circulateur.

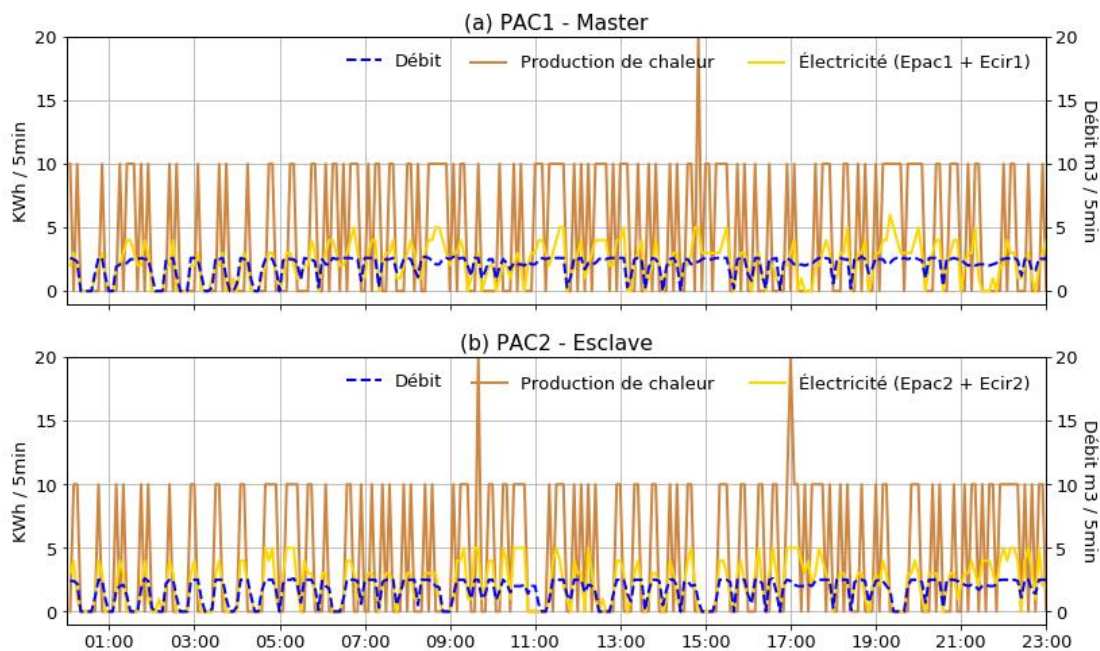


Figure 44 : Fonctionnement de la PAC master et de la PAC esclave au cours de la journée d'hiver du 2 janvier 2019 (pas de temps de 5 min.). L'électricité correspond à la consommation de la PAC et de son circulateur.



Production de chauffage en fonction de la température extérieure

Au cours de l'hiver 2018-2019, un réglage a été effectué afin de faire varier la température de production des PAC en mode chauffage en fonction de la température extérieure. La température de production des PAC est alors plus faible que précédemment, et bien plus basse qu'en mode ECS (Figure 45). De plus, l'écart de température entre l'évaporateur (air extérieur) et le condenseur est ainsi diminué. Cela permet d'améliorer les performances des PAC.

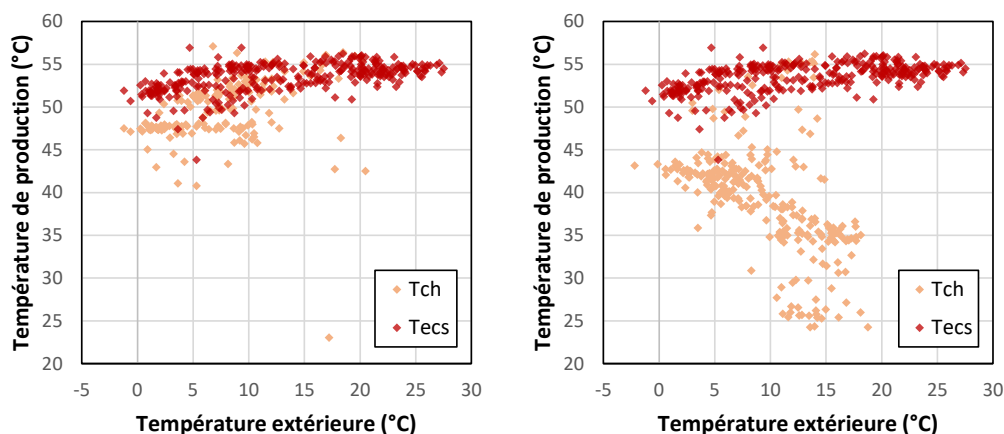


Figure 45 : Températures de distribution de chauffage et d'ECS avant (à gauche) et après (à droite) l'application d'une courbe de chauffe sur la production des PAC en mode chauffage (moyennes journalières)

Ce changement de régulation, décrit brièvement dans les sections 3.5.3 et 3.5.4, est illustré ici à partir de deux journées typiques, l'une avant et l'autre après les réglages (Figure 45). La température extérieure moyenne est la même dans les deux journées choisies.

La Figure 46 montre le profil de la température de distribution de la Figure 40, pour une journée avant les réglages (a) et une autre post-réglage (b) avec un pas de temps de 5 min. La température extérieure moyenne de ces deux jours est de 12°C. Dans la Figure 46.a, les cycles d'ECS et de chauffage sont courts car l'hystérésis programmée était assez restreinte (environ 1-2°C). De plus, les températures de distribution sont pratiquement les mêmes pour le chauffage et l'ECS (55°C).

Pour le jour post-réglages (Figure 46.b), les cycles d'ECS et de chauffage sont plus larges. La température de distribution de chauffage est bien inférieure à celle de l'ECS. Cela est dû à une production contrôlée en fonction de la température extérieure pour les enclenchements du chauffage, alors que l'ECS continue d'avoir une production fixe. Cette configuration serait la plus adaptée et recommandée puisqu'elle permet d'avoir une température de production basse, ce qui signifie aussi un gain de performance, tel que décrit à la section 3.5.5.

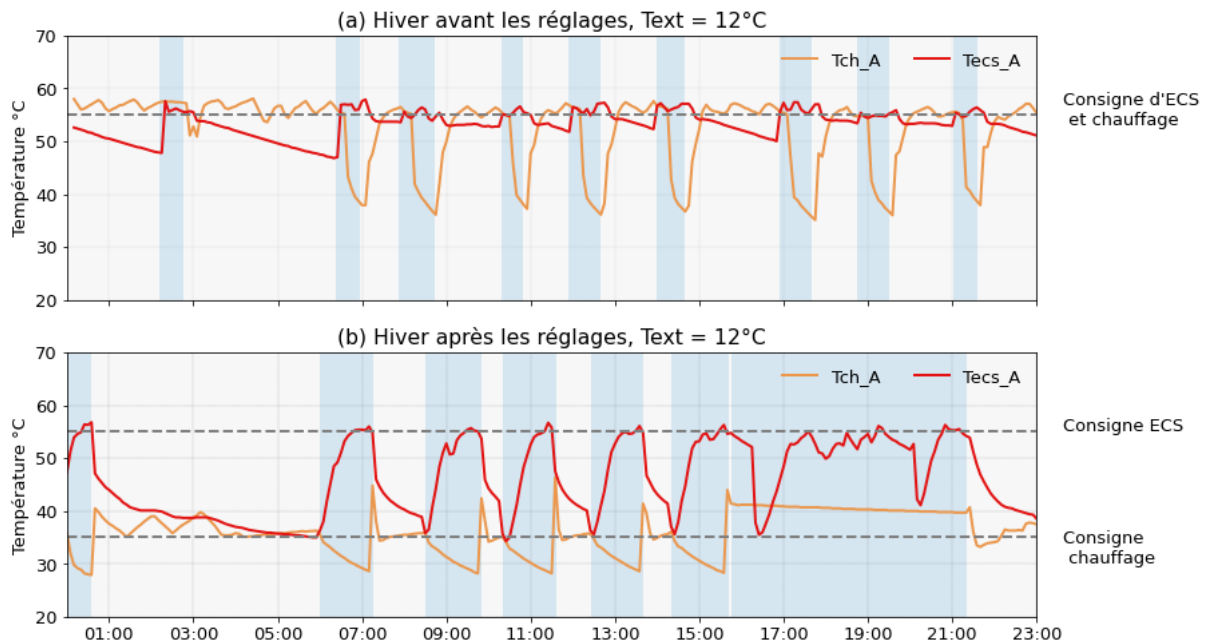


Figure 46 : Températures de distribution (valeur 5 min) atteintes au cours de la journée d'hiver du a) 11 novembre 2018 et du b) 15 mai 2019. Les bandes grises représentent les démarrages de la PAC pour l'ECS et les bandes blanches pour le chauffage.

Pertes de chaleur du circuit d'ECS

Il a été possible de déterminer les pertes de chaleur du sous-système d'ECS, par la différence entre l'énergie entrant dans les échangeurs (Q_{ecs_pac}), et la décharge des ballons (Q_{ecs}) en valeurs journalières. Ces pertes sont attribuées aux échangeurs d'ECS, aux ballons et à la boucle de recirculation.

$$Q_{pertes_ECS} = Q_{ecs_pac} - Q_{ecs} \quad (1)$$

La Figure 47 montre la dynamique des pertes de chaleur journalières du 1^{er} octobre 2018 au 30 septembre 2019, période sur laquelle a été réalisée la mesure des températures en entrée et sortie des ballons d'ECS (côté demande). En premier lieu, on note que les pertes sont de l'ordre de 200 kWh/jour en hiver et 100 kWh/jour en été, pour une raison non expliquée.

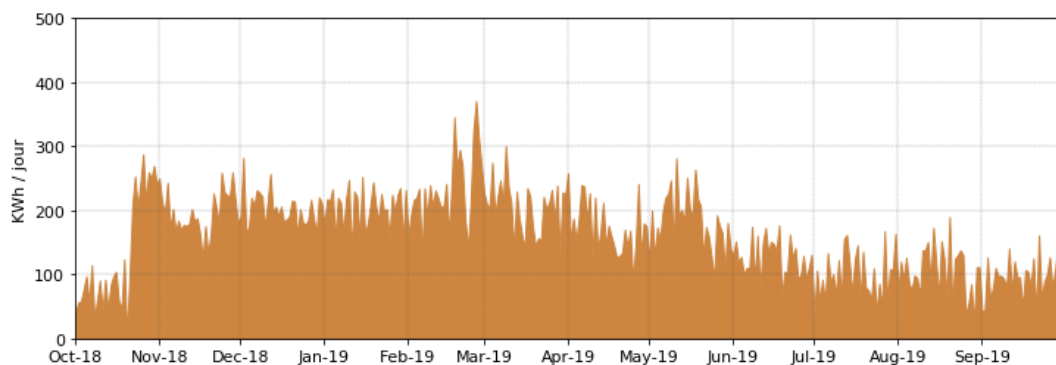


Figure 47 : Dynamique des pertes de chaleur journalières du sous-système ECS



La Figure 48 montre la relation linéaire entre les valeurs mesurées entre Q_{ecs_pac} et Q_{ecs} . L'équation obtenue par régression linéaire montre qu'en moyenne, l'énergie utile représente 75% de la charge des ballons, le reste (25%) est attribué aux pertes des ballons et de la boucle de recirculation.

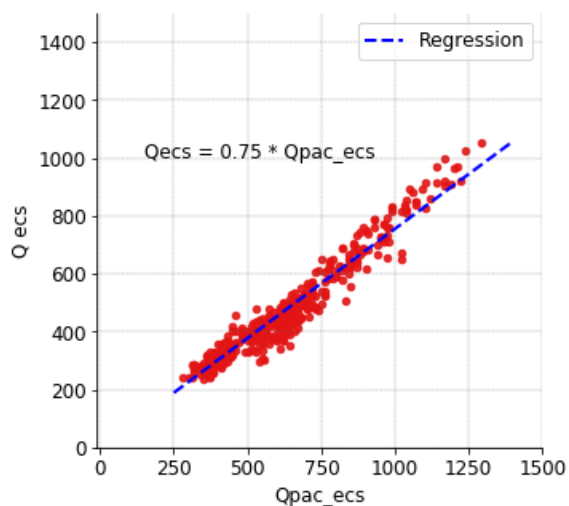


Figure 48 : Relation linéaire entre l'énergie utile pour l'ECS (Q_{ecs}) et la production de chaleur pour l'ECS (Q_{pac_ecs}). La pente de la droite représente le pourcentage de la charge des ballons utilisé comme énergie utile.



4 Définition des schémas hydrauliques

4.1 Motivation

La recherche de schémas hydrauliques existants dans le contexte des bâtiments multi-logements pour une production de chaleur bivalente avec PAC sur l'air a été peu fructueuse. Elle a révélé qu'extrêmement peu de fournisseurs disposent aujourd'hui de schémas à proposer. La raison en est un manque évident de la demande du marché qui n'a pas induit le développement de ces schémas.

Chez certains fabricants renommés, par exemple, une partie de la régulation hydraulique a lieu à l'intérieur des PAC elles-mêmes, rendant les schémas peu reproductibles avec d'autres machines. Chez certains fournisseurs, il n'y a pas de schémas standards. Ils sont développés au cas par cas.

Il existe des schémas créés pour un fonctionnement bivalent avec des PAC, mais les puissances prévues ne vont que jusqu'à environ 15 kW.

4.2 Sélection des schémas hydrauliques de base

Différents scénarii sont pris en compte pour la définition des schémas. Ils correspondent aux principaux cas qui peuvent se présenter lors de la conception d'un système avec pompe à chaleur pour la production de chaleur et d'eau chaude sanitaire dans les bâtiments collectifs existants.

L'objectif est d'élaborer des schémas robustes garantissant un bon fonctionnement des équipements. Ils sont conçus pour avoir une part couverte par la PAC aussi élevée que possible afin de maximiser l'efficacité globale des systèmes.

Le placement de la chaudière est un point critique largement discuté lors du processus de validation. Il est important que celle-ci ne perturbe pas le fonctionnement de la PAC durant l'exploitation. Ceci pourrait mener à une part plus importante que nécessaire couverte par la ressource fossile, voir une impossibilité pour le système PAC à se réenclencher.

La démarche de définition des schémas de base a inclus une étude de la littérature ainsi que des échanges avec le GSP (Groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur) et avec des fournisseurs. Cette approche a permis d'inclure des retours d'expérience de professionnels de la branche ayant été confrontés à ce type de réalisations.

Le choix des schémas de principes de base intègre aussi les informations issues des deux installations pilotes réalisées à Genève par SIG. La sélection des schémas de base les plus prometteurs illustrant les divers scénarii sont les suivants :

A. Fonctionnement PAC monovalent :

- Répond au cas où il est possible (techniquement et financièrement) d'installer une PAC permettant de couvrir 100% de la puissance appelée
- Basé sur l'installation réalisée par SIG à la route de St-Julien (Genève) pour laquelle des mesures in situ sont disponibles ;

B. Fonctionnement parallèle avec une chaudière modulante :

- Répond au cas où une chaudière modulante existante ou neuve est utilisée
- Basé sur le schéma correspondant proposé dans le rapport sur l'extension du PAC-système module aux installations de plus de 15 kW et bivalentes (Gadola et al. 2017) ;



C. Fonctionnement parallèle avec une chaudière non-modulante :

- Répond au cas où une chaudière existante qui ne module pas est utilisée
- Basé sur l'installation réalisée par SIG au chemin du Daru (Genève) pour laquelle des mesures in situ sont disponibles. Ce schéma a été simplifié pour être généralisé ;

D. Fonctionnement alternatif avec une chaudière non-modulante :

- Répond au cas où une chaudière existante qui ne module pas et qui sera déconnectée à terme est utilisée
- Basé sur le schéma PAC 05 issu des Schémas standard du Cahier 5 des publications du programme Ravel (Gabathuler et al. 1995) prévu pour appoint par une chaudière à bois.

Pour ces divers scénarii, on considère des pompes à chaleur air-eau à puissance fixe ou à plusieurs étages de puissances mais pas avec une modulation continue. La production de chaleur représentée par une PAC dans les schémas peut également se rapporter à une cascade de PAC le cas échéant. Dans chaque cas, le chauffage ainsi que l'eau chaude sanitaire sont produits. Une variante de scénario est introduite pour différencier le fonctionnement parallèle en utilisant une chaudière modulante ou une qui ne module pas. Ce choix est motivé par le fait que lors d'un assainissement, il est courant de pouvoir ou de devoir réutiliser une chaudière existante.

A noter que dans chaque scénario, la production d'ECS est garantie par la PAC seule sans appoint fossile. Ce choix est motivé ainsi :

- En principe, dans l'existant l'ECS représente une part relativement faible de l'énergie, et on estime qu'elle peut être fournie à 100% par la PAC. Ainsi, on simplifie la schématique de l'installation et l'éventuel appoint fossile est complètement à l'arrêt hors de la période de chauffage.
- L'efficacité globale de l'installation s'en trouve améliorée, d'autant plus que la PAC fonctionne hors saison de chauffe durant la période où les températures extérieures sont les plus clémentes. Ceci peut toutefois avoir un impact sur le dimensionnement du système (puissance PAC), qui a été assumé lors de l'élaboration des schémas.

Dans le contexte spécifique des bâtiments existants où la température de départ pour le chauffage est proche de celle pour l'ECS et où la place manque généralement en chaufferie, il n'est pas judicieux de chercher à ajouter une PAC dédiée pour la production d'eau chaude sanitaire.

4.3 Elaboration des analyses fonctionnelles

La description du fonctionnement des éléments (PAC, chaudière, accumulateur) intervenant dans les divers scénarii sélectionnés a été décrite pour chaque cas. Ces analyses fonctionnelles explicitent l'enclenchement ou la coupure des équipements en fonction du retour des capteurs et des températures de consigne pour les différents cas de figure. Elles permettent de garantir le bon fonctionnement de l'installation en tout temps.

Les analyses fonctionnelles sont un élément clé pour l'exploitation des systèmes, elles sont retranscrites également dans les simulations réalisées.



4.4 Revue et validation des concepts

Après l'élaboration des concepts initiaux pour chaque cas étudié, les schémas proposés ont été revus par différents fournisseurs de PAC pour avoir leur retour sur leur applicabilité en fonction des machines et leur régulation. Les schémas ont ensuite été discutés avec plusieurs experts du GSP et des adaptations ont été apportées. Les versions des schémas hydrauliques qui ont été modélisés sont illustrées ci-dessous pour chaque cas avec les analyses fonctionnelles correspondantes réalisées sous forme graphique.

Les analyses fonctionnelles ont aussi fait l'objet d'un processus de validation de pair avec les schématiques. Elles ont été mises en forme de façon plus lisible et compréhensible pour les programmeurs qui auront besoin de les intégrer dans le futur par leur présentation sous forme d'arbre décisionnel.

4.5 Schémas hydrauliques proposés

Les schémas finalement obtenus pour chaque scénario sont présentés ci-après accompagnés de leurs analyses fonctionnelles.

Lors d'un projet, il est fortement recommandé de vérifier au préalable l'hydraulique de la distribution existante. En effet, si l'on se trouve dans les cas HK2 ou HK5 illustrés en couleur dans la Figure 49 (Primas et al., 2014), il est nécessaire de la faire modifier, car ces cas de figure ne sont pas adaptés à l'intégration de pompes à chaleur.

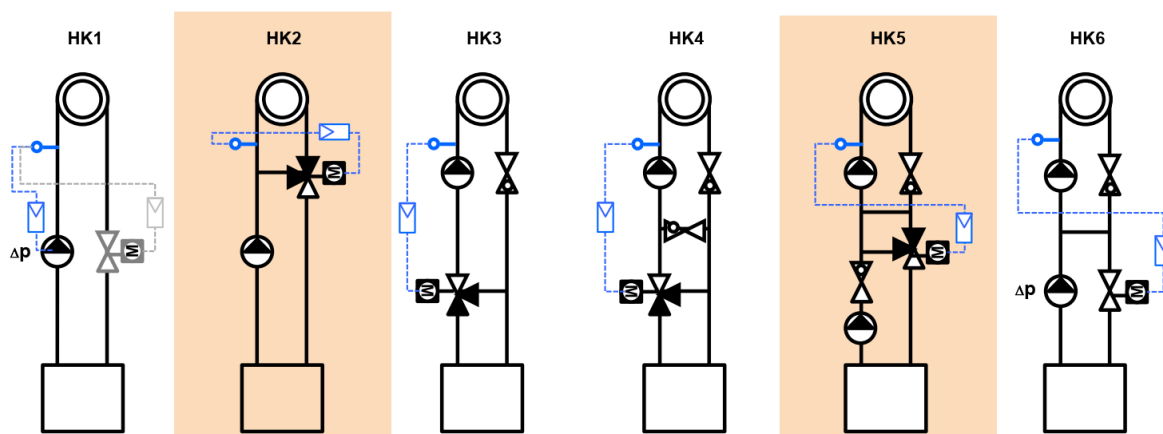


Figure 49 : Schémas de principe de la distribution hydraulique, les cas en orange ne sont pas adaptés aux PAC (Primas et al., 2014)

En ce qui concerne le raccordement du ballon d'eau chaude sanitaire, des variantes au cas illustré sont disponibles dans le rapport de (Gadola et al. 2017) (recirculation, câble chauffant, production instantanée). Elles peuvent être inter-changées tout en conservant le reste du schéma. La variante simulée comporte une recirculation.



Les abréviations utilisées dans les analyses fonctionnelles sont décrites dans le Tableau 8 suivant :

Tableau 8 : Liste des abréviations utilisées dans l'analyse fonctionnelle

Abréviation	Signification
T_{ext}	Température extérieure
T_{consigne ECS}	Température de consigne eau chaude sanitaire
T_{coupure}	Température extérieure à laquelle on arrête le chauffage
T_{consigne chauffage}	Température de consigne demandée par le système de chauffage du bâtiment
T_{prod}	Température de sortie du producteur de chaleur
T_{biv}	Température au point de bivalence
TS1	Température sonde S1
TS2	Température sonde S2
TS3	Température sonde S3
TS4	Température sonde S4
V3V1	Vanne 3 voies N°1 tout-ou-rien (ECS / chauffage)
V3V2	Vanne 3 voies N°2 tout-ou-rien (PAC / chaudière)
P1	Pompe de circulation PAC
P2	Pompe charge boiler ECS
X min.	Durée libération pour production ECS (durée maximum autorisée pour la production d'ECS)
Y min.	Durée fonctionnement minimal PAC avant enclenchement chaudière (temporisation chaudière)



A. Fonctionnement monovalent de la PAC

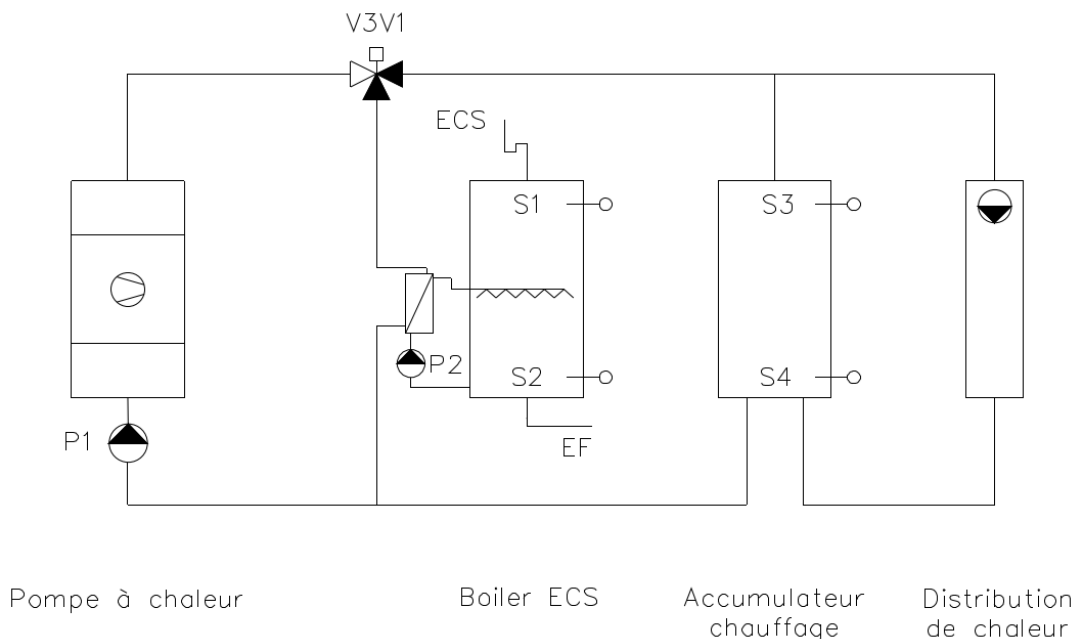


Figure 50 : Schéma hydraulique pour le fonctionnement monovalent de la PAC

Le schéma monovalent répond au cas où il est possible de couvrir 100% de la puissance par la PAC air/eau.

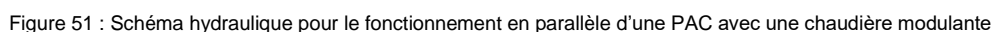
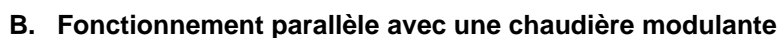
L'objectif de ce schéma est la simplicité et la fiabilité. L'entier de la production de chaleur et d'eau chaude sanitaire est produite par la PAC.

Caractéristiques :

- La PAC est dimensionnée pour fournir l'entier de la puissance
- C'est la variante qui demande le plus de place pour implémenter les PAC
- La masse de la ou des machines peut parfois engendrer des problèmes de statique qu'il convient de vérifier au préalable
- C'est la variante qui implique le plus grand débit d'air, ainsi il faut bien soigner les aspects acoustiques et vibratoires

Remarque :

- Si la place le permet, on favorisera un échangeur de chaleur interne pour l'eau chaude sanitaire. Attention à respecter la surface d'échange nécessaire.



L'objectif visé pour ce schéma est une utilisation minimale de la chaudière, qui peut si besoin en tout temps compléter la PAC pour le chauffage. La séparation hydraulique entre la PAC et la chaudière est nécessaire afin de protéger le retour PAC étant donné que les courbes de chauffe des deux producteurs de chaleur sont différentes. Ceci est en particulier important pour les chaudières à mazout dont la modulation est faible ainsi que les chaudières à gaz ayant un risque de mauvaise modulation, en particulier pour les équipements existants.

- La vanne trois voies V3V1 est de type tout ou rien
- Ce schéma est adapté si la chaudière en place est capable de moduler
- Ce schéma est adapté avec une nouvelle chaudière modulante s'il n'est pas possible d'installer toute la puissance en PAC (attention à ne pas sur-dimensionner la PAC car hors saison de chauffage, elle ne produira que l'ECS)
- Peut répondre à un choix économique de garder une part de la production non-renouvelable, notamment dans l'attente d'une rénovation ultérieure de l'enveloppe du bâtiment



Remarques :

- Il est important de brancher la chaudière en série sur le départ après l'accumulateur chauffage, et pas avant. En voici les raisons :
 - o Dans le cas d'une chaudière à mazout, la modulation est faible, c'est impératif de la mettre après l'accumulateur ;
 - o Dans le cas d'une chaudière à gaz, l'expérience montre que celles-ci ne modulent pas comme on le pense. De plus, la courbe de chauffage ne sera jamais la même que celle de la PAC. Il est donc plus sûr de la brancher après l'accumulateur ;
 - o L'enclenchement, la modulation et le déclenchement de la chaudière est réalisé par mesure de température sur le départ (sortie accumulateur).
- Si la place le permet, on favorisera un échangeur de chaleur interne pour l'eau chaude sanitaire. Attention à respecter la surface d'échange nécessaire.

La production d'ECS est garantie uniquement par la PAC, sans appoint fossile. Ce choix est motivé par le fait que l'ECS représente dans l'existant une part relativement faible de l'énergie, et on estime qu'elle peut être fournie à 100% par la PAC. Ainsi, on simplifie la schématique de l'installation et l'appoint fossile est complètement à l'arrêt hors de la période de chauffage. L'efficacité globale de l'installation s'en trouve ainsi améliorée, d'autant plus que la PAC fonctionne hors saison de chauffe durant la période où les températures extérieures sont les plus avantageuses. Toutefois, comme la PAC assure seule la production d'ECS, elle doit être capable de répondre à l'intégralité de la demande d'ECS y compris durant les mois les plus froids où sa capacité est réduite. Ceci peut donc avoir un impact sur le dimensionnement du système (puissance PAC). Cet impact a été assumé lors de l'élaboration des schémas.



Fonctionnement parallèle avec une chaudière modulante

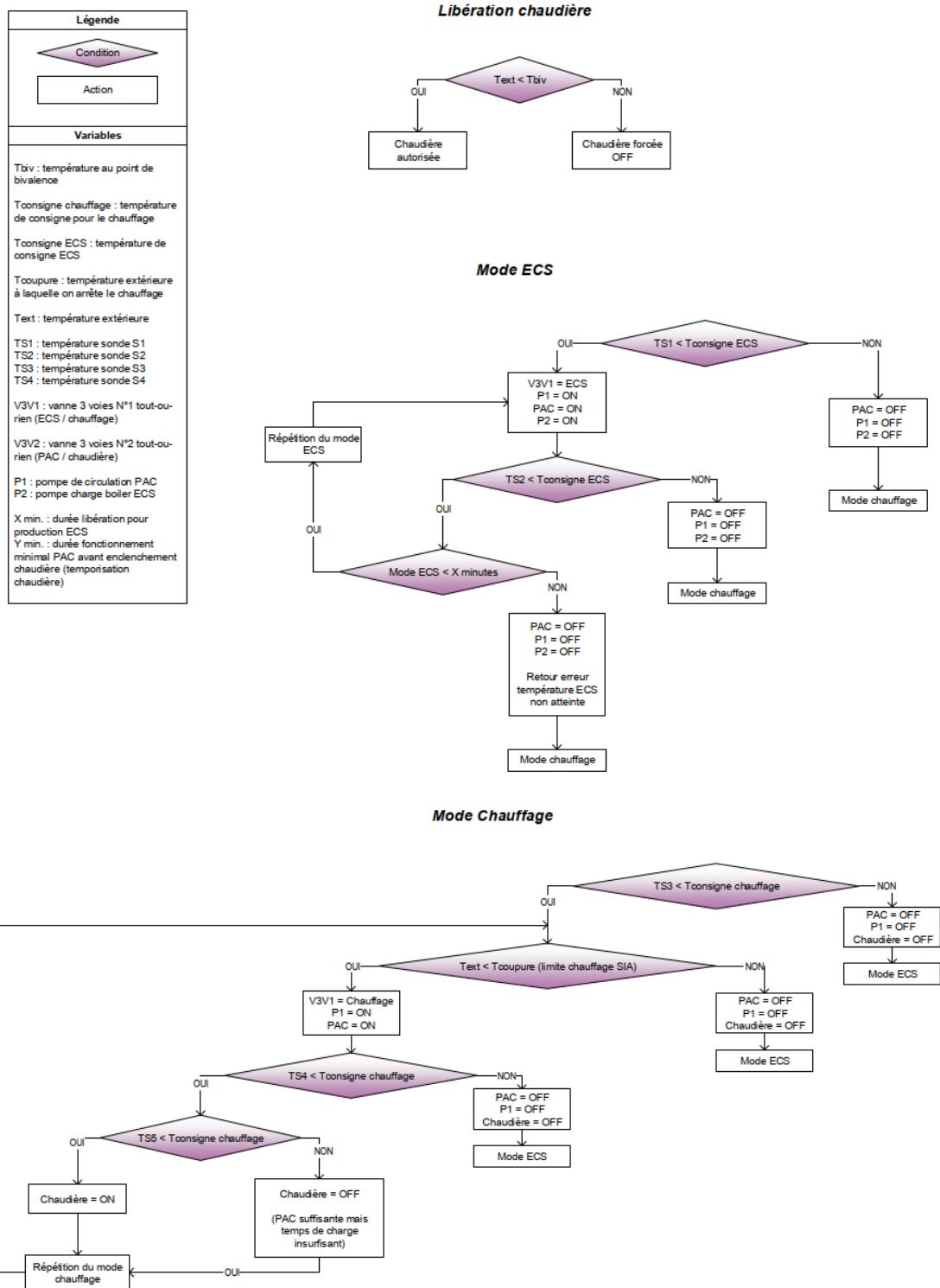


Figure 52 : Analyse fonctionnelle pour le fonctionnement en parallèle d'une PAC avec une chaudière modulante



C. Fonctionnement parallèle avec une chaudière non-modulante

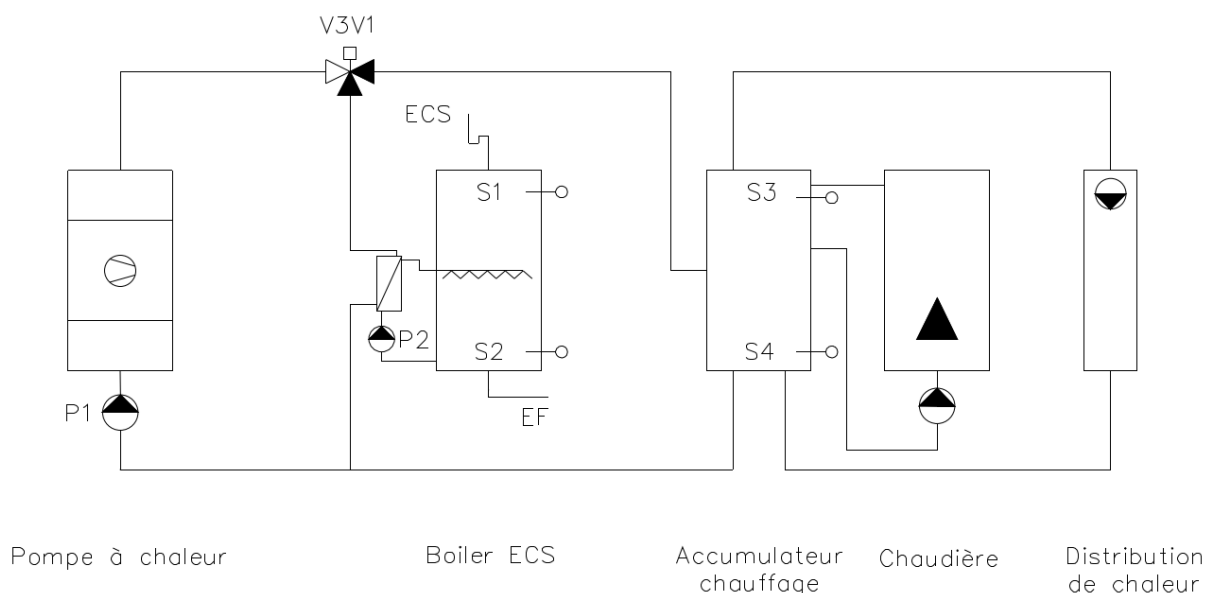


Figure 53 : Schéma hydraulique pour le fonctionnement en parallèle d'une PAC avec une chaudière non-modulante

Ce schéma répond au cas où une chaudière existante qui ne module pas est utilisée en complément à la PAC air/eau.

L'objectif visé par ce schéma est de faire fonctionner une chaudière non-modulante sans perturber la PAC. La séparation hydraulique entre la PAC et la chaudière est nécessaire afin de protéger le retour PAC étant donné que les courbes de chauffe des deux producteurs de chaleur sont différentes.

Caractéristiques :

- La vanne trois voies V3V1 est de type tout ou rien.
- Adapté si la chaudière en place ne module pas.
- Si la chaudière est vouée à disparaître dans le futur il n'y aura que peu de modifications nécessaires.
- Peut répondre à un choix économique de garder une part de la production non-renouvelable, notamment dans l'attente d'une rénovation ultérieure de l'enveloppe du bâtiment.

Remarques :

- Il est important de noter qu'idéalement il faudrait mettre un accumulateur chauffage séparé pour la chaudière. Toutefois, l'expérience montre que la place manque souvent, et dans ce cas un seul accumulateur est possible selon ce schéma.
- Dans le cas illustré ici, la capacité de l'accumulateur chauffage en partie haute doit être dimensionnée pour correspondre à un temps minimal de fonctionnement de la chaudière de 15 minutes.



- Si la place le permet, on favorisera un échangeur de chaleur interne pour l'eau chaude sanitaire. Attention à respecter la surface d'échange nécessaire.

La production d'ECS est garantie uniquement par la PAC, sans appoint fossile. Ce choix est motivé par le fait que l'ECS représente dans l'existant une part relativement faible de l'énergie, et on estime qu'elle peut être fournie à 100% par la PAC. Ainsi, on simplifie la schématique de l'installation et l'appoint fossile est complètement à l'arrêt hors de la période de chauffage. L'efficacité globale de l'installation s'en trouve ainsi améliorée, d'autant plus que la PAC fonctionne hors saison de chauffe durant la période où les températures extérieures sont les plus avantageuses. Toutefois, comme la PAC assure seule la production d'ECS, elle doit être capable de répondre à l'intégralité de la demande d'ECS y compris durant les mois les plus froids où sa capacité est réduite. Ceci peut donc avoir un impact sur le dimensionnement du système (puissance PAC). Cet impact a été assumé lors de l'élaboration des schémas.



Fonctionnement parallèle avec une chaudière non modulante

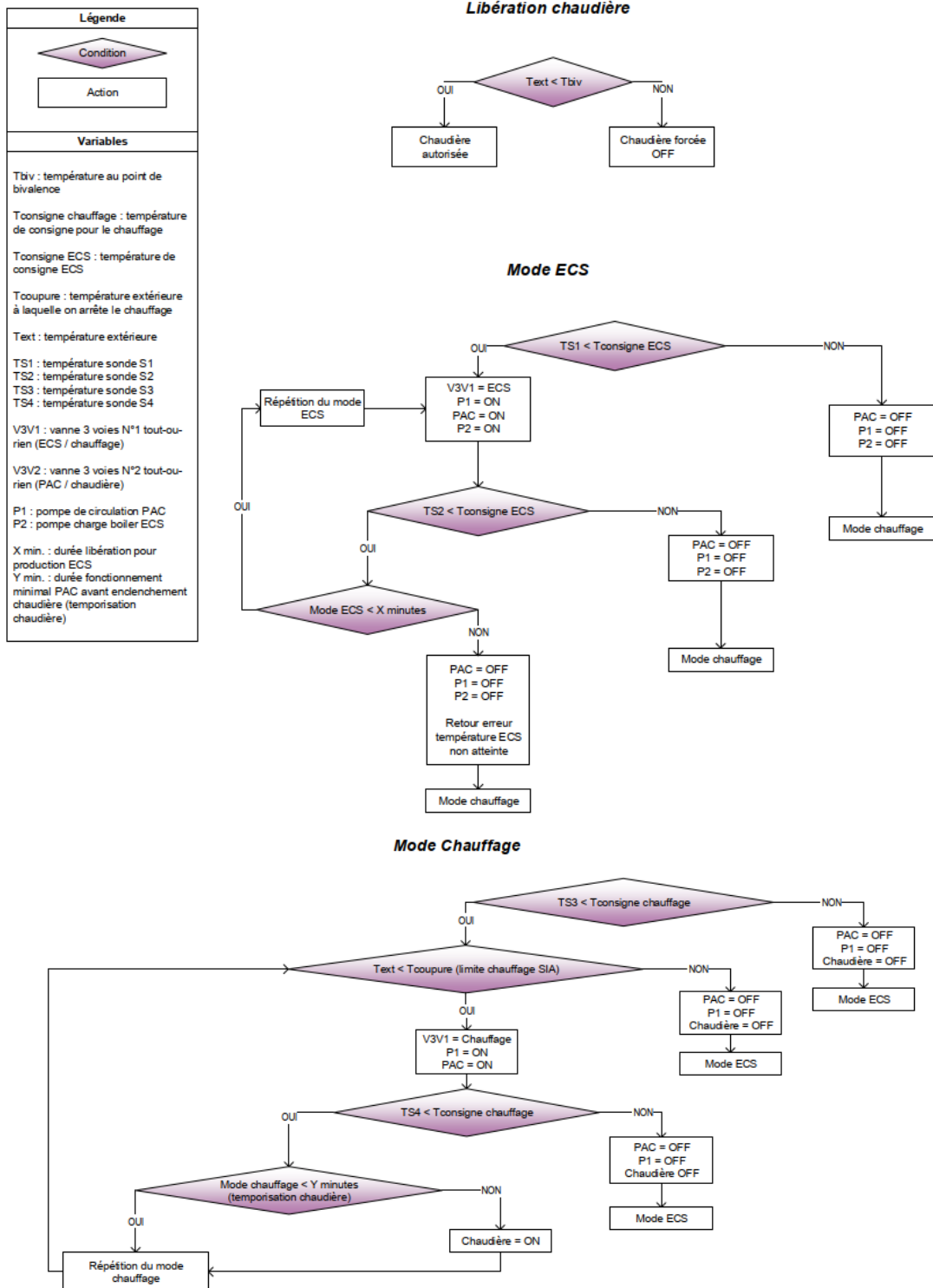


Figure 54 : Analyse fonctionnelle pour le fonctionnement en parallèle d'une PAC avec une chaudière non modulante



D. Fonctionnement alternatif avec une chaudière non-modulante

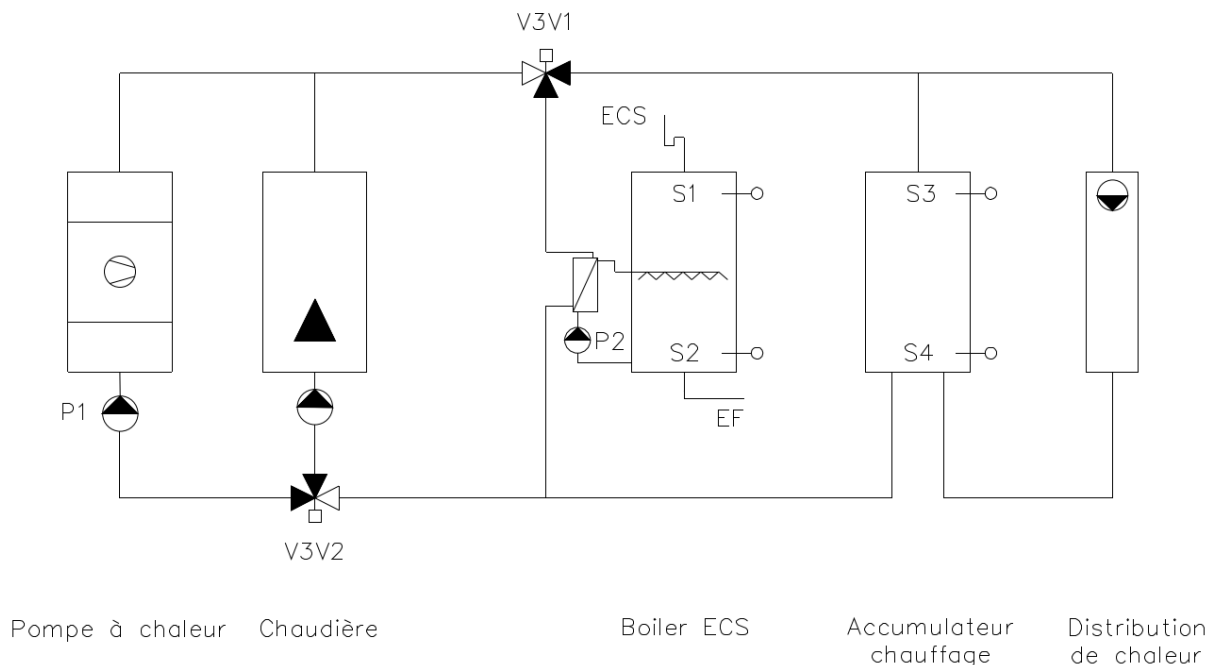


Figure 55 : Schéma hydraulique pour le fonctionnement alternatif d'une PAC avec une chaudière non-modulante

Ce schéma répond au cas où une chaudière existante qui ne module pas et qui sera déconnectée à terme est utilisée en complément à la PAC air/eau. Il permet d'exploiter l'installation de manière bivalente temporairement, en anticipant sur la future installation monovalente PAC.

L'objectif visé par ce schéma est de faire fonctionner une chaudière non-modulante avec une PAC, sachant que cette exploitation bivalente sera limitée dans le temps. La chaudière pourrait venir à disparaître des suites de la réduction des besoins et des températures par des mesures d'assainissement de l'enveloppe et de la distribution de chaleur.

Caractéristiques :

- Les vannes trois voies V3V1 et V3V2 sont de type tout ou rien
- Adapté si la chaudière en place ne module pas.
- Peut répondre à un choix économique de garder une part de la production non-renouvelable.
- Définition du point de bivalence :
 - o Idéalement pour qu'on puisse se passer de la puissance de la chaudière après rénovation de l'enveloppe du bâtiment
 - o Déterminé par les températures de retour du système de distribution
 - o Maximiser la part de la pompe à chaleur



Remarques :

- Il est important de noter que, en fonction du point de bivalence choisi, la part de la PAC par rapport aux besoins totaux pourra être relativement modeste comparé aux autres variantes. (Ceci n'est pas visible dans les résultats de simulation présentés au chapitre 7 car les systèmes modélisés ont tous été dimensionnés de sorte à ce que la PAC assure 80% de la production de chaleur).
- Lorsque la chaudière viendra à disparaître, les branchements hydrauliques en place ne nécessiteront pas de modification majeure.
- Si la place le permet, on favorisera un échangeur de chaleur interne pour l'eau chaude sanitaire. Attention à respecter la surface d'échange nécessaire.

La production d'ECS est garantie uniquement par la PAC, sans appoint fossile. Ce choix est motivé par le fait que l'ECS représente dans l'existant une part relativement faible de l'énergie, et on estime qu'elle peut être fournie à 100% par la PAC. Ainsi, l'appoint fossile est complètement à l'arrêt hors de la période de chauffage. L'efficacité globale de l'installation s'en trouve améliorée, d'autant plus que la PAC fonctionne hors saison de chauffe durant la période où les températures extérieures sont les plus avantageuses. Toutefois, comme la PAC assure seule la production d'ECS, elle doit être capable de répondre à l'intégralité de la demande d'ECS y compris durant les mois les plus froids où sa capacité est réduite. Ceci peut donc avoir un impact sur le dimensionnement du système (puissance PAC). Cet impact a été assumé lors de l'élaboration des schémas.

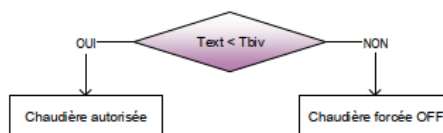
Dans le cas présent, il serait toutefois possible de produire l'ECS par la chaudière sans modification hydraulique.



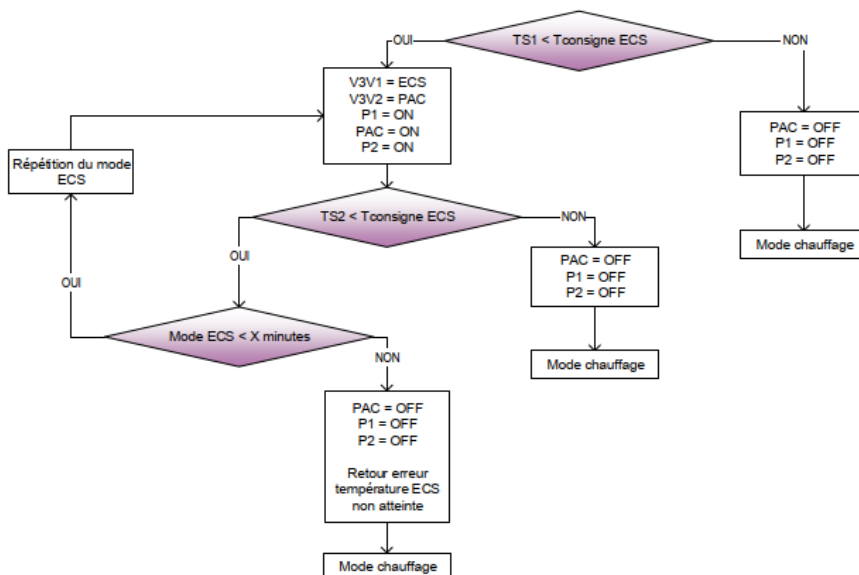
Fonctionnement alternatif avec une chaudière non modulante

Légende
<div>Condition</div>
<div>Action</div>
Variables
Tbiv : température au point de bivalence
Toonsigne chauffage : température de consigne pour le chauffage
Toonsigne ECS : température de consigne ECS
Tcoopure : température extérieure à laquelle on arrête le chauffage
Text : température extérieure
TS1 : température sonde S1
TS2 : température sonde S2
TS3 : température sonde S3
TS4 : température sonde S4
V3V1 : vanne 3 voies N°1 tout-ou rien (ECS / chauffage)
V3V2 : vanne 3 voies N°2 tout-ou rien (PAC / chaudière)
P1 : pompe de circulation PAC
P2 : pompe charge boiler ECS
X min. : durée libération pour production ECS
Y min. : durée fonctionnement minimal PAC avant enclenchement chaudière (temporisation chaudière)

Libération chaudière



Mode ECS



Mode Chauffage

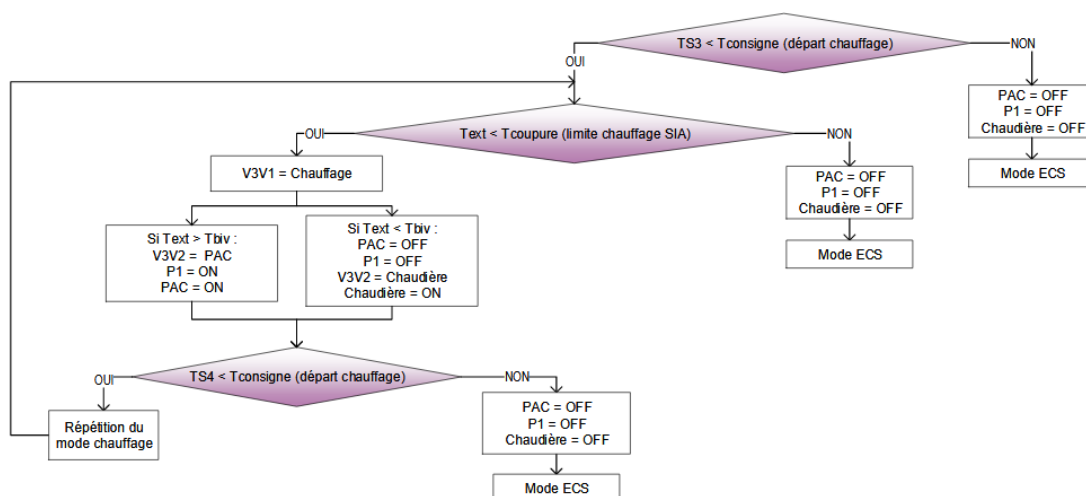


Figure 56 : Analyse fonctionnelle pour le fonctionnement alternatif d'une PAC avec une chaudière non-modulante



5 Dimensionnement des systèmes

Afin de pouvoir combler les besoins de chaleur du bâtiment et de garantir un fonctionnement optimal, les divers composants du système doivent être correctement dimensionnés. Dans les systèmes PAC air-eau sélectionnés (chapitre 4), il s'agit en particulier de la PAC, de la chaudière (en cas de bivalence) et des ballons tampons. Ce chapitre présente la méthode de dimensionnement utilisée pour les différents systèmes étudiés dans le cadre de ce projet.

Cette méthode est en majeure partie fondée sur les pratiques appliquées en bureau d'études. La principale différence réside dans le fait que, dans ce projet, nous modélisons numériquement les systèmes. La demande de chaleur du bâtiment étant une donnée d'entrée de ces modèles énergétiques, elle est connue, ce qui n'est pas toujours le cas dans la réalité. En pratique, dans le cas d'un bâtiment neuf, la demande peut seulement être estimée. Pour un bâtiment existant, il n'y a pas toujours des relevés détaillés des compteurs de chaleur et la demande est souvent évaluée à partir de factures de gaz ou de mazout.

5.1 Pompe à chaleur

5.1.1 Principe global

Pour la pompe à chaleur, le dimensionnement consiste à évaluer séparément la puissance requise pour chaque mode de fonctionnement (chauffage et ECS) et à retenir la puissance la plus élevée des deux, c'est-à-dire la plus contraignante.

Une attention particulière doit être portée sur le fait que la capacité de la PAC varie fortement en fonction de la température extérieure et de la température de production. Comme le montre la Figure 57, il est par exemple possible qu'une pompe à chaleur donnée soit capable de fournir la chaleur nécessaire pour l'ECS durant l'été ou la mi-saison, mais ne dispose pas de suffisamment de puissance durant l'hiver. Il est donc nécessaire de tenir compte de ces deux températures lors du dimensionnement du système et de bien identifier les cas critiques.

On désigne généralement les conditions d'opération d'une PAC air-eau par « @ A ...°C / W ...°C » ou « @ ...°C / ...°C » qui est l'abréviation de la température de l'air extérieur (« A ...°C ») et la température de l'eau produite (« W ...°C »).

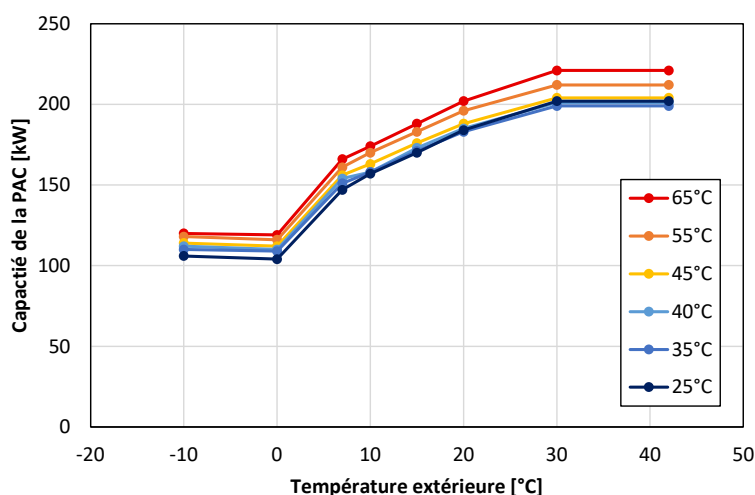


Figure 57 : Exemple d'évolution de la capacité d'une PAC en fonction de la température extérieure et de la température de production



Dans le cas des schémas hydrauliques choisis dans cette étude (voir chapitre 4), la PAC assure l'intégralité de la demande de chaleur pour l'ECS, quel que soit le type de système (monovalent ou bivalent). Elle doit donc être capable de combler la demande d'ECS en tout temps, y compris durant l'hiver lorsque la température extérieure est la plus basse. Comme la préparation d'ECS implique des niveaux de température élevés (60-65°C), les conditions critiques en mode ECS correspondent alors à la température extérieure minimale (-7°C pour le plateau suisse) et une température de production de 65°C.

En mode chauffage, les conditions critiques varient en fonction du type de système.

5.1.2 Systèmes monovalents

Pour un système monovalent, la PAC doit pouvoir fournir l'intégralité de la demande de chaleur, y compris au cœur de l'hiver où sa capacité est fortement réduite (voir Figure 57).

C'est à cette période-là que la température d'alimentation du système de chauffage est la plus élevée. Par exemple, dans le cas du site pilote « St-Julien », la courbe de chauffe indique une température de distribution d'environ 55°C à une température extérieure de -7°C. Les conditions critiques en mode chauffage correspondent donc à la température extérieure minimale (-7°C pour le plateau suisse) et une température de production à déterminer à partir de la courbe de chauffe du bâtiment.

La puissance requise en chauffage dans ces conditions est évaluée à partir de la demande de chauffage journalière telle que :

$$P_{PAC,ch} = \frac{\max(E_{ch,jour})}{t_{ch}} \quad (1)$$

où $E_{ch,jour}$ correspond à la demande journalière de chauffage et t_{ch} au temps imparti pour chauffer.

Dans le cas présent, la PAC produit de la chaleur alternativement pour le chauffage et l'ECS. On prévoit sur une journée environ 6 cycles d'ECS d'une durée d'1h chacun. Il reste alors 18h (t_{ch}) pour répondre à la demande de chauffage.

En mode ECS, comme mentionné précédemment, les conditions critiques correspondent à une température extérieure de -7°C (pour le plateau suisse) et une température de production de 65°C. La puissance requise pour l'ECS ($P_{PAC,ECS}$) dans ces conditions est déterminée selon la norme SIA 385/2 en prenant pour hypothèse des pertes de stockage et distribution de 30% et 6 cycles de charge par jour, d'une durée de 1h chacun.

De plus, on considère un débit de soutirage élevée, égal à 45 L/hab.jour. Cela correspond à une valeur haute utilisée en bureau d'étude en pré-dimensionnement. Ce débit journalier de soutirage sera utilisé quelle que soit la demande simulée dans les modèles énergétiques mis en place puisque le débit de soutirage réel n'est pas connu.

La méthode de dimensionnement pour un système monovalent, résumée à la Figure 58, consiste donc à :

1. Déterminer la puissance requise en mode chauffage et ECS dans leurs conditions critiques respectives, soit -7°C / ($T_{courbe\ de\ chauffe}$ à -7°C) en mode chauffage pour le plateau suisse, et -7°C/65°C pour le mode ECS
2. Sélectionner, pour chaque mode, une PAC parmi les modèles disponibles ayant une capacité égale ou supérieure à la puissance requise dans ces conditions
3. Comparer les capacités des deux PAC sélectionnées aux conditions nominales du constructeur (généralement 7°C/45°C ou 7°/55°C) et conserver celle de plus grande capacité

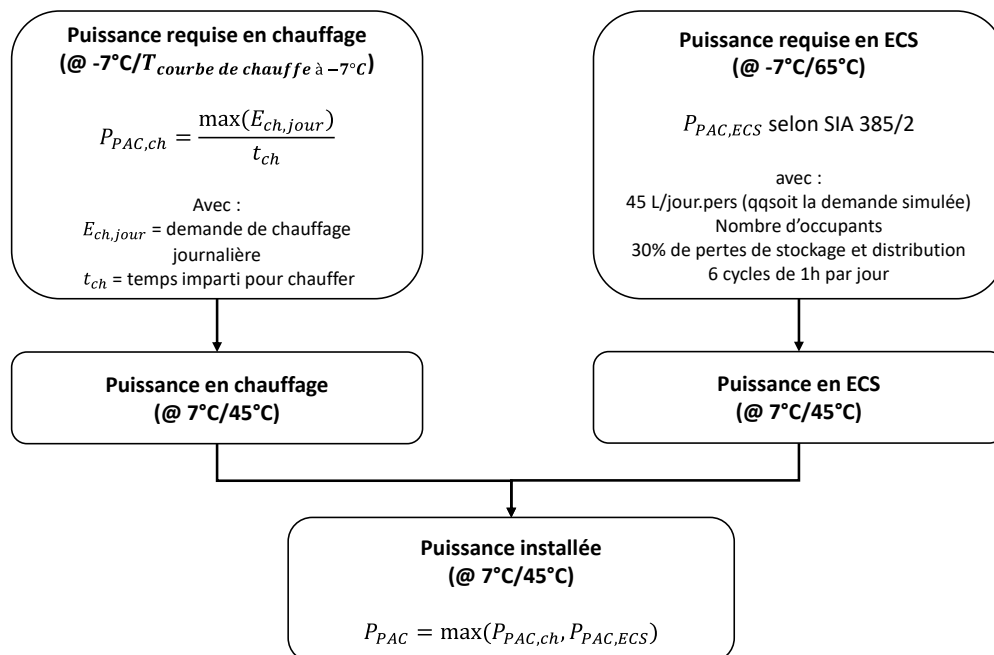


Figure 58 : Schéma de la méthode de dimensionnement de la PAC pour un système monovalent

5.1.3 Systèmes bivalents

Dans le cas d'un système bivalent, le calcul de la puissance requise pour l'ECS s'effectue de la même manière que pour un système monovalent. Ceci vient du fait que la PAC est le seul générateur de chaleur pour l'ECS pour les schémas hydrauliques choisis (voir chapitre 4). La puissance requise est donc déterminée selon la norme SIA 385/2 avec les mêmes paramètres.

En mode chauffage, comme la PAC ne couvre pas l'intégralité de la demande de chauffage, elle n'est pas dimensionnée pour des conditions critiques. A la place, elle est dimensionnée de sorte à atteindre un objectif de couverture des besoins. Cette valeur cible correspond généralement à assurer 80% de la production de chaleur totale (chauffage et ECS) à partir de ressources non fossiles, telle qu'une PAC air-eau.

Pour bon nombre de cas, installer une PAC de puissance égale à environ 50% de la demande horaire maximale (au point de bivalence) permet de couvrir 80% de la demande totale (chauffage et ECS) du bâtiment. Dans un schéma hydraulique pour lequel la PAC assure seule la production de chaleur pour l'ECS, cela peut varier légèrement.

La valeur de 50% peut alors servir de point de départ pour estimer le taux de couverture à partir d'une analyse horaire entre la demande et la capacité de la PAC de la manière suivante :

1. Sélectionner une PAC de capacité aux conditions nominales égale à environ 50% de la demande horaire maximale
2. Identifier la température de bivalence (T_{biv}) qui correspond à l'intersection entre la signature énergétique (chauffage uniquement) et la courbe de capacité de la PAC (ex. Figure 59 et Figure 60)
3. Calculer l'énergie fournie à chaque heure par la PAC pour le chauffage (ex. Figure 59 et Figure 60) :

- Si $T_{ext} \geq T_{biv}$: la PAC fournit la demande de chauffage



- Si $T_{ext} < T_{biv}$: dans le cas d'un système bivalent parallèle, la PAC fournit l'énergie correspondant à sa capacité et la chaudière assure le complément ; dans le cas d'un système bivalent alternatif, seule la chaudière opère en-dessous du point de bivalence, la PAC ne produit rien
4. Calculer l'énergie totale (chauffage et ECS) fournie pas la PAC, sachant qu'elle produit toute la chaleur pour l'ECS. Si la production de chaleur de la PAC correspond à l'objectif fixé, soit 80% de la demande totale, ce modèle de PAC est retenu pour le mode chauffage. Si la production est inférieure ou supérieure à l'objectif, un nouveau modèle est sélectionné et les étapes 2 à 4 sont répétées.

Ensuite, une fois qu'une PAC a été sélectionnée pour chaque mode (chauffage et ECS), on applique la même procédure que pour un système monovalent : on compare les capacités des deux PAC sélectionnées aux conditions nominales du constructeur (généralement 7°C/45°C ou 7°/55°C) et on conserve celle de plus grande capacité.

L'ensemble de la procédure de dimensionnement de la PAC pour un système bivalent est résumée à la Figure 61.

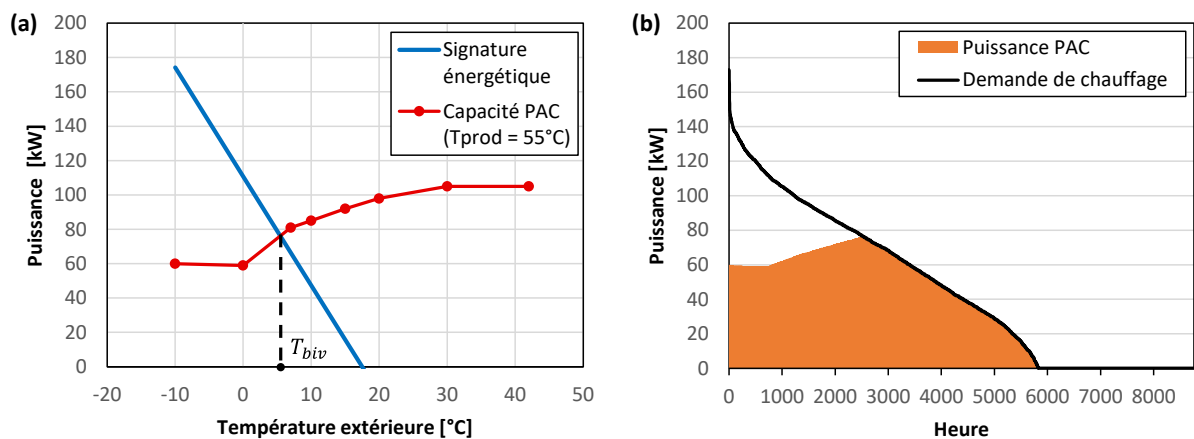


Figure 59 : (a) Identification du point de bivalence et (b) couverture de la demande par la PAC pour un système bivalent parallèle

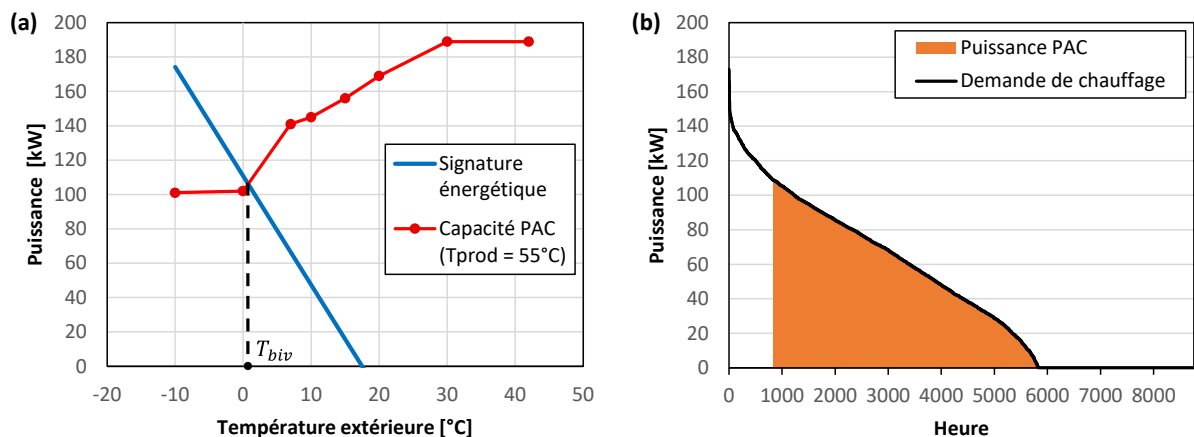


Figure 60 : (a) Identification du point de bivalence et (b) couverture de la demande par la PAC pour un système bivalent alternatif

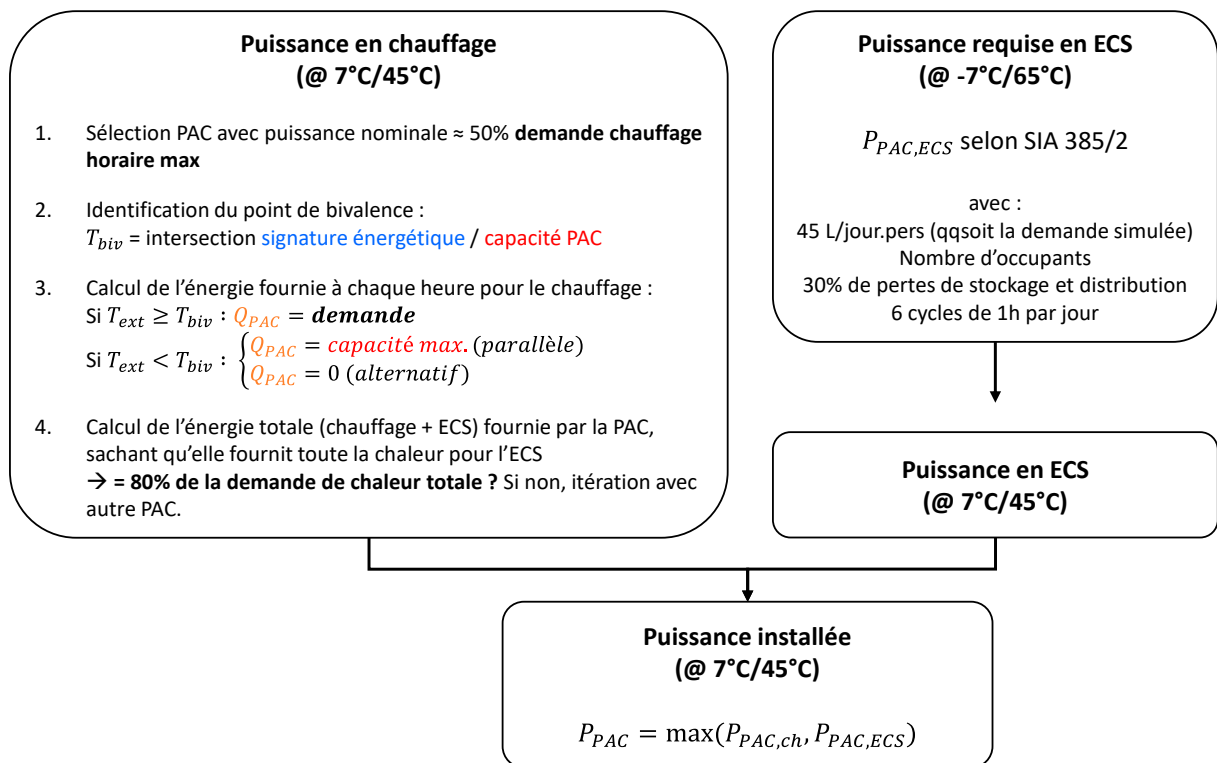


Figure 61 : Schéma de la méthode de dimensionnement de la PAC pour un système bivalent

5.2 Chaudière

Le dimensionnement de la chaudière repose sur l'hypothèse que le bâtiment est déjà alimenté par une chaudière avant le changement d'agent énergétique, c'est-à-dire avant la mise en place du système PAC air-eau bivalent.

On considère que la chaudière existante a une capacité égale à la demande maximale en chauffage et qu'elle a 2 allures.

Dans le cas d'un système bivalent parallèle, la chaudière complète la production de chaleur de la PAC en-dessous du point de bivalence. On suppose alors que seule la première allure de la chaudière est nécessaire, soit 50% de la capacité. L'élévation de température du fluide est fixée égale à 10°C.

Dans le cas d'un système bivalent alternatif, la chaudière assure l'intégralité de la production en-dessous du point de bivalence. Les deux allures sont donc nécessaires et l'élévation de température du fluide est de 20°C.

Le système bivalent parallèle avec chaudière modulante fait cependant exception à la règle. En effet, les bâtiments visés par des projets de rénovation de la chaufferie sont rarement équipés d'une chaudière modulante, puisque cette technologie est relativement récente. Le cas du système PAC air-eau avec chaudière modulante correspond donc plutôt à l'installation d'une chaudière neuve en même temps que le changement d'agent énergétique, ou au remplacement de la chaudière non-modulante alors que le système bivalent est déjà en place.



5.3 Ballons tampons

5.3.1 Ballon de chauffage

Le ballon de chauffage est dimensionné de sorte à garantir un temps de fonctionnement de la PAC d'au moins 20 minutes à chaque fois qu'elle s'enclenche. Le but est d'éviter à la PAC d'avoir des enclenchements trop fréquents et des cycles trop courts, qui pourraient l'endommager et réduire sa durée de vie.

Le cas critique correspond à l'activation de la PAC lorsque la température extérieure est proche de la température de non-chauffage du bâtiment (soit environ 15°C). Dans ces conditions, la demande de chauffage est faible et la capacité de la PAC est élevée (voir Figure 57). Les besoins de chauffage seront donc rapidement comblés par la PAC.

Lorsque la PAC s'enclenche, on considère qu'elle n'active d'abord qu'un seul compresseur. C'est donc la puissance d'un seul compresseur qui est considérée pour le dimensionnement du ballon. De plus, la PAC s'active lorsque la température mesurée dans le ballon est inférieure à la consigne. Elle s'éteint ensuite lorsque la température du ballon atteint la consigne + l'hystérésis.

Le volume minimum requis pour le ballon de chauffage est donc déterminé avec l'équation suivante :

$$V_{ballon,ch} = \frac{P_{PAC,1\ comp.} \cdot t_{min}}{C_v \cdot \Delta T} \quad (2)$$

Où :

- $P_{PAC,1\ comp.}$ représente la puissance de la PAC (en kW) avec un seul compresseur activé, une température extérieure de 15°C et une température de production égale à la température donnée par la courbe de chauffe à 15°C
- t_{min} est le temps de fonctionnement minimum (en heure), soit 20 min
- C_v est la capacité thermique volumique du fluide (en kWh/m³.K)
- ΔT est la différence de température entre les limites basse et haute de la consigne du ballon (hystérésis)

5.3.2 Ballon d'ECS

Tout comme la puissance PAC requise en mode ECS, le ballon d'ECS est dimensionné selon la norme SIA 385/2. Les mêmes paramètres sont utilisés, quelle que soit la demande simulée, à savoir :

- un débit de soutirage de 45 L/hab.jour
- 30% de pertes de stockage et distribution
- 6 cycles d'ECS par jour, d'une durée de 1h chacun



6 Modélisation des systèmes

Le suivi énergétique de deux sites pilotes présenté au chapitre précédent a permis de mettre en évidence divers problèmes de fonctionnement des installations de production de chaleur, ainsi que d'améliorer leurs performances énergétiques. Afin d'aller plus loin dans l'analyse de systèmes de pompes à chaleur sur l'air pour le résidentiel collectif, ce chapitre propose une modélisation énergétique de différents schémas hydrauliques définis au chapitre 4.

Après avoir justifié le choix du logiciel de simulation énergétique sélectionné, le système du site pilote « St-Julien » est modélisé et validé à partir des mesures in situ. Le modèle obtenu est ensuite normalisé afin d'obtenir un système monovalent de référence qui sert alors de base à l'élaboration des modèles numériques des systèmes bivalents. Au final, les 4 systèmes simulés sont comparés à l'aide de divers indicateurs de performance.

6.1 Choix du logiciel de simulation

En guise de travail préliminaire, nous avons tenté de reproduire le cas de Saint-Julien avec des simulations menées en parallèle avec les logiciels Polysun¹ et TRNSYS (Klein, 2010).

Dans les deux cas, la configuration simulée correspondait étroitement au système mesuré, tant en termes de composants, que de modes de régulation et de consignes de fonctionnement. A la différence du système mesuré (2 PAC de 156 kW, soit un système largement surdimensionné par rapport à la demande de pointe de 180 kW), la simulation s'est concentrée sur un système composé d'une seule PAC de 156 kW, ce qui devait en principe permettre de couvrir 99% de la demande de chaleur.

Par ailleurs, la principale différence entre les modèles TRNSYS et Polysun concernait la dynamique horaire de la demande de chauffage, donnée en input de la simulation :

- Dans le cas de TRNSYS, la demande de chauffage peut être définie simultanément en termes de puissance et de température de retour associée (à partir de laquelle, étant donné la température en provenance du stock, le débit est dérivé).
- Polysun permet uniquement de définir la puissance, tandis que la température de retour et le débit associés sont définis en interne, par le modèle de radiateur intégré au logiciel.

A ce stade, le modèle TRNSYS donnait déjà des résultats préliminaires très similaires aux valeurs mesurées (tant pour la production d'ECS que pour le chauffage, et tant en valeurs journalières qu'en bilan annuel). Nous n'avons cependant pas réussi à valider correctement le modèle Polysun, qui ne permettait pas de répondre à la demande de chauffage (non seulement en termes de puissance de pointe, mais tout au long de la saison de chauffage), avec au final un déficit annuel de chauffage trop important (- 25%). Comme alternative au modèle de radiateur (mal décrit dans le tutoriel Polysun, et pour lequel l'effet des différents paramètres restait incertain), nous avons utilisé le modèle simplifié dit « puits de chaleur », intégré à Polysun, entraînant cependant un déficit annuel de chauffage encore plus élevé (- 85%).

Une analyse ultérieure a mis en évidence que le problème provenait vraisemblablement d'un sous-dimensionnement de l'échangeur de chaleur pour la production ECS, résultant en des cycles de charge trop long, ce qui ne permettait pas de libérer la PAC pour la production de chauffage.

Quoiqu'il en soit, fort de ces constats préliminaires, notre choix pour la suite des travaux de simulation s'est porté sur le logiciel TRNSYS.

¹ Vela Solaris, Polysun simulation software, <https://www.velasolaris.com/?lang=en>



6.2 Validation du modèle monovalent

Le suivi énergétique du projet pilote « St-Julien » a permis d'analyser le comportement et la performance en situation d'usage d'un système PAC monovalent dans un bâtiment résidentiel collectif non rénové (section 3.5). Le présent chapitre décrit brièvement la simulation numérique du système en question, puis présente la validation des résultats obtenus. Cette première étape est cruciale afin de s'assurer que le modèle est capable de représenter de façon juste et fidèle la réalité (Bontemps 2015). Cela permettra de disposer d'une base solide pour la modélisation des 3 autres systèmes décrits au chapitre 4 et la réalisation d'une étude de sensibilité.

La validation du modèle a été effectuée dans le cadre du travail de Master de Omar Montero D. (Montero D. 2020) pour la période du 1^{er} octobre 2018 au 30 septembre 2019 (1 an). Cette section présente les résultats principaux d'une validation sur l'année suivante, à savoir du 1^{er} juillet 2019 au 30 juin 2020, réalisée à partir de ces travaux. Ce choix est motivé par le fait que la majeure partie des dysfonctionnements identifiés sur le site pilote ont été corrigés antérieurement à cette seconde période. Les conditions de mesure correspondent alors à des conditions normales d'opération du système, sans panne des PAC, d'activation excessive des circulateurs etc.

6.2.1 Paramètres et entrants de la simulation

Les principaux paramètres de la simulation sont présentés dans le Tableau 9 et le Tableau 10. Le dimensionnement des PAC et des ballons tampons est choisi identique au système réel. De plus, tel que dans la réalité, les circulateurs des PAC sont à débit fixe. En dehors de la période de chauffage, une seule PAC assure la production de chaleur, tandis que les deux PAC sont en fonctionnement durant l'hiver.

Tableau 9 : Paramètres généraux de la simulation du site pilote "St-Julien"

Période de validation	1 ^{er} juillet 2019 au 30 juin 2020 (1 an)
Logiciel	TRNSYS 17
Pas de temps de simulation	1 minute

Tableau 10 : Paramètres des principaux éléments du système du site pilote "St-Julien"

Puissance PAC (@ A 7°C/W 45°C)	312 kW
Volume du ballon de chauffage	1 m ³
Volume du ballon d'ECS	2 m ³

Les diverses données d'entrées du modèle sont fournies en valeur horaire et ont été établies à partir des mesures réalisées sur le système. Les besoins de chauffage sont déterminés à partir de la puissance horaire de chauffage. Les besoins d'ECS sont simulés à partir de la température et du débit d'eau froide qui arrive en bas du réservoir. Enfin, la température extérieure provient de la station météo de l'Université de Genève au site de Batelle, site situé à proximité du site pilote « St-Julien ».

Les températures de consigne et courbes de chauffe sont également fixées à partir des valeurs mesurées de sorte à prendre en compte au maximum les éventuels changements de régulation apportés au système durant la période de validation.



6.2.2 Résultats et discussions de la validation

Les résultats annuels sont présentés à la Figure 62. On observe que la simulation reproduit fidèlement la demande et la production totale du système réel. Les besoins de chaleur sont identiques pour le chauffage (donnée d'entrée du modèle) tandis que pour l'ECS l'erreur s'élève à seulement 3% (voir Tableau 11). Côté production, la PAC fournit la même quantité de chaleur au condenseur à 1% près.

Les principaux écarts entre mesure et simulation résident dans la reproduction des performances de la PAC. En effet, le COP annuel (COPa) simulé s'élève à 2.8 (auxiliaires exclus) contre 2.3 dans la réalité. L'électricité consommée par la PAC est sous-estimée de 19% par le modèle, que l'on tienne compte de l'énergie des auxiliaires ou non (Tableau 11).

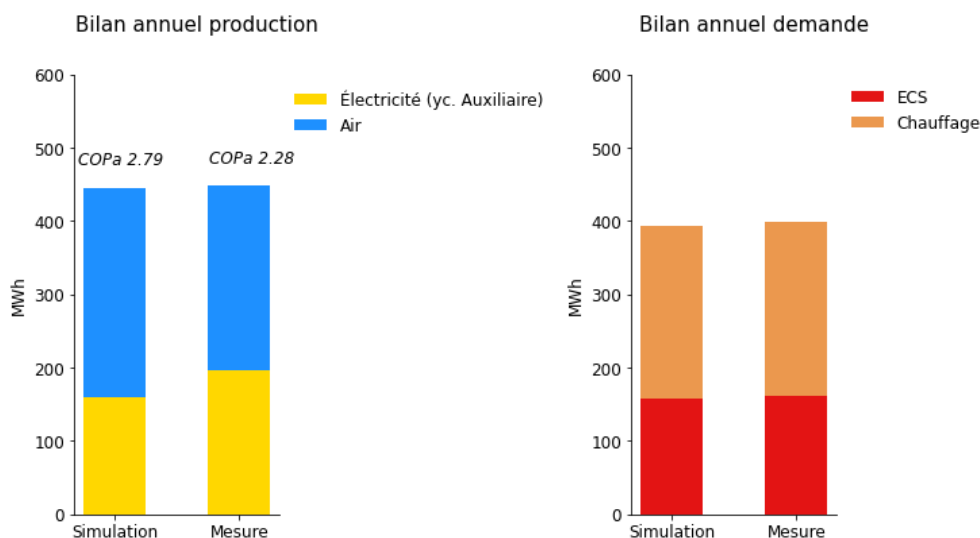


Figure 62 : Comparaison des bilans d'énergie annuels entre mesure et simulation pour la période du 1^{er} juillet 2019 au 30 juin 2020

Tableau 11 : Résultats du bilan global issus des mesures et de la simulation numérique (en MWh)

	Qpac	Epac	Ecirc	Ettotal	COPa (sans aux.)*	COPa (y.c. aux.)**	Qecs demande	Qch demande
Monitoring	448	179	17	196	2.51	2.28	162	237
Simulation	445	144	15	160	3.1	2.79	157	237
Erreur relative	-1%	-19%	-12%	-19%	23%	22%	-3%	0%
Erreur absolue	-3	-34	-2	-36	0.6	0.5	-5	1

* COP annuel sans consommation des circulateurs

** COP annuel incluant la consommation des circulateurs

Au niveau journalier (Figure 63), le constat est similaire : les besoins de chauffage et d'ECS sont fidèlement reproduits à quelques exceptions près. Il en est de même pour la production de chaleur de la PAC. En revanche, la consommation d'électricité de la PAC est sous-estimée.

En s'intéressant à la dynamique journalière (Figure 64), il apparaît que les écarts les plus importants sont observés durant la période de chauffage. Durant le reste de l'année, la simulation donne des résultats proches des valeurs simulées. On constate également que les températures aller et retour de la PAC simulées diffèrent parfois des températures mesurées. Comme ce sont des paramètres influents sur les performances de la PAC, ceci peut entraîner un léger écart de performance.

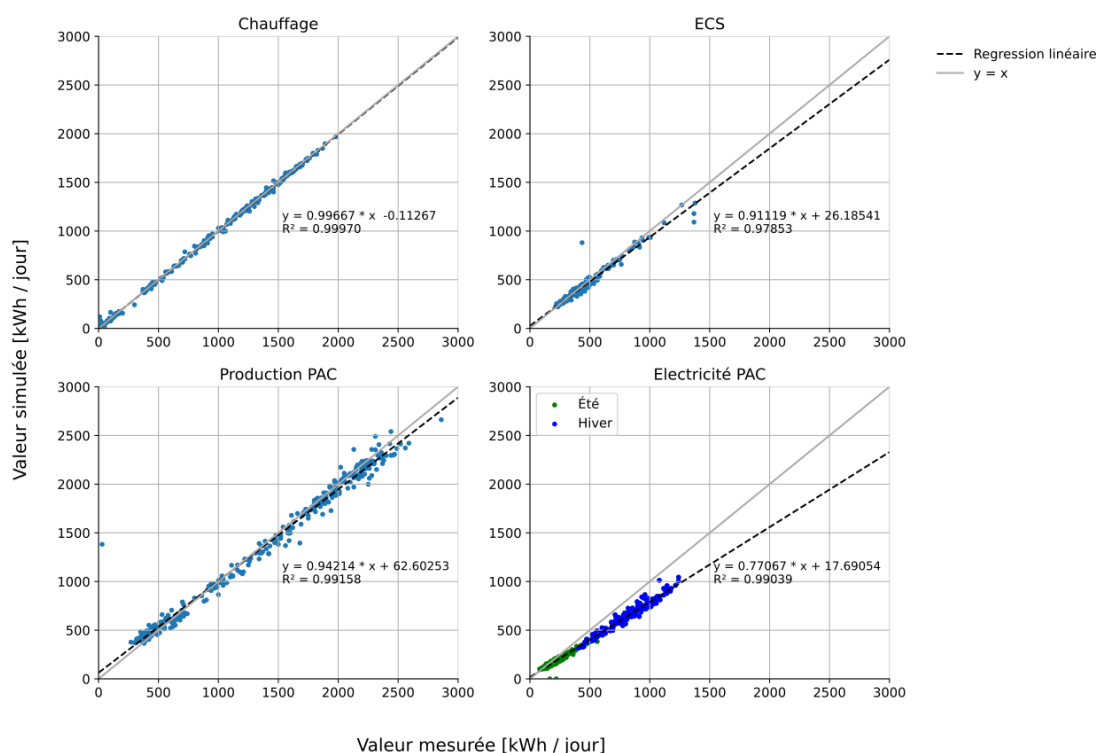


Figure 63 : Comparaison des résultats de la simulation aux mesures en termes d'énergie pour la période du 1^{er} juillet 2019 au 30 juin 2020 (valeurs journalières). La consommation d'électricité de la PAC n'inclut par la consommation des auxiliaires.

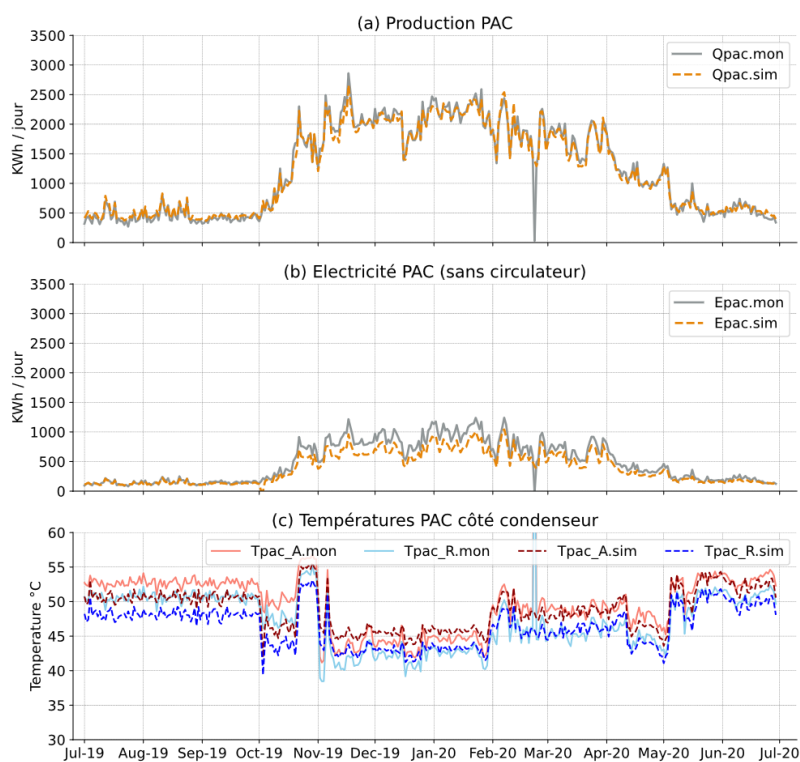


Figure 64 : Résultats de la validation journalière de la pompe à chaleur pour la période du 1^{er} juillet 2019 au 30 juin 2020



Pour aller plus loin dans l'explication de la divergence entre COP simulés et COP mesurés, la Figure 65 présente les COP journaliers en fonction de la différence entre température de production de la PAC et température extérieure. En premier lieu, on peut noter que les COP journaliers simulés s'alignent sur les courbes du fabricant, ce qui est attendu puisque les performances du constructeur sont une donnée d'entrée du modèle.

Ensuite, on constate que les données simulées ainsi que les données du constructeur ont une forme convexe, contrairement aux valeurs mesurées qui suivent une courbe convexe. L'écart est le plus important pour des différences de température entre production et air extérieur de 30 à 40°C. Cette divergence peut s'expliquer par le fait que les performances fournies par le constructeur sont évaluées pour un fonctionnement continu à pleine puissance, ce qui n'est généralement pas le cas en pratique.

Puisque les raisons de l'écart entre les valeurs mesurées et les données constructeur n'ont pas pu être déterminées avec précision, les performances de la PAC resteront évaluées à partir des données constructeur dans les prochaines simulations. Il aurait été possible d'utiliser les performances empiriques de ce site pilote, mais cela présenterait le risque de prendre en compte une dégradation du COP trop spécifique au cas étudié.

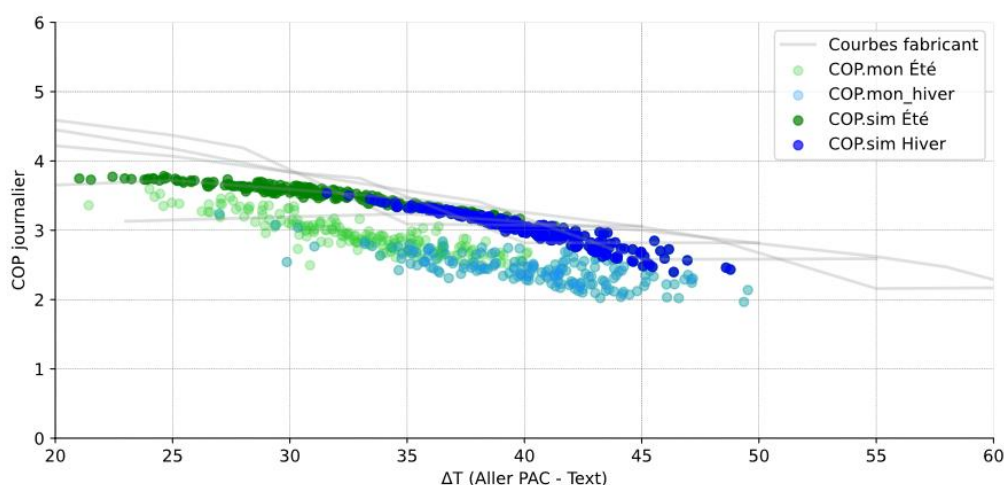


Figure 65 : Comparaison des COP journaliers (sans auxiliaires) simulés et mesurés en fonction de la différence de température entre le condenseur et l'évaporateur. La période d'hiver correspond à la période du 21 octobre 2019 au 11 avril 2020, période durant laquelle les deux PAC sont utilisées. La période d'été correspond au reste de l'année.

En conclusion, les flux entrants et sortants du système sont correctement reproduits par la simulation avec une erreur inférieure à 3 %, à l'exception de l'électricité consommée par la PAC (19 % d'erreur). Les principaux écarts sont dus : i) à la difficulté de considérer dans la simulation tous les changements manuels apportés au système réel et ii) la divergence entre la performance du fabricant de la PAC et les mesures. Malgré cela, les corrélations simulation/mesure restent très satisfaisantes pour servir de base à la modélisation des schémas proposés au chapitre 4.



6.3 Normalisation du modèle

Le modèle numérique du système monovalent présenté à la section précédente a été validé à partir de mesures in-situ. Il peut à présent servir de base pour la mise en place d'un système de référence monovalent. En effet, le modèle validé comporte un certain nombre de paramètres spécifiques au cas « St-Julien ». Il convient donc de le normaliser pour obtenir un modèle de référence.

D'une part, cela consiste à simuler le système pour une année climatique de référence au lieu d'utiliser les données climatiques mesurées sur la période d'étude choisie. D'autre part, il s'agit de modifier les paramètres du système de sorte à correspondre à un fonctionnement (températures de consigne etc.) et un dimensionnement standard.

6.3.1 Données climatiques et demande de chauffage

Dans un premier temps, la température de l'air extérieur mesurée pour la période de validation (1^{er} juillet 2019 au 30 juin 2020) est remplacée par une année climatique de référence (Figure 66). Pour cela, on utilise la température extérieure SIA 2028 (SIA 2008). Cette norme comporte 3 années climatiques typiques : froide, moyenne et chaude. La température de l'année « moyenne » est sélectionnée ici.

A titre de comparaison, le site « St-Julien » comptabilise 2584 degrés-jours de chauffage (en base 20/16) sur la période simulée pour la validation du modèle, alors que l'année SIA 2028 moyenne correspond à 3326 degrés-jours. La période simulée précédemment était donc une année chaude par rapport à la moyenne.

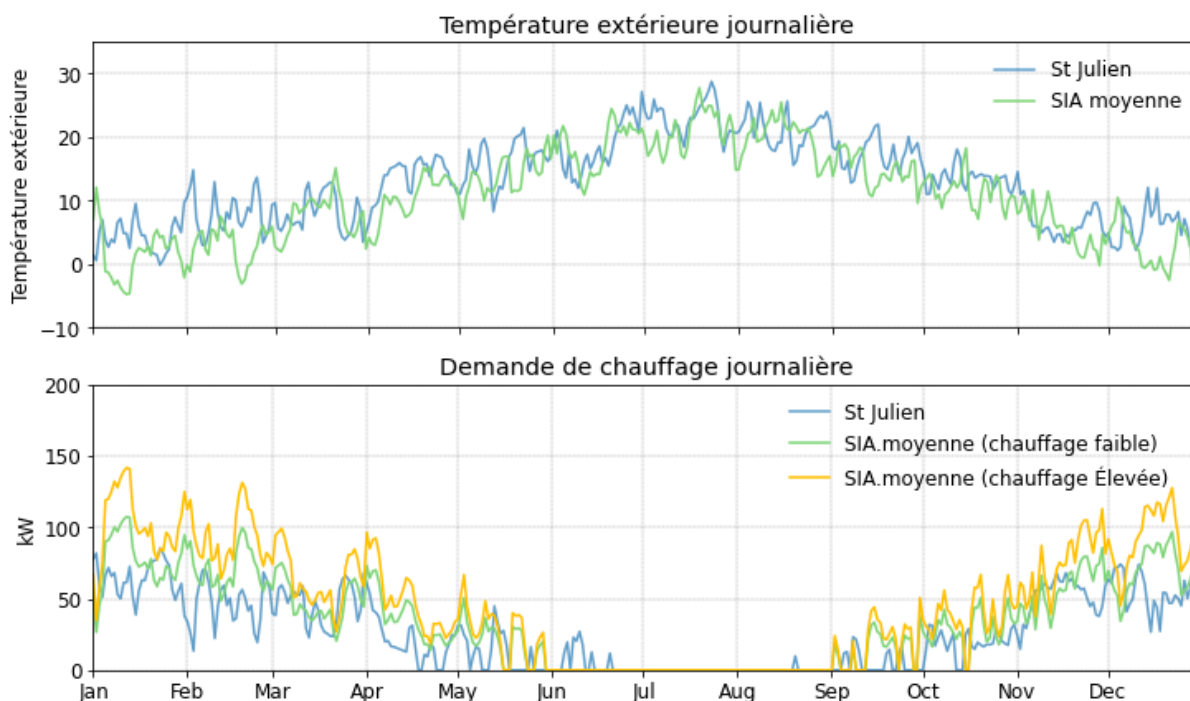


Figure 66 : Comparaison de la température extérieure et des besoins en chauffage construits selon la SIA 2028 « moyenne » à ceux mesurés sur le site pilote « St-Julien » entre le 1^{er} juillet 2019 et le 1^{er} juillet 2020 (moyennes journalières)

Ensuite, l'utilisation de données climatiques différentes implique d'ajuster la demande du bâtiment. Pour cela, on reconstitue une demande de chauffage pour l'année de référence à partir de la signature énergétique mesurée sur le site pilote « St-Julien » (« SIA moyenne (chauffage faible) » à la Figure 66).



La température de coupure est fixée à 16°C, c'est-à-dire que si la température moyenne journalière est supérieure à 16°C, le bâtiment n'est pas chauffé. De plus, on suppose que le système de chauffage est entièrement arrêté entre le 1^{er} juin et le 1^{er} septembre, quelle que soit la température extérieure journalière.

Comme montré au chapitre 3 (Figure 19), les besoins en chauffage de ce bâtiment sont faibles par rapport à son époque de construction (1948-1980) puisqu'ils correspondent au 9^{ème} décile de cette période. De plus, ils correspondent à la médiane de la période suivante (1981-2010). Afin de simuler un bâtiment plus représentatif du parc immobilier suisse moyen, les besoins en chauffage sont augmentés de sorte à atteindre une demande annuelle de 101 kWh/m².an (363 MJ/m².an), en conservant les mêmes paramètres (température de coupure de 16°C et arrêt en été). Ces besoins en chauffage de référence sont visibles à la Figure 66 : « SIA moyenne (chauffage élevé) ». Il est à noter qu'ils correspondent à la demande « Chauffage élevé » de l'étude de sensibilité du chapitre 7.

6.3.2 Demande d'ECS

Tel que montré à la Figure 20 au chapitre 3, la demande d'ECS du site pilote « St-Julien » est très élevée. Elle est égale à 55 kWh/m².an pour la période d'étude (du 1^{er} juillet 2019 au 1^{er} juillet 2020) alors que la moyenne du benchmark présenté est de 35 kWh/m².an. De plus, la valeur standard selon la norme SIA 385/2 (SIA 2015) correspond à 29.7 kWh/m².an, si l'on considère une élévation de température de 50 K entre l'eau froide et l'eau chaude sanitaire ainsi que des pertes de stockage et distribution de 30%. Il convient donc d'adapter la demande simulée afin de représenter un bâtiment typique.

Pour cela, le débit de soutirage mesuré à St-Julien (Figure 67) est remplacé par la valeur journalière SIA 385/2 pour le résidentiel collectif, soit 35 L/hab.jour, à laquelle est appliquée les profils intra-journaliers issus de cette même norme. Afin d'obtenir le débit de soutirage total, on considère une SRE de 4000 m² et une densité de 35.1 m²/hab, ce qui correspond à un volume de soutirage d'environ 4 m³/jour pour 114 habitants. Il est à noter que l'origine des pics observés durant les mois d'octobre et novembre est inconnue. En réduisant ses pics à la valeur moyenne annuelle, la consommation resterait tout de même élevée, soit environ 10 m³/jour.

De plus, la température d'eau froide mesurée sur le site pilote « St-Julien » est remplacée par une valeur constante égale à 10°C.

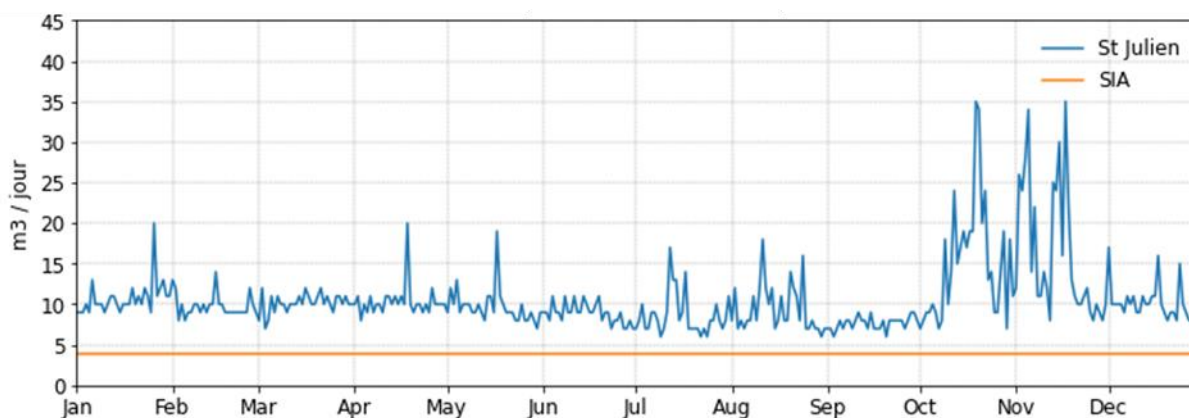


Figure 67 : Comparaison du volume d'ECS journalier (35 L/hab.jour) avec celui mesuré sur le site pilote "St-Julien" entre le 1^{er} juillet 2019 et le 1^{er} juillet 2020 (données réorganisées de janvier à décembre)



6.3.3 Système

Afin d'obtenir un modèle de référence, plusieurs modifications sont également nécessaires vis-à-vis du système de production de chaleur lui-même.

Tout d'abord, la pompe à chaleur et les ballons tampons sont redimensionnés en suivant la méthode décrite au chapitre 5. Cela permet à la fois d'adapter les capacités aux nouvelles demandes de chauffage et d'ECS et de s'affranchir d'un éventuel sous- ou sur- dimensionnement de ces éléments sur le site pilote.

Ensuite, le temps de fonctionnement de la boucle de recirculation d'ECS est réduit. Au lieu de fonctionner 24h/24, la pompe de recirculation est activée par intermittence entre 6h et 23h pour un total de 12h par jour. Cette fréquence correspond à des pertes de stockage et distribution simulées d'environ 30% pour un soutirage d'ECS de 45 L/hab.jour, valeur utilisée pour le dimensionnement (voir chapitre 5).

Enfin, divers éléments de régulation spécifiques au site pilote sont ajustés, tels que la température de consigne des ballons tampons, le débit de la pompe à chaleur etc. Les modifications apportées au modèle sont listées dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Résumé des modifications apportées pour normaliser le modèle du système monovalent « St-Julien »

Paramètre	Validation St-Julien	Système normalisé
Capacité PAC et ballons	Selon installation du site pilote	Selon méthode du chapitre 5
Chauffage : température de consigne ballon	Valeur horaire issue des mesures in situ (température en haut du ballon) $\pm 3^{\circ}\text{C}$ (hystérèse)	Courbe de chauffe + 1°C + 5°C (hystérèse)
Chauffage : localisation sonde de température consigne	nœud 1 (haut du ballon) sur 12	nœud 4 sur 12
ECS : température de consigne ballon	Valeur horaire issue des mesures in situ (température en haut du ballon) $\pm 3^{\circ}\text{C}$ (hystérèse)	50°C + 10°C (hystérèse)
ECS : localisation sonde de température consigne	nœud 1 (haut du ballon) sur 12	nœud 4 sur 12
ECS : recirculation	0.8 m ³ /h 24h/24	0.8 m ³ /h 12h/jour entre 6h et 23h
PAC : Débit	Fixe 30 m ³ /h en été (1 PAC) 60 m ³ /h en hiver (2 PAC)	Variable PAC de type « inverser » (débit et puissance variables)
PAC : ΔT au condenseur	1.9°C (valeur moyenne issue des mesures)	Variable



6.3.4 Comparaison des résultats

Les résultats obtenus pour le système normalisé sont comparés à ceux du système validé. Les principales différences observées sont les suivantes :

- Le COPa de la PAC est plus faible suite à la normalisation. Il est égal à 2.85 alors qu'il valait 3.08 pour le système validé (consommation des auxiliaires exclue). Cette baisse d'environ 7% est la conséquence de l'utilisation d'une année climatique standard, pour laquelle la température extérieure est plus froide que l'année mesurée (Figure 66). Cette baisse des températures extérieures a un impact non négligeable sur les performances de la PAC.
- Sans surprise, la demande de chauffage a augmenté très significativement de par l'utilisation d'une année climatique standard, mais surtout à cause de l'ajustement des besoins annuels en chauffage pour atteindre 101 kWh/m².an.
- La demande d'ECS est réduite de plus de moitié dans le modèle normalisé. Ceci est principalement lié à la normalisation du débit de soutirage d'ECS, qui était auparavant bien plus élevé que la norme (Figure 67).

Les autres modifications apportées au modèle pour le normaliser ont un impact bien moindre sur les résultats que ceux décrits ci-dessus.

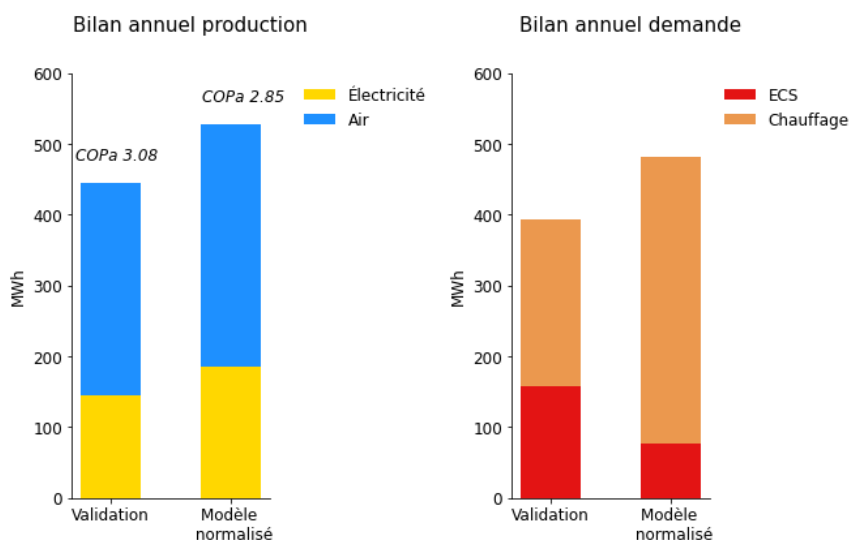


Figure 68 : Résultats de simulation pour les systèmes monovalents simulés (validation St-Julien et système normalisé)



6.4 Indicateurs de performance

Afin d'évaluer les performances de différents systèmes et de les comparer entre eux, plusieurs indicateurs sont employés dans cette étude. Il s'agit à la fois d'indicateurs de la performance énergétique et environnementale.

6.4.1 Performance énergétique

La performance énergétique des systèmes est tout d'abord évaluée à partir du COP annuel de la PAC, défini tel que :

$$COP_a = \frac{Q_{prod,PAC}}{E_{elec,PAC}} \quad (3)$$

où $Q_{prod,PAC}$ représente la quantité de chaleur produite par la PAC sur l'année et $E_{elec,PAC}$ sa consommation annuelle d'électricité (sans les auxiliaires).

Ensuite, la PAC n'étant pas le seul générateur de chaleur dans le cas des systèmes bivalents, un second indicateur est défini de sorte à caractériser la performance globale du système :

$$COP_{global} = \frac{Q_{prod,PAC} + Q_{prod,cbd}}{E_{elec,PAC} + E_{gaz,cbd}} \quad (4)$$

où $Q_{prod,cbd}$ représente la quantité de chaleur produite par la chaudière sur l'année et $E_{gaz,cbd}$ sa consommation annuelle de gaz.

Enfin, lors du dimensionnement (chapitre 5), il a été fixé comme objectif de produire 80% de la chaleur à partir de ressources renouvelables. Afin de vérifier si cet objectif est respecté ou non, la part de couverture de la production par la PAC est calculée de la manière suivante :

$$\% \text{ couv. PAC} = \frac{Q_{prod,PAC}}{Q_{prod,PAC} + Q_{prod,cbd}} \quad (5)$$

6.4.2 Performance environnementale

La performance environnementale des systèmes est évaluée en termes d'émissions de CO₂ équivalent liés à l'opération des générateurs de chaleur (PAC et chaudière).

Pour cela, les émissions liées à la consommation d'électricité de la PAC (en tCO₂eq) sont estimées à partir des travaux de (Romano, Hollmuller, et Patel 2018) sur le contenu CO₂ de l'électricité suisse de la manière suivante :

$$C_{elec} = \sum_h E_{elec,PAC} \cdot \overline{f_{elec}} \quad (6)$$

où $E_{elec,PAC}$ correspond à la consommation d'électricité de la PAC (en kWh_{elec}) et $\overline{f_{elec}}$ représente la moyenne du contenu CO₂ de l'électricité suisse des années 2016 à 2019 (en gCO₂eq/kWh_{elec}), en valeurs horaires. Il est à noter que l'on considère alors que la PAC consomme le mix électrique tel qu'il est, plutôt que d'utiliser une approche marginale dans laquelle la PAC constituerait une consommation d'électricité additionnelle potentiellement très carbonée.

Un aperçu du contenu CO₂ de l'électricité pour chacune des années de la période considérée (2016-2019) est disponible à la Figure 69. De plus, les moyennes annuelles sont présentées dans le Tableau 13. On constate une saisonnalité importante des émissions avec une électricité peu carbonée en été (moins de 100 gCO₂eq/kWh_{elec}) et très carbonée durant l'hiver, avec des pics de l'ordre de 300 gCO₂eq/kWh_{elec}, voire plus en fonction des années. De plus, avec une moyenne de



78 gCO₂eq/kWh_{elec} le mix de l'année 2019 est plus faible en CO₂ que les années 2016-2018 dont la moyenne annuelle s'élève à environ 106 gCO₂eq/kWh_{elec}. Ceci est dû au fait que la Suisse a importé moins d'électricité de ses pays voisins durant cette année-là.

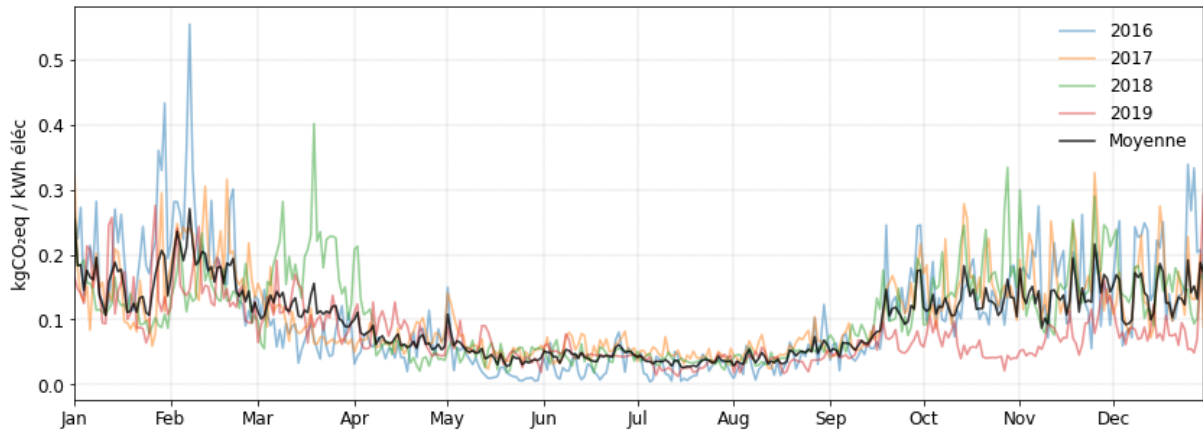


Figure 69 : Contenu CO₂ journalier moyen de l'électricité suisse entre 2016 et 2019, issu de (Romano, Hollmuller, et Patel 2018)

Tableau 13 : Contenu CO₂ moyen de l'électricité suisse entre 2016 et 2019

Année	2016	2017	2018	2019	Moyenne
Emissions [kgCO ₂ eq/kWh _{elec}]	0.104	0.106	0.107	0.078	0.099

Contrairement à l'électricité, les émissions liées à la consommation de gaz de la chaudière sont indépendantes de la période de l'année. Le facteur d'émission f_{gaz} est constant et égal à 203 gCO₂eq/kWh de gaz (OFEV 2019). L'opération de la chaudière induit donc les émissions suivantes :

$$C_{gaz} = E_{gaz, chd} \cdot f_{gaz} \quad (7)$$

On obtient alors les émissions de CO₂ totales du système (en tCO₂eq) telles que :

$$C_{sys} = C_{elec} + C_{gaz} \quad (8)$$

Afin de pouvoir comparer des systèmes répondants à des demandes de chaleur différentes, notamment dans l'étude de sensibilité présentée au chapitre 7, ce résultat est finalement rapporté à la demande thermique totale. On obtient alors des émissions en gCO₂eq/kWh_{therm} tel que :

$$C_{th} = \frac{C_{sys}}{Q_{ch} + Q_{ECS}} \quad (9)$$

où Q_{ch} et Q_{ECS} correspondent à la demande de chauffage et d'ECS annuelle du système (en kWh), respectivement.

En comparant le contenu CO₂ du mix électrique suisse (Figure 69 et Tableau 13) au facteur d'émission du gaz, on remarque que les émissions de CO₂ par unité d'énergie sont plus élevées pour le gaz la plupart du temps. Seuls les pics hivernaux dépassent le facteur d'émission du gaz. Il ne faut cependant pas oublier que le gaz sert à alimenter une chaudière dont le rendement est d'environ 90%, alors que l'électricité permet d'alimenter une PAC donc le COP est proche de 2 dans les conditions critiques.



6.5 Systèmes de référence

Parmi les 4 systèmes décrits au chapitre 4, seul le système monovalent a été décrit jusqu'à présent. Il a été validé à partir des mesures du site pilote « St-Julien », puis normalisé de sorte à constituer un cas de référence. Les systèmes restants, 3 systèmes bivalents PAC-chaudière, sont modélisés sur la base du cas de référence monovalent, en suivant les schémas et analyses fonctionnelles présentés précédemment. Cette section présente les résultats obtenus pour ces 4 systèmes de PAC air-eau. Ils serviront de référence pour l'étude de sensibilité au chapitre suivant.

Il est à noter que le seul élément de l'analyse fonctionnelle qui n'a pas été pris en compte dans les modèles des systèmes bivalents est la temporisation avant l'activation de la chaudière. Celle-ci sert à laisser un certain laps de temps à la PAC pour tenter de couvrir la demande sans recourir à l'usage de la chaudière. Cela permet donc de maximiser la production de la PAC et de limiter l'utilisation de ressources fossiles. Ainsi, les cas présentés ici sont conservateurs, c'est-à-dire qu'ils consomment plus d'énergie fossile qu'un même système dans lequel serait implémentée cette temporisation.

Par ailleurs, la connexion en 3 points au ballon de chauffage a été simulée comme une connexion en 4 points. Ce choix est à la fois motivé par la complexité de modélisation de la connexion en 3 points et par le fait que les contraintes de modélisation ne permettraient pas de reproduire fidèlement les effets d'une telle connexion. On estime que l'impact sur les résultats serait minime, en particulier au vu des débits impliqués par rapport au volume du ballon. Toutefois, cette connexion en 3 points proposée dans les schémas hydrauliques (chapitre 4) constitue une bonne pratique permettant notamment de limiter les pertes de chaleur.

Tous les systèmes répondent aux mêmes besoins de chaleur, c'est-à-dire ceux illustrés à la Figure 66 (chauffage) et à la Figure 67 (ECS) dans la section 6.3 « Normalisation du modèle ». De plus, ils sont dimensionnés selon la méthode décrite au chapitre 5. Les résultats de ce dimensionnement sont visibles dans le Tableau 14. Le rendement des chaudières est supposé égal à 90% sur PCS.

Les assemblages TRNSYS de chacun des modèles sont disponibles à l'Annexe B, ainsi que des jours typiques de fonctionnement à l'Annexe C.

Tableau 14 : Paramètres de dimensionnement des 4 systèmes de référence

Système	(A) Monovalent	(B) Biv. parallèle avec chd. modulante	(C) Biv. parallèle avec chd. non- modulante	(D) Biv. alternatif avec chd. non- modulante
Puissance PAC (@ 7°C/45°C) [kW]	274	88	88	137
Puissance chaudière [kW]	-	95	95	189
Température de bivalence [°C]	-	4.5	4.5	0.5
Volume du ballon de chauffage [m³]	2.2	2.9	2.9	2.2
Volume du ballon d'ECS [m³]	1.9	1.9	1.9	1.9



6.5.1 Comparaison des systèmes

Les bilans d'énergie et les émissions de CO₂eq de chacun des 4 systèmes de référence sont présentés à la Figure 71 et les diagrammes de Sankey correspondant se trouvent à la Figure 70.

Tout d'abord, on observe que les demandes de chaleur utiles sont bien identiques pour tous les systèmes (Figure 70), soit 120 kWh/m².an dont 19 kWh/m².an pour l'ECS. La production de chaleur s'élève à 132 kWh/m².an environ. La différence entre production et énergie utile est principalement liée aux pertes de stockage et distribution côté ECS, égales à environ 37% de la chaleur produite pour l'ECS. Au final, l'ECS représente 16% des besoins utiles et 23% de la production de chaleur totale.

Ensuite, dans le cas des systèmes bivalents, la pompe à chaleur assure 79% de la production totale pour les systèmes B et D, 71% pour le système C. Le cas bivalent parallèle avec chaudière modulante (B) et le cas bivalent alternatif avec chaudière non-modulante (D) atteignent donc quasiment l'objectif de couverture de 80% fixés lors du dimensionnement (voir section 5.1.3). En revanche, le cas bivalent parallèle avec chaudière non-modulante (C) ne respecte pas cet objectif. Ceci est dû au fait que la chaudière ne peut pas moduler sa puissance, on assiste donc à une surproduction à chaque enclenchement. La température du ballon dépasse la consigne et la PAC intervient donc moins pour combler les besoins de chauffage, malgré une capacité suffisante. En effet, les capacités installées (PAC, chaudière et ballons) sont identiques à celles du cas B pour lequel la chaudière est modulante. La PAC dispose donc normalement de suffisamment de puissance pour atteindre la cible de couverture de 80% de la production. Dans ce cas-ci, afin d'optimiser le fonctionnement du système, il serait judicieux d'intégrer la temporisation mentionnée dans l'analyse fonctionnelle (Figure 54) de sorte à augmenter la part de la chaleur produite par la PAC.

En termes de performance des pompes à chaleur, les systèmes bivalents sont tous équivalents dans les conditions considérées puisque le COPa de la PAC est compris entre 3.13 et 3.2. Le système C consomme cependant 35% de gaz de plus que les autres systèmes bivalents (B et D), dû aux surproduction de la chaudière. Le COPa du système monovalent (2.85) est plus faible. La bivalence permet donc d'améliorer les performances annuelles de la PAC puisqu'elle fonctionne moins durant les périodes où l'air extérieur est le plus froid.

En revanche, les systèmes bivalents émettent bien plus de gaz à effet de serre que le système monovalent (Figure 71c), soit 1.7 à 2 fois plus. Les 2/3 des émissions de ces systèmes (B, C et D) sont liées à la consommation de gaz, alors que celui-ci ne représente qu'1/3 de l'énergie finale et couvre seulement 21 à 29% des besoins de chaleur totaux. Ainsi, même si le mix électrique suisse est plus carboné durant l'hiver (Figure 69), l'utilisation d'une PAC reste plus avantageux d'un point de vue des émissions grâce à son rendement élevé (COP > 2) par rapport à la chaudière.

Si l'on compare ces 4 systèmes de référence à un système uniquement composé d'une chaudière, pour produire 132 kWh/m².an de chaleur, il faudrait environ 147 kWh/m².an de gaz. Cela représenterait alors 119 tCO₂eq/an, soit 5 fois plus que le système monovalent et près de 3 fois plus que les systèmes bivalents. Ces derniers constituent donc tout de même une alternative intéressante pour la réduction de l'impact environnemental.

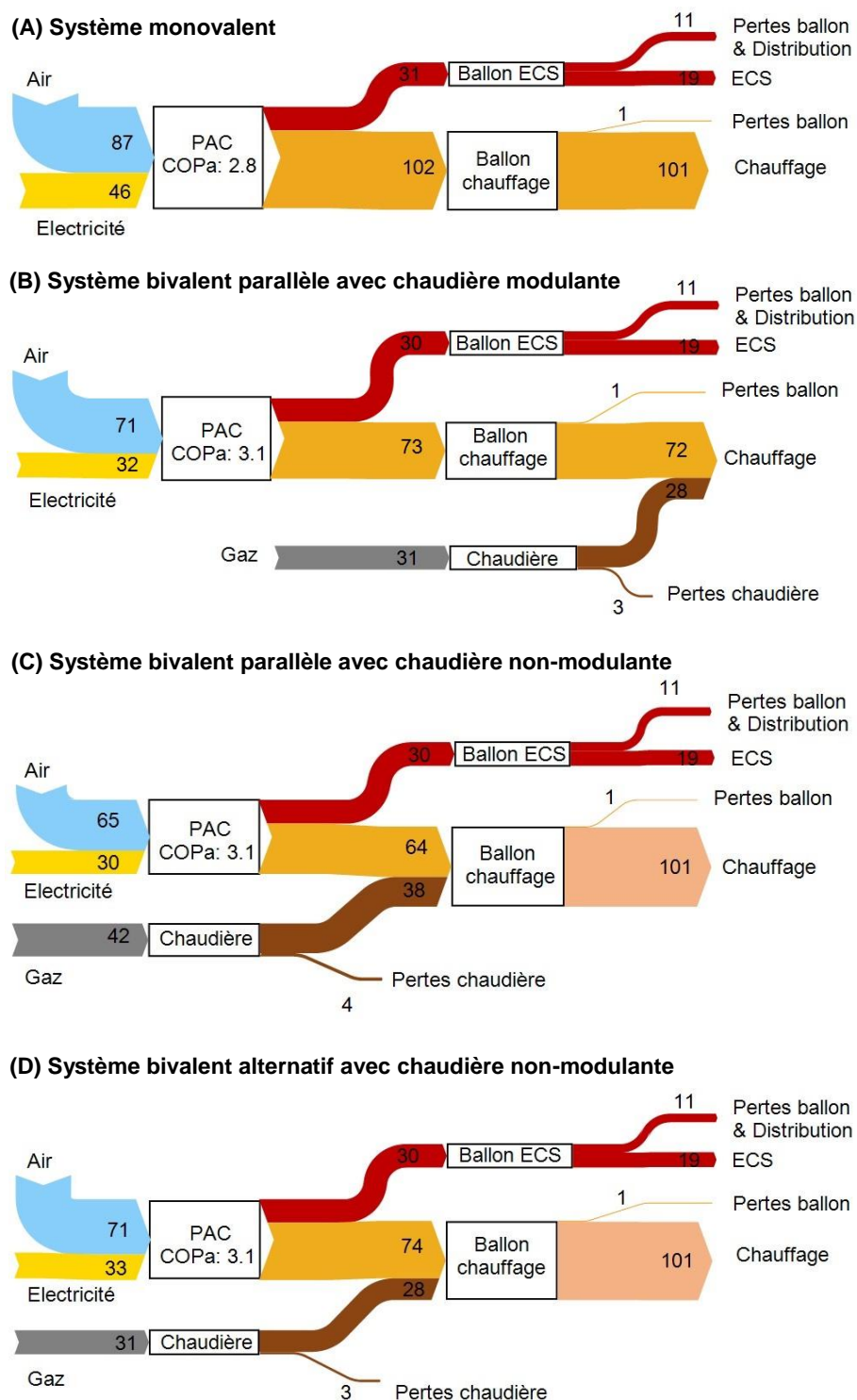


Figure 70 : Diagrammes de Sankey des 4 systèmes de référence simulés (en kWh/m².an). Le COPa indiqué n'inclut pas la consommation des auxiliaires.

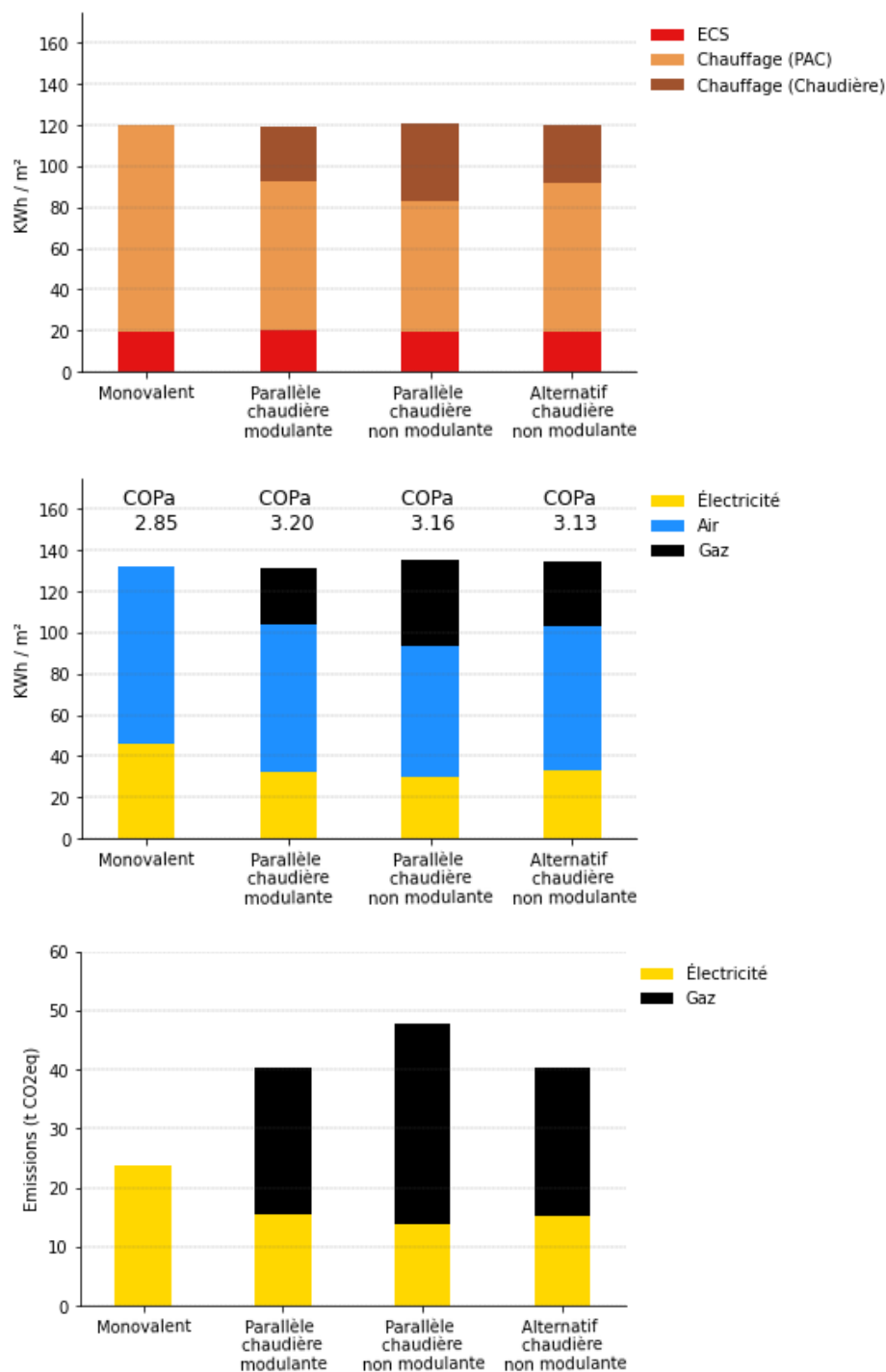


Figure 71 : (a) Demande de chaleur, (b) énergie finale et (c) émissions de CO₂eq associées à chaque système de référence (le COPa n'inclut pas la consommation des auxiliaires)



Si l'on s'intéresse à la dynamique des émissions de gaz à effet de serre au cours de l'année (Figure 72), il apparaît clairement que la consommation d'électricité du système monovalent émet bien plus que celle des systèmes bivalents, jusqu'à 3 fois plus que les systèmes bivalents parallèles (B et C) certains jours. De plus, les émissions liées à la consommation de gaz du système bivalent alternatif (D) sont très importantes au cœur de l'hiver. Au niveau des émissions totales (électricité + gaz), le système monovalent reste le moins émetteur parmi les 4 quel que soit le jour de l'année.

Il faut noter que ces résultats sont sensibles au contenu du mix électrique suisse qui varie d'une année sur l'autre, ainsi qu'à la température extérieure qui vient influencer la demande de chaleur et la libération de la chaudière.

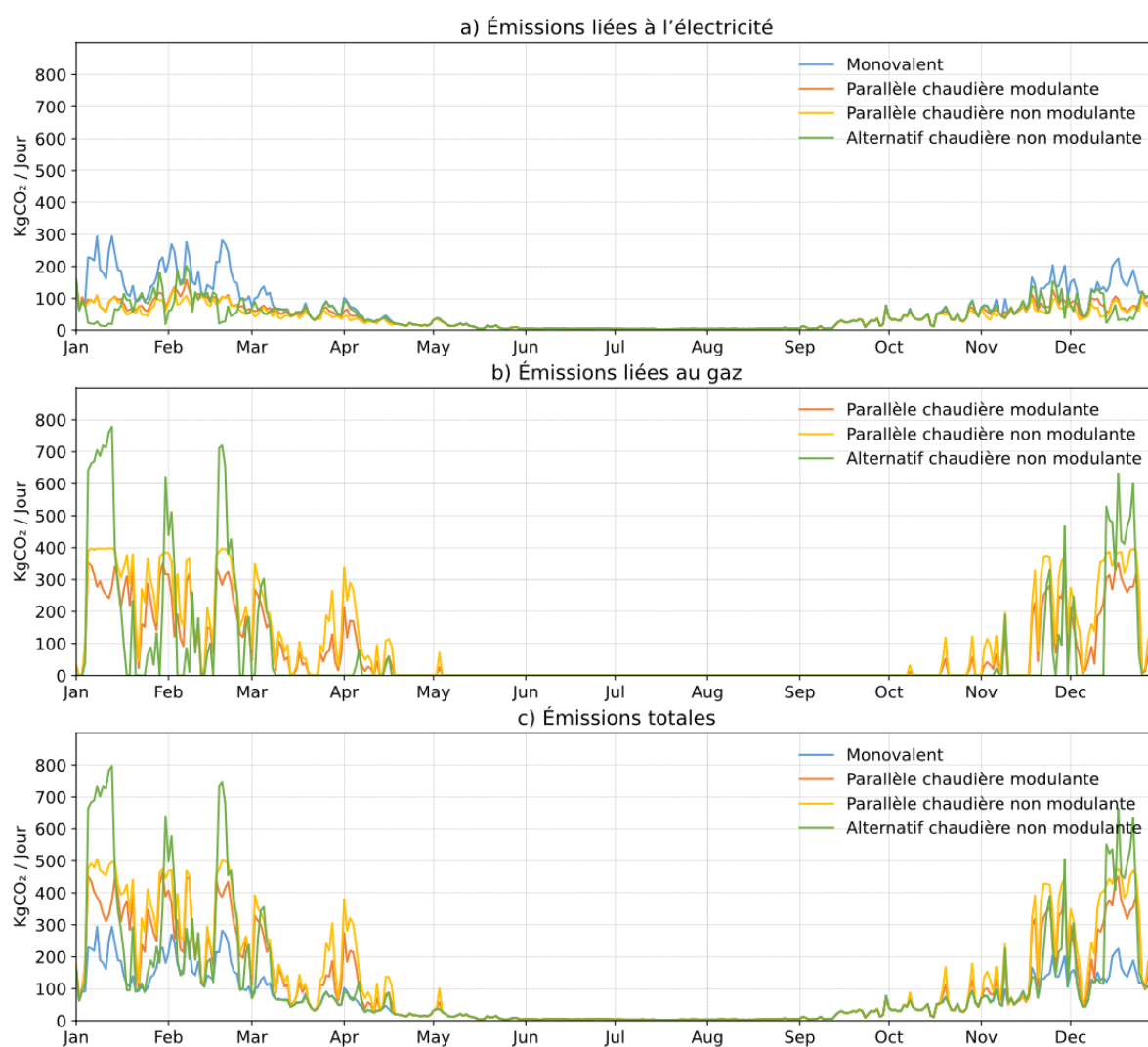


Figure 72 : Emissions de CO₂eq journalières pour chacun des systèmes de référence, décomposées selon leur source (électricité ou gaz)



7 Etude de sensibilité

Ce chapitre présente une étude de sensibilité sur les quatre systèmes PAC air-eau modélisés. Le but est de déterminer si les tendances observées à la section 6.5 seraient identiques dans d'autres conditions, en particulier pour des bâtiments avec des niveaux de demande différents ou pour un sous- ou surdimensionnement de la PAC.

7.1 Sélection des cas étudiés

Les divers cas simulés pour cette étude de sensibilité correspondent à des variations de trois principaux paramètres : la demande de chauffage, la demande d'ECS et le dimensionnement de la PAC (pour les systèmes bivalents uniquement).

Les scénarios de variation de la demande de chauffage et d'ECS sont déterminés à partir des résultats de deux études réalisées sur le parc genevois (Khoury 2014; Quiquerez 2017), de manière à représenter au mieux l'ensemble des bâtiments qui constituent ce parc et qui sont visés par ce projet, à savoir les bâtiments de la période « après-guerre » (1948-1980) et « fin de siècle » (1980-2010).

Tel que décrit précédemment, le bâtiment considéré pour l'ensemble des scénarios dispose d'une SRE de 4000 m² et comporte 114 habitants, ce qui correspond à une densité de 35.1 m²/hab.

Pour chacun des cas étudiés, le dimensionnement du système est effectué selon la méthode décrite au chapitre 5. De plus, chacun des systèmes est simulé en appliquant une variation d'un paramètre toutes choses égales par ailleurs.

7.1.1 Influence de la demande de chauffage

Comme le montre le Tableau 15 et la Figure 73, les trois scénarios sélectionnés correspondent à des bâtiments d'époques de constructions différentes et/ou dont l'enveloppe a été rénovée :

- **Demande de chauffage faible** : 78 kWh/m².an (i.e. 281 MJ/m².an), correspond au 1^{er} décile du parc résidentiel collectif genevois « après-guerre » (1948-1980) ainsi qu'à la médiane du parc « fin de siècle » (1980-2010).
- **Demande de chauffage élevée (référence)** : 101 kWh/m².an (i.e. 363 MJ/m².an), correspond à la médiane du parc « après-guerre » (1948-1980) ou au 9^{ème} décile du parc « fin de siècle » (1980-2010). Cette demande est celle utilisée pour les cas de référence.
- **Demande de chauffage très élevée** : 130 kWh/m².an (i.e. 468 MJ/m².an), correspond au 9^{ème} décile du parc « après-guerre » (1948-1980).

Tableau 15 : Statistiques des demandes de chauffage du parc de bâtiments résidentiels collectifs genevois par époque de construction (Khoury 2014). Les couleurs correspondent aux scénarios de demande de chauffage utilisées pour l'étude de sensibilité (vert = faible, jaune = élevée, rouge = très élevée)

Chauffage [kWh/m ² .an]	D1	Q1	Med	Q3	D9
< 1946	76	91	96	104	123
1946-1980	77	90	101	114	130
1981-2010	58	68	78	90	104



Il est à noter que les installations pilotes examinées au chapitre 3 ont toutes les deux une demande de chauffage semblable à celle du scénario « demande de chauffage faible ».

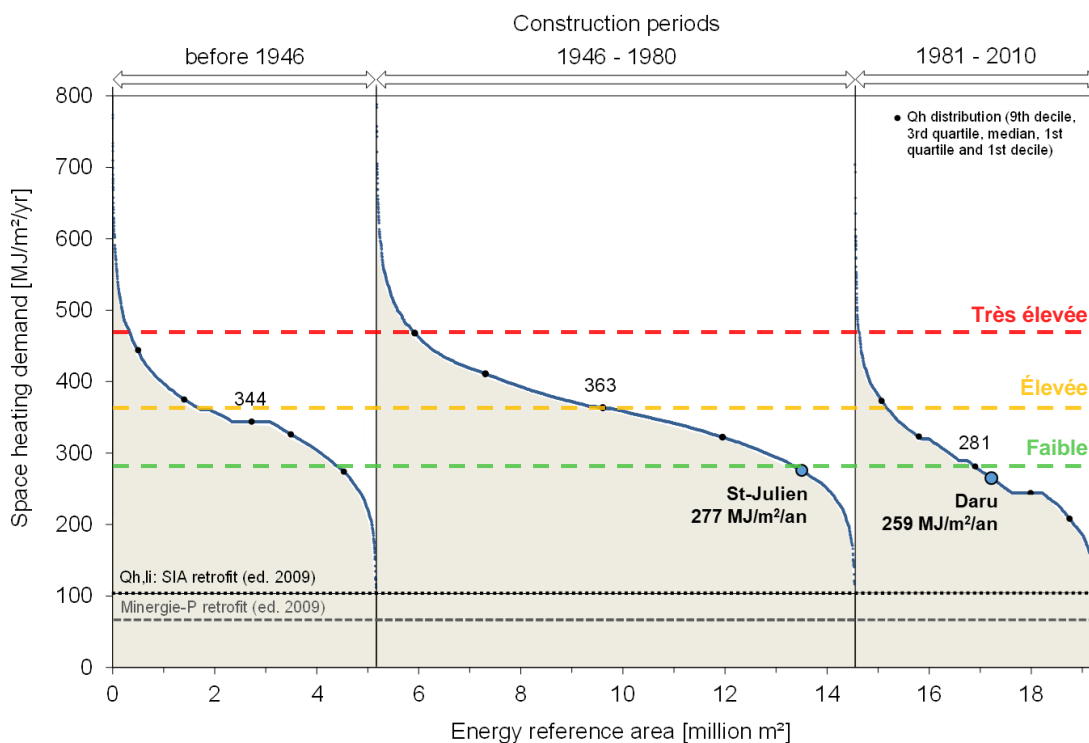


Figure 73 : Demande de chauffage du parc résidentiel collectif genevois (Khouri 2014) et scénarios de demande de chauffage utilisés pour l'étude de sensibilité

Les besoins horaires pour ces différents scénarios sont obtenus en augmentant ou diminuant la demande de référence (scénario « demande de chauffage moyenne » section 6.3.1) proportionnellement au ratio de leur valeur annuelle. Pour chaque heure, on multiplie donc la demande de référence par le ratio entre la demande annuelle du scénario et la demande annuelle de référence. On obtient ainsi les signatures énergétiques et monotones visibles à la Figure 74. Les principales caractéristiques des 3 variantes sont résumées dans le Tableau 16.

De même que précédemment, la température de coupure est fixée à 16°C (moyenne journalière) et la distribution de chauffage est entièrement arrêtée entre le 1^{er} juin et le 1^{er} septembre, ce quelle que soit la température extérieure.

Pour tous les scénarios, la température de distribution de chauffage reste inchangée, égale à celle du cas « St-Julien ». Bien qu'en réalité la température de distribution de chauffage des bâtiments construits après 1980 a tendance à être plus basse (Quiquerez et al. 2013), l'objectif de la présente étude de sensibilité est d'analyser l'influence d'une demande de chauffage plus ou moins élevée sur les performances du système, toutes choses égales par ailleurs.

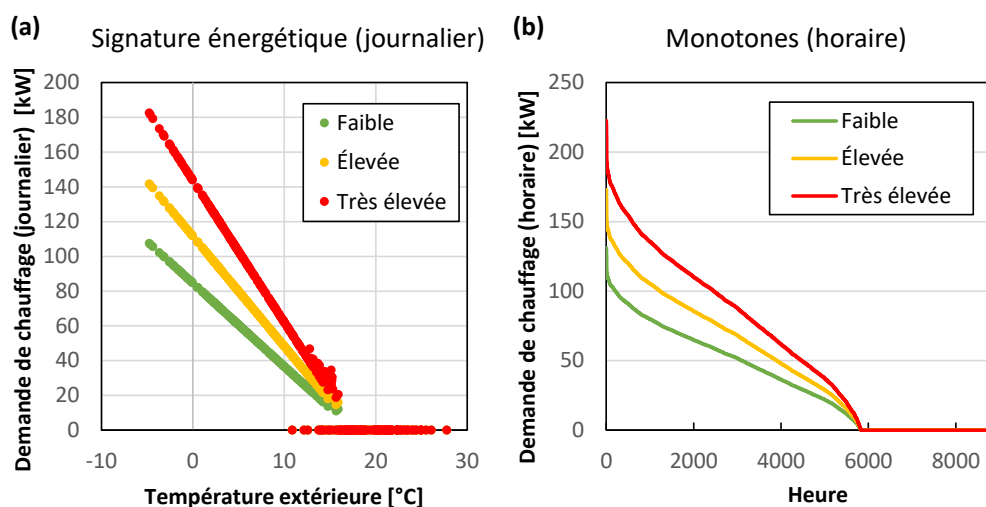


Figure 74 : Signature énergétique journalière et monotone horaire de chauffage pour les différents scénarios de demande de chauffage. La demande de chauffage moyenne correspond à la référence.

Tableau 16 : Résumé des scénarios de demande de chauffage sélectionnés pour l'étude de sensibilité

Scénario	Demande annuelle [kWh/m ² .an]	Demande de pointe horaire [kW]	Demande journalière maximale [kW]
Faible	78	131	108
Élevée (référence)	101	173	142
Très élevée	130	223	182

7.1.2 Influence de la demande d'ECS

Tout comme la demande de chauffage, la variation de la demande d'ECS est effectuée suivant trois scénarios différents. Ils correspondent aux besoins en eau chaude utile suivants, en considérant une eau chaude sanitaire à 60°C chauffée à partir d'une eau à 10°C (élévation de température de 50 K) :

- **Demande d'ECS faible** : 25 L/hab.jour
- **Demande d'ECS moyenne (référence)** : 35 L/hab.jour, correspond à la valeur moyenne pour le résidentiel collectif selon la norme SIA 385/2 (SIA 2015). Cette demande est celle utilisée pour les cas de référence.
- **Demande d'ECS élevée** : 50 L/hab.jour

En rapportant ces volumes d'eau chaude à l'énergie soutirée du ballon d'ECS, puis à l'énergie requise pour charger le ballon, on obtient les valeurs du Tableau 18. Ces demandes de chaleur pour la préparation de l'ECS (charge des ballons) peuvent alors être placées sur un benchmark (Quiquerez 2017) telle que le montre la Figure 75. Ce benchmark comporte 61 sous-stations du réseau de chaleur CAD SIG (Genève), comptabilisant près d'un million de m² de SRE dont les statistiques figurent dans le Tableau 17.



Il est à noter que, quelle que soit la demande simulée, le système est dimensionné dans chacun des cas sur la base d'une demande de 45 L/hab.jour et de 30% de pertes de stockage et de distribution (se référer au chapitre 5 pour plus de détails sur la méthode de dimensionnement).

Tableau 17 : Statistiques des demandes de chaleur pour la production d'ECS d'un benchmark réalisé sur des immeubles résidentiels collectifs genevois (Quiquerez 2017). Les couleurs correspondent aux scénarios de demande d'ECS utilisées pour l'étude de sensibilité (vert = faible, jaune = moyenne, rouge = élevée)

ECS charge ballon [kWh/m ² .an]	Minimum	D1	Q1	Med	Q3	D9	Maximum
Benchmark	21.7	26.0	28.9	33.9	41.8	45.0	58

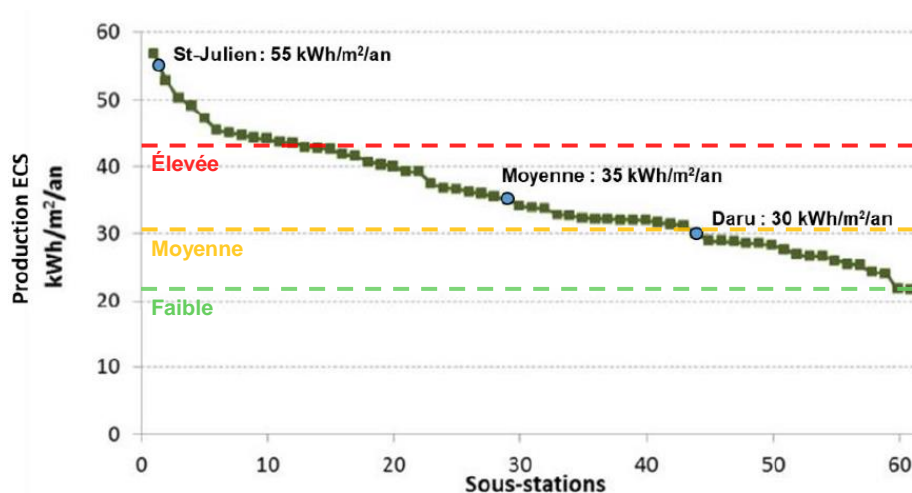


Figure 75 : Distribution des consommations de chaleur pour la production d'ECS de 61 sous-stations connectées à des bâtiments résidentiels collectifs du parc genevois (Quiquerez 2017) et scénarios de demande d'ECS utilisés pour l'étude de sensibilité

Tableau 18 : Résumé des scénarios de demande d'ECS sélectionnés pour l'étude de sensibilité

Demande ECS	Débit soutirage [L/hab.jour]	Énergie soutirage* [kWh/m ² .an]	Énergie charge ballon* [kWh/m ² .an]
Faible	25	15.2	21.7
Moyenne	35	21.3	30.4
Élevée	50	30.4	43.5

* estimations basées sur une élévation de température de 50 K (10°C → 60°C) et des pertes de stockage et distribution de 30%



7.1.3 Influence de la capacité de la PAC

Le dernier paramètre dont l'influence est examinée ici est la capacité de la PAC. Le but de cette variation est d'observer l'effet qu'aurait un sous- ou surdimensionnement de la PAC sur les performances du système et sur la part de couverture des besoins par la chaudière. Cette analyse est donc effectuée dans le cas des systèmes bivalents uniquement.

Pour rappel, pour les systèmes monovalents, la PAC est dimensionnée de sorte à pouvoir combler l'intégralité des besoins de chaleur, à la fois pour le chauffage et l'ECS. Comme défini à la section 5.1, la puissance PAC sélectionnée correspond au maximum entre la puissance requise pour le chauffage et celle pour l'ECS. La puissance requise en chauffage, $P_{PAC,ch}$, correspond à la capacité aux conditions critiques (@ $-7^{\circ}\text{C} / 55^{\circ}\text{C}$) telle que décrite dans l'équation (9).

En revanche, dans le cas des systèmes bivalents, la PAC est dimensionnée de sorte à couvrir 80% des besoins de chaleur totaux (chauffage et ECS). Cela correspond généralement à une capacité au point de bivalence égale à environ 50% de la puissance requise en monovalent ($P_{PAC,ch}$).

Les différents cas étudiés correspondent aux puissances requises en chauffage suivantes, dont un exemple est illustré à la Figure 76 :

- **Puissance PAC de référence** : puissance requise pour atteindre l'objectif de couverture de 80% des besoins de chaleur totaux (chauffage et ECS) par la PAC, correspond à une capacité au point de bivalence (@ $T_{biv} / 55^{\circ}\text{C}$) égale à environ 50% de $P_{PAC,ch}$
- **Puissance PAC faible** : au point de bivalence (@ $T_{biv} / 55^{\circ}\text{C}$), capacité égale à 30% de $P_{PAC,ch}$
- **Puissance PAC élevée** : au point de bivalence (@ $T_{biv} / 55^{\circ}\text{C}$), capacité égale à 80% de $P_{PAC,ch}$

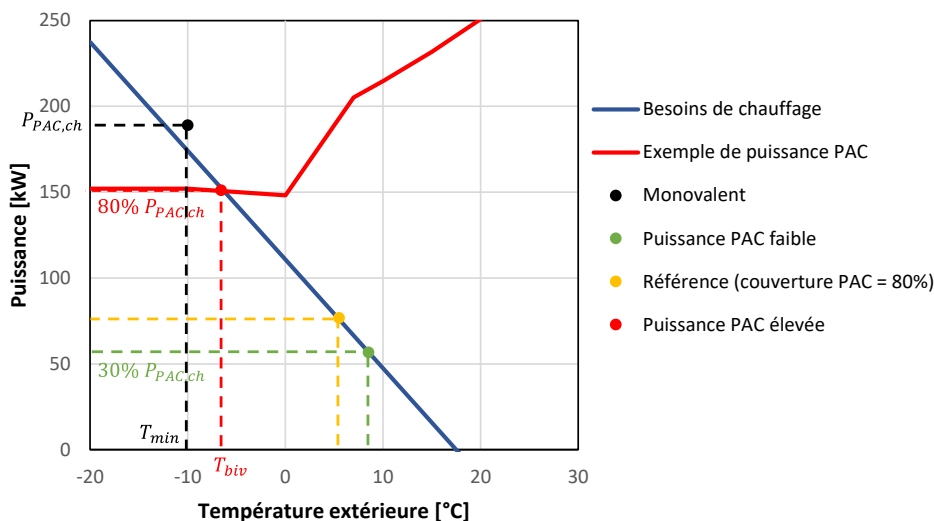


Figure 76 : Exemple de variation de la puissance requise de la pompe à chaleur : comparaison de la puissance requise en monovalent aux puissances requises pour le système bivalent parallèle

Dans les cas « puissance faible » et « puissance élevée », une fois la capacité fixée (x% de $P_{PAC,ch}$), cette dernière permet de déterminer la température de bivalence via la signature énergétique (Figure 74).

Il est à noter que la capacité finalement sélectionnée pour la PAC correspond au maximum entre la puissance requise pour le chauffage et celle pour l'ECS. Il est donc possible que certaines variantes « Puissance PAC faible » correspondent au cas de référence si le mode le plus contraignant est l'ECS.



7.1.4 Résumé des différentes variantes étudiées

L'ensemble des cas étudiés est décrit dans le Tableau 19 suivant. Au total, 26 variantes sont simulées, soit 22 variantes en plus des cas de référence de chacun des systèmes.

Cependant, tel que mentionné précédemment, certaines variations de la capacité de la PAC mènent à des configurations identiques à la référence puisque le mode le plus contraignant est l'ECS. C'est notamment le cas pour les systèmes bivalents parallèles : le cas B5 est identique au cas B0 (référence) et le cas C5 est identique au cas C0 (référence).

A titre de comparaison, les émissions de CO₂eq par kWh de demande seront estimées pour un cas « 100% gaz » pour lequel une chaudière produit l'intégralité de la chaleur. Pour cela, le calcul est basé sur un rendement de la chaudière de 90% sur PCS, avec une production de chaleur égale à celles du cas monovalent de référence (Figure 70), soit 132 kWh/m².an (528 MWh/an).



Tableau 19 : Résumé des cas étudiés pour l'étude de sensibilité

Système	Variante	#	Demande chauffage*	Demande ECS*	Puissance PAC (@7°C/45°C) [kW]	Nb total compresseurs	Puissance chaudière [kW]	Température bivalence [°C]	Mode le plus contraignant	Volume ballon chauffage [m3]	Volume ballon ECS [m3]
Système monovalent	Référence	A0	Elevée	Moyenne	274	8	-	-	Chauffage	2.2	1.9
	ECS faible	A1	Elevée	Faible	274	8	-	-	Chauffage	2.2	1.9
	ECS élevée	A2	Elevée	Elevée	274	8	-	-	Chauffage	2.2	1.9
	Chauffage faible	A3	Faible	Moyenne	208	6	-	-	Chauffage	2.2	1.9
	Chauffage très élevé	A4	Très élevée	Moyenne	350	8	-	-	Chauffage	2.8	1.9
Système bivalent parallèle avec chd modulante	Référence	B0	Elevée	Moyenne	88	2	95	4.5	ECS	2.9	1.9
	ECS faible	B1	Elevée	Faible	88	2	95	4.5	ECS	2.9	1.9
	ECS élevée	B2	Elevée	Elevée	88	2	95	4.5	ECS	2.9	1.9
	Chauffage faible	B3	Faible	Moyenne	88	2	72	2	ECS	2.9	1.9
	Chauffage très élevé	B4	Très élevée	Moyenne	104	3	122	5	Chauffage	2.2	1.9
	P. PAC faible	B5	Elevée	Moyenne	88	2	95	4.5	ECS	2.9	1.9
	P. PAC élevée	B6	Elevée	Moyenne	208	6	95	-8	Chauffage	2.2	1.9
Système bivalent parallèle avec chd. non-modulante	Référence	C0	Elevée	Moyenne	88	2	95	4.5	ECS	2.9	1.9
	ECS faible	C1	Elevée	Faible	88	2	95	4.5	ECS	2.9	1.9
	ECS élevée	C2	Elevée	Elevée	88	2	95	4.5	ECS	2.9	1.9
	Chauffage faible	C3	Faible	Moyenne	88	2	72	2	ECS	2.9	1.9
	Chauffage très élevé	C4	Très élevée	Moyenne	104	3	122	5	Chauffage	2.2	1.9
	P. PAC faible	C5	Elevée	Moyenne	88	2	95	4.5	ECS	2.9	1.9
	P. PAC élevée	C6	Elevée	Moyenne	208	6	95	-8	Chauffage	2.2	1.9
Système bivalent alternatif	Référence	D0	Elevée	Moyenne	137	4	189	0.5	Chauffage	2.2	1.9
	ECS faible	D1	Elevée	Faible	137	4	189	0.5	Chauffage	2.2	1.9
	ECS élevée	D2	Elevée	Elevée	137	4	189	0.5	Chauffage	2.2	1.9
	Chauffage faible	D3	Faible	Moyenne	104	3	143	0.5	Chauffage	2.2	1.9
	Chauffage très élevé	D4	Très élevée	Moyenne	175	4	243	0.5	Chauffage	2.8	1.9
	P. PAC faible	D5	Elevée	Moyenne	88	2	189	4.5	ECS	2.9	1.9
	P. PAC élevée	D6	Elevée	Moyenne	208	6	189	-8	Chauffage	2.2	1.9

* Demande de chauffage : faible = 78 kWh/m².an, moyenne = 101 kWh/m².an, très élevée = 130 kWh/m².an; Demande d'ECS : faible = 25 L/hab.jour, moyenne = 35 L/hab.jour, élevée = 50 L/hab.jour.



Tableau 20 : Résultats obtenus pour l'étude de sensibilité. Couleurs : résultats classés par colonne en fonction de la performance (vert foncé = meilleure performance, jaune = performance moyenne, rouge = performance la plus basse)

Système	Variante	#	Demande chauffage*	Demande ECS*	COPa	% Production par la PAC	COP global	tCO ₂ eq électricité	tCO ₂ eq gaz	tCO ₂ eq total	Demande totale [MWh]	gCO ₂ eq/kWh _{therm}
Système monovalent	Référence	A0	Elevée	Moyenne	2.85	100%	2.85	23.66	0.00	23.66	481.3	49.2
	ECS faible	A1	Elevée	Faible	2.84	100%	2.84	22.93	0.00	22.93	459.1	49.9
	ECS élevée	A2	Elevée	Elevée	2.85	100%	2.85	24.84	0.00	24.84	501.4	49.5
	Chauffage faible	A3	Faible	Moyenne	2.86	100%	2.86	18.97	0.00	18.97	383.2	49.5
	Chauffage très élevé	A4	Très élevée	Moyenne	2.85	100%	2.85	29.26	0.00	29.26	597.4	49.0
Système bivalent parallèle avec chd. modulante	Référence	B0	Elevée	Moyenne	3.2	79%	2.08	15.43	24.89	40.32	480.7	83.9
	ECS faible	B1	Elevée	Faible	3.19	79%	2.07	15.03	24.20	39.23	458.6	85.5
	ECS élevée	B2	Elevée	Elevée	3.23	80%	2.13	16.03	24.65	40.68	506.6	80.3
	Chauffage faible	B3	Faible	Moyenne	3.09	88%	2.40	14.77	11.47	26.24	383.4	68.4
	Chauffage très élevé	B4	Très élevée	Moyenne	3.24	76%	2.00	18.01	34.51	52.52	596.3	88.1
	P. PAC faible	B5	Elevée	Moyenne	3.2	79%	2.08	15.43	24.89	40.32	480.7	83.9
	P. PAC élevée	B6	Elevée	Moyenne	2.93	100%	2.92	23.06	0.15	23.21	481.3	48.2
Système bivalent parallèle avec chd. non-modulante	Référence	C0	Elevée	Moyenne	3.16	71%	1.84	13.74	34.17	47.91	480.6	99.7
	ECS faible	C1	Elevée	Faible	3.15	69%	1.78	12.88	34.85	47.73	458.5	104.1
	ECS élevée	C2	Elevée	Elevée	3.18	74%	1.91	14.87	32.72	47.59	507.8	93.7
	Chauffage faible	C3	Faible	Moyenne	3.06	84%	2.22	13.88	15.40	29.28	382.9	76.5
	Chauffage très élevé	C4	Très élevée	Moyenne	3.21	66%	1.71	15.28	49.31	64.59	596.6	108.3
	P. PAC faible	C5	Elevée	Moyenne	3.16	71%	1.84	13.74	34.17	47.91	480.6	99.7
	P. PAC élevée	C6	Elevée	Moyenne	2.9	100%	2.90	23.52	0.16	23.68	480.8	49.3
Système bivalent alternatif	Référence	D0	Elevée	Moyenne	3.13	79%	2.05	15.24	25.10	40.34	480.6	83.9
	ECS faible	D1	Elevée	Faible	3.13	78%	2.02	14.57	25.01	39.58	458.5	86.3
	ECS élevée	D2	Elevée	Elevée	3.13	80%	2.10	16.40	24.94	41.34	513.6	80.5
	Chauffage faible	D3	Faible	Moyenne	3.11	81%	2.10	12.50	18.75	31.25	383.0	81.6
	Chauffage très élevé	D4	Très élevée	Moyenne	3.15	77%	2.01	18.43	32.64	51.07	596.1	85.7
	P. PAC faible	D5	Elevée	Moyenne	3.31	56%	1.51	9.09	52.31	61.4	480.7	127.7
	P. PAC élevée	D6	Elevée	Moyenne	2.92	100%	2.90	23.06	0.31	23.37	480.1	48.7
Chaudière seule (gaz)			Elevée	Moyenne	-	-	0.90		119.1	119.1	481.3	247.5

* Demande de chauffage : faible = 78 kWh/m².an, moyenne = 101 kWh/m².an, très élevée = 130 kWh/m².an; Demande d'ECS : faible = 25 L/hab.jour, moyenne = 35 L/hab.jour, élevée = 50 L/hab.jour.



7.2 Résultats et discussion

Les résultats de l'étude de sensibilité sont présentés dans le Tableau 20 et la Figure 77.

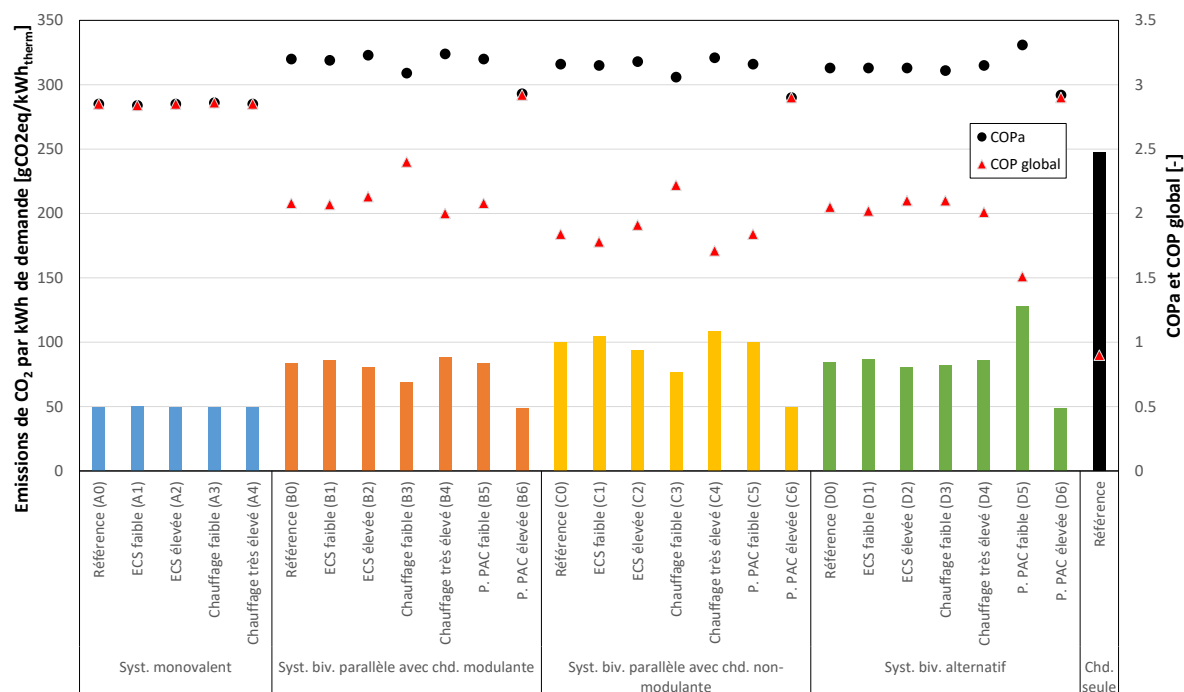


Figure 77 : Résultats de l'étude de sensibilité en termes d'émissions de CO₂ (barres, axe de gauche) et de COPa de la PAC et de COP global (points, axe de droite)

Influence de la demande d'ECS

Quel que soit le système, la variation de la demande d'ECS n'a quasiment pas d'influence sur le COPa de la PAC (cf. cas A0 à A2, B0 à B2, C0 à C2 et D0 à D2).

Le COP global du système est également peu affecté. De plus, les légères différences observées sont en partie dues à la variation de la part de la production assurée par la PAC qu'à la variation de la demande d'ECS. Par exemple, les cas D1 et D2 ont le même COPa de la PAC, mais un COP global différent car la PAC assure respectivement 78% et 80% de la production de chaleur.

Ipso facto, il en va de même pour les émissions de CO₂eq par kWh de demande, également peu influencées par la variation de la demande d'ECS.

Influence de la demande de chauffage

Sauf pour le système monovalent, la variation de la demande de chauffage a un impact un peu plus marqué. Pour tous les systèmes bivalents, une diminution de la demande engendre une baisse du COPa de la PAC, mais une augmentation du COP global ainsi qu'une réduction des émissions. Cela est dû à plusieurs éléments :

- D'une part à la part de la production assurée par la PAC. Par exemple, dans le cas B3 (« Chauffage faible ») la PAC assure 88% de la production de chaleur totale, alors qu'elle n'en fournit que 76% dans le cas B4 (« Chauffage très élevé »). Puisque le rendement de la PAC (environ 300%) est plus élevé que celui de la chaudière (90%), une augmentation de la couverture de la PAC mène à une amélioration du COP global, et ce même si le COPa de la PAC est plus faible.



- D'autre part, la diminution du COPa de la PAC pour des demandes de chauffage faibles peut être liée à la différence de température de bivalence du système. Par exemple, pour le cas C3 (« Chauffage faible »), la température de bivalence est de 2°C, alors qu'elle est de 4.5°C dans le cas de référence (cas C0). Cela affecte alors le COPa de la PAC qui sera plus faible dû à l'opération à des températures pour lesquelles ses performances sont moindres.

Ces variations sont principalement observées pour les systèmes bivalents parallèles. Dans le cas du système bivalent alternatif (cas D0, D3 et D4), la part de la production assurée par la PAC est plus stable, comprise entre 77% et 81%.

Influence de la capacité de la PAC

Pour les systèmes bivalents parallèle, la variante « Puissance PAC faible » correspond au cas de référence. Ainsi, pour ces conditions, réduire la puissance requise en mode chauffage ne mène à aucun changement de dimensionnement du système, puisque le mode ECS est plus contraignant.

En revanche, dans le cas du système bivalent alternatif, le cas « Puissance PAC faible » dispose d'une PAC de 88 kW contre 137 kW dans le cas de référence (@ 7°C/45°C). Cette diminution de capacité entraîne une hausse du point de bivalence, passant de 0.5°C (cas D0, référence) à 4.5°C (cas D5). Au final, cela mène à une augmentation d'environ 6% du COPa de la PAC. Cependant, le COP global est fortement dégradé puisqu'il diminue de plus de 25% pour atteindre 1.51, contre 2.05 dans le cas de référence. Ceci provient du fait que la PAC, bien que plus efficace lorsqu'elle opère, n'assure alors plus que 56% de la production de chaleur. Par la même, les émissions de CO₂eq par kWh de demande augmentent drastiquement (+52%).

Quel que soit le système bivalent (cas B6, C6 et D6), dans le cas où la puissance PAC installée est plus élevée que dans le cas de référence, soit une puissance au point de bivalence égale à 80% de la puissance requise en monovalent, il s'avère que la PAC peut assurer intégralement la production de chaleur. On retombe ainsi sur des cas « monovalents » dont les performances sont similaires à celles du cas de référence monovalent (cas A0), malgré un dimensionnement de la PAC nettement réduit (208 kW au lieu de 274 kW). Comme pour le cas monovalent pur, les émissions de CO₂eq par kWh associées sont jusqu'à près de moitié moins élevées que les cas de référence bivalents.

Remarques générales

Du point de vue global, il ressort de cette étude de sensibilité que l'obtention d'un COPa élevé pour la PAC est un objectif intéressant à atteindre afin d'optimiser le fonctionnement de la PAC et de réduire la consommation d'électricité du système. Ce n'est cependant pas un indicateur suffisant pour déterminer la performance d'une installation. Comme illustré à la Figure 78, pour les cas simulés, une augmentation du COPa entraîne une forte augmentation des émissions de CO₂eq, quel que soit le système. En revanche, une amélioration du COP global induit une réduction des émissions de CO₂eq par kWh de demande. Le COP global et les émissions de CO₂ semblent donc être de meilleurs indicateurs de la performance du système.

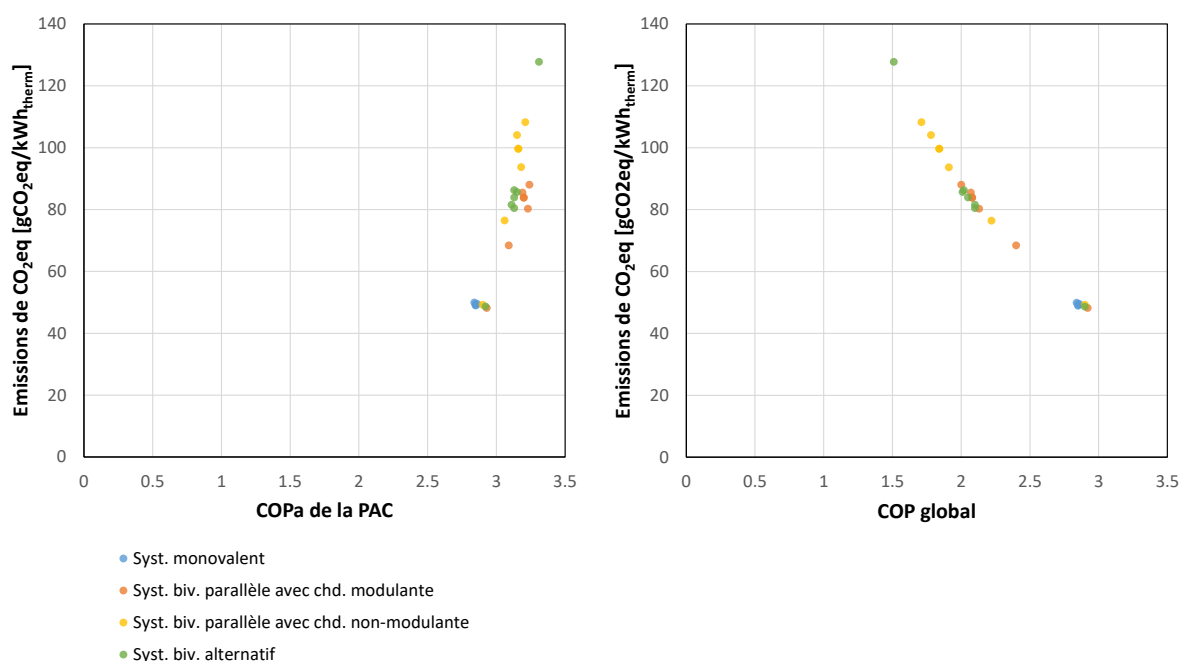


Figure 78 : Relation entre les performances énergétiques et les émissions de CO₂ des cas simulés pour l'étude de sensibilité

Avec le mix électrique suisse actuel, peu carboné en moyenne par rapport au gaz (Figure 69), il semble plus avantageux du point de vue environnemental de mettre en place un système monovalent que bivalent, malgré une certaine dégradation du COP de la PAC en hiver. Cela implique cependant l'installation d'une capacité totale de PAC 2 à 3 fois plus importante. À cet égard, il faut souligner que le dimensionnement monovalent adopté au chapitre 5 semble aboutir à un surdimensionnement de la PAC. En effet, du moins pour une année météorologique standard, un système bivalent avec une PAC dimensionnée à 75% de la valeur monovalente amène, de facto, à une couverture quasiment 100% monovalente de la demande de chaleur. Il est à noter qu'un tel système « bivalent » peut avantageusement être réalisé avec une épingle électrique, plutôt qu'avec une chaudière.

Les diverses contraintes rencontrées en pratique (place disponible, puissance électrique disponible, réglementations de bruit etc.) empêchent parfois la mise en œuvre d'une telle solution. Un système bivalent s'avère alors être une alternative offrant des performances énergétiques et environnementales plus intéressante qu'un système entièrement au gaz. En effet, comme le montre la Figure 77, un système composé uniquement d'une chaudière émet 2.3 à 3.5 fois plus de gCO₂eq/kWh_{therm} qu'un système bivalent dont la PAC assure environ 80% de la production de chaleur. Par rapport à un système monovalent, cela représente 5 fois plus d'émissions.

De plus, la mise en place d'un système bivalent serait également à privilégier lors d'un changement d'agent énergétique, du gaz ou mazout vers de l'électricité, lorsque celui-ci est effectué avant la rénovation de l'enveloppe du bâtiment. L'ancienne chaudière en place avant le changement d'agent pourrait être utilisée puis démantelée suite à la rénovation de l'enveloppe. Le système deviendrait alors monovalent. Cela permet notamment d'éviter l'installation d'une PAC dimensionnée pour répondre à l'intégralité de la demande avant rénovation, alors que seule une fraction de cette puissance sera nécessaire sur le long terme.

Parmi les systèmes bivalents, il ne semble pas y avoir de système qui se démarque de manière significative en terme de performances, bien que le système bivalent parallèle avec chaudière non-modulante présente des performances globales légèrement plus faibles.



Par ailleurs, il semblerait qu'une diminution de la capacité PAC installée en bivalent serait possible si une partie de la demande d'ECS pouvait être assurée par la chaudière. En effet, pour les schémas hydrauliques choisis dans cette étude, la PAC assure l'intégralité de la production d'ECS. Elle doit donc disposer d'une capacité suffisante même lors des jours les plus froids pour lesquels sa capacité et son rendement est moindre.

Enfin, afin d'aller plus loin dans l'analyse et d'émettre des recommandations plus détaillées, il conviendra également d'examiner les aspects économiques des 4 systèmes proposés (prix de la PAC, réservation de la puissance gaz etc.) qui peuvent être un facteur de décision important.



8 Collaborations et publications

8.1 Collaboration au niveau national

L'Université de Genève collabore avec SIG et CSD pour le suivi et l'optimisation projets pilotes du programme Chaleur renouvelable. Un groupe de suivi rassemblant les représentants des divers acteurs impliqués (exploitants, ingénieurs projet, propriétaires) permet un échange d'information tout au long du projet.

CSD Ingénieurs SA collabore avec l'Université de Genève pour les aspects de simulation. L'UNIGE mets au point le modèle qui servira à simuler et optimiser les schémas retenus.

CSD Ingénieurs SA assure la coordination entre les partenaires, avec les projets pilotes de SIG et avec le Vademecum de l'OFEN.

Comme membre du comité du GSP (Groupement professionnel des PAC), M. Rognon assure l'information et la coordination avec les activités de l'association.

8.2 Coopération internationale et activités IEA

Sur le plan international, la contribution suisse à l'Annexe 50 du Heat Pumping Technology Collaboration Programme de l'International Energy Agency (IEA HPT TCP) « Heat pumps in multi-family buildings for space heating and DHW » est fournie dans le cadre de ce projet.

La représentation de la Suisse par la participation aux diverses conférences et workshops de l'AIE fait partie intégrante du mandat. Le rôle de Task 3 leader de l'Annexe 50 est également assumé par l'équipe de projet.

La Suisse a organisé et accueilli le workshop de printemps de l'Annexe 50 à Fribourg en mai 2019. Une participation active en présentiel a eu lieu pour les meetings de Freiburg (D), Rotterdam (NL), Utrecht (NL) et Torino (I) ainsi qu'à toutes les autres réunions planifiées par téléconférence.

Le rapport élaboré en 2017 dans le cadre de la Task 1 de l'Annexe 50 a décrit l'état du marché et les barrières à l'application de pompes à chaleur dans les bâtiments multifamiliaux en Suisse. Le contenu de ce rapport figure dans le chapitre 2.1.

Les projets pilotes de St-Julien et Daru ont été décrits et commentés dans des fiches de « Case studies » qui servent à illustrer des réalisations de PAC dans des bâtiments multifamiliaux sur une carte de l'Europe figurant sur le site internet de l'Annexe 50 à des fins de dissémination (<https://heatpumpingtechnologies.org/annex50/case-studies/>).

L'élaboration d'un « Matrix tool » interactif qui sera à terme disponible en ligne est encore en cours. Celui-ci permettra au final à l'utilisateur d'obtenir des informations sur les différentes possibilités d'intégration de PAC dans les bâtiments multifamiliaux. Différents niveaux détailleront 1) les familles de solutions proposées, 2) des fiches de description correspondant à chaque solution et 3) des fiches de « Case studies » qui illustrent la solution choisie par un exemple de réalisation concrète. La démarche est illustrée dans la Figure 79. Le deuxième niveau de cet outil matriciel correspond au travail attendu dans la Task 3 de l'Annexe 50. L'objet du rapport de la Task 3 est de décrire et d'accompagner l'outil interactif en cours d'élaboration. Une description est donnée dans le Status Report de l'Annexe 50 de M.Marek Miara qui se trouve en Annexe A.

La décision a été prise lors du meeting de septembre 2020 de repousser le délai de fin de l'Annexe 50 avec un rendu final du rapport de l'Annexe 50 en fin d'année 2021.



Ongoing work “Matrix tool”

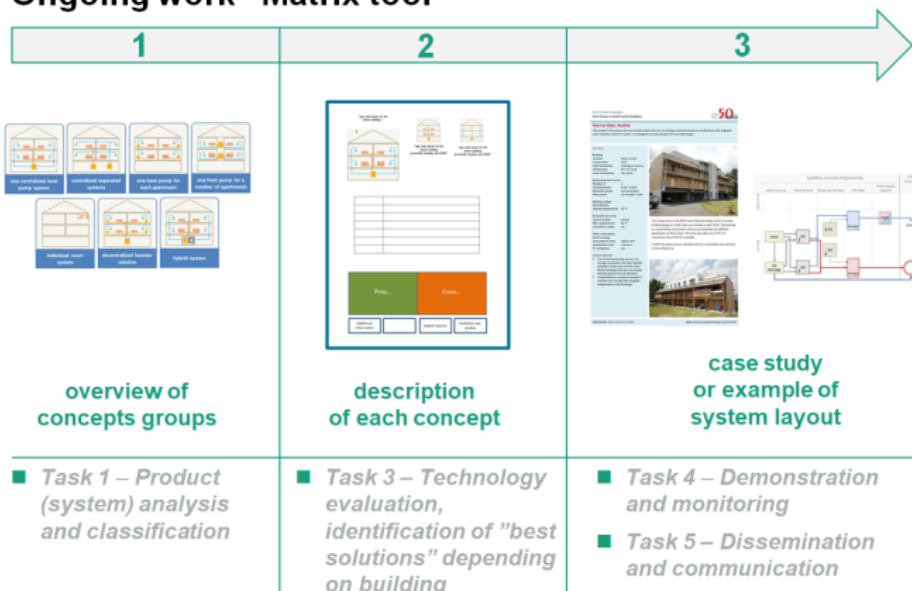


Figure 79: Illustration du concept de «Matrix tool» en cours de développement par les participants à l'Annexe 50 de l'IEA

(M.Miara 2020)

8.3 Publications

Les travaux réalisés par les partenaires dans le cadre de ce projet ou sur la même thématique ont fait l'objet des publications suivantes :

- L'état de la situation et des opportunités du marché des pompes à chaleur dans les maisons à plusieurs logements a fait l'objet d'une présentation lors du 24^{ème} Symposium du programme de recherche Pompes à chaleur et froid de l'OFEN (Calame et Rognon 2018).
- L'article "Air to water heat pumps for heating system retrofit in urban areas: understanding the multi-faceted challenge" a été présenté lors de la conférence CISBAT et a été publié dans Journal of Physics Conference Series 1343 012079 (Calame et al. 2019).
- Les systèmes des projets pilotes de St-Julien et Daru ont été décrits et commentés dans des fiches de l'Annexe 50 de l'AIE (CSD Ingénieurs SA 2019a; 2019b).
- Les résultats de suivi du système pilote « St.-Julien » (monovalent) ont été présentés de façon synthétique sous forme de deux articles de conférence (Montero D. et al. 2020a; 2020b), et brièvement mis en valeur dans une revue technique (Suarez 2020).
- Les résultats sur le système monovalent (analyse du retour d'expérience, simulation numérique et validation) ont fait l'objet du travail de master de Omar Montero (Montero D. 2020).
- Les résultats de l'étude de sensibilité seront présentés dans le cadre du 27^e Symposium du programme de recherche pompe à chaleur et froid de l'OFEN le 23 juin 2021, sous la forme d'un article et d'une présentation orale (Cuvillier et al. 2021).
- Un article de magazine traitant des barrières à l'application des pompes à chaleur dans les immeubles multifamiliaux en Suisse a été publié dans Heat Pump Technologies Magazine (Calame 2021).



9 Conclusions et perspectives

Le présent projet a permis de définir et d'analyser différents schémas hydrauliques de systèmes de pompe à chaleur sur l'air pour une application dans des immeubles résidentiels collectifs existants et non-rénovés. Le but est de favoriser le développement de cette technologie pour ce type de bâtiments plutôt qu'un simple renouvellement de la chaudière, ainsi que d'obtenir des installations à la fois fiables et efficaces. Ces schémas pourront donc servir de base aux futurs projets de remplacement de chaudières fossiles.

Etat du marché

Les barrières à l'application de ce type de systèmes aux immeubles résidentiels collectifs ont tout d'abord été mise en évidence. En effet, il existe un potentiel important et sous-exploité pour les pompes à chaleur air/eau dans les zones urbaines, notamment pour ce qui est des bâtiments résidentiels collectifs. Ces projets peuvent contribuer efficacement à atteindre les objectifs environnementaux en réduisant les émissions de CO₂ des chaudières à combustible fossile. Pourtant, une part massive (81%) du marché des pompes à chaleur en Suisse se situe en dessous de 20 kW, et reflète la demande pour l'habitat individuel. Les pompes à chaleur industrielles peuvent fournir des puissances jusqu'à 600 kW, mais leur niveau sonore est élevé, et sont donc délicates à intégrer dans le milieu résidentiel.

De plus, pour les maisons individuelles, le coût de la chaleur est meilleur marché avec les PAC, tandis que le coût de la chaleur des solutions PAC pour immeubles d'habitation collectifs reste supérieur à celui obtenu pour des solutions fossiles, en raison des aspects tels que l'acoustique, la statique, la connexion électrique, les schémas hydrauliques qui entraînent des coûts supplémentaires. Le cadre juridique concernant les pompes à chaleur implique aussi des autorisations et des procédures supplémentaires ainsi que le respect d'un certain nombre de normes (contrairement à la modernisation d'une chaudière par le même type de chaudière), ce qui augmente encore les coûts et ne favorise pas un développement plus large de ces projets innovants.

Les contrats d'énergie se sont avérés être un outil efficace pour permettre la réalisation de projets dans les bâtiments multifamiliaux, notamment face aux contraintes du droit du bail en Suisse.

Retours d'expérience

Ensuite, deux sites pilotes de pompes à chaleur sur l'air en remplacement de chaudières traditionnelles ont été analysés. Tous deux alimentent en chauffage et en eau chaude sanitaire des immeubles résidentiels collectifs non-rénovés. Sur le premier site, le système de production de chaleur a été partiellement remplacé par 6 pompes à chaleur air-eau de type villa pour obtenir un système bivalent avec fonctionnement parallèle de la chaudière. Durant la dernière année du suivi, la production a été couverte à 67% par les pompes à chaleur avec un COP annuel de 2.3, auxiliaires inclus, et un COP global (PAC + chaudière) de 1.28. Cependant, avant d'en arriver là, plusieurs dysfonctionnements ont été identifiés et ont dû être corrigés : (i) des retours chauds causant des pannes des pompes à chaleur lors du fonctionnement en parallèle avec la chaudière, (ii) une couverture importante des besoins d'eau chaude sanitaire par la chaudière durant l'été, contraire aux attentes, (iii) des pertes thermiques de distributions élevées entre les pompes à chaleur situées en toiture et la chaufferie, malgré l'isolation des conduites extérieures et (iv) des nuisances sonores excessives pour les habitants du dernier étage de l'immeuble. Sans les pannes des PAC et avec un meilleur rendement de la chaudière (90% sur PCS au lieu de 69%), le COP global du système s'élèverait à 1.7 environ.

Le second site pilote, anciennement chauffé par une chaudière au mazout, est à présent équipé d'un système monovalent comportant 2 pompes à chaleur sur l'air de type industrielle. Durant la dernière année du suivi, le COP annuel s'élevait également à 2.3, auxiliaires inclus, sachant que les besoins d'ECS représentaient près de la moitié des besoins de chaleur totaux. Les dysfonctionnements



observés lors de la première année du suivi sont les suivants : (i) absence de variation de la température de production des pompes à chaleur en fonction de la température extérieure, (ii) fonctionnement non-synchronisé des circulateurs avec leurs pompes à chaleur respectives et (iii) présence de circulateurs à débit fixe intégrés aux pompes à chaleur industrielles alors qu'elles disposent chacune de plusieurs étages de puissance.

La plupart des dysfonctionnements observés sur les deux sites pilotes provenaient d'un paramétrage incorrect des appareils et ont pu être corrigés en optimisant la régulation du système. Il a cependant parfois été nécessaire d'apporter des modifications au circuit hydraulique. Ces sites pilotes démontrent qu'une attention particulière doit être portée à la conception du circuit hydraulique et à la régulation du système afin d'en assurer l'efficacité, la fiabilité et la pérennité, en particulier en cas de bivalence parallèle avec une chaudière. Il convient notamment de vérifier l'adéquation avec la conception à chacune des étapes du projet. De plus, l'utilisation dans le résidentiel collectif de pompes à chaleur conçues pour des villas ou pour des applications industrielles est possible bien que non-optimal. Une augmentation de l'offre de pompes à chaleur spécifiques à ce type d'application permettrait d'atteindre plus facilement des performances énergétiques élevées.

Schémas hydrauliques et dimensionnement

Pour pallier à la lacune du milieu pour les applications dans les bâtiments multi-logements, divers schémas hydrauliques ont été élaborés dans le cadre de ce projet. Ils correspondent à différents scénarii de changement de l'agent énergétique au profit de système de pompe à chaleur sur l'air, avec et sans réutilisation d'une chaudière existante. Les résultats se composent d'un schéma de système monovalent et de trois schémas de systèmes bivalents. Ils sont tous accompagnés d'une analyse fonctionnelle, élément clé pour garantir le bon fonctionnement de l'installation en tout temps. De plus, une méthode de dimensionnement a été élaborée à partir des règles de l'art et des données disponibles dans le cadre d'une modélisation énergétique du système. Elle permet de déterminer la capacité de la pompe à chaleur, de la chaudière en cas de bivalence, ainsi que le volume des ballons tampons pour chacun des systèmes proposés.

Validation du modèle et systèmes de référence

Afin d'évaluer les performances des systèmes proposés, de les comparer entre eux et d'émettre des recommandations, des modèles énergétiques ont été mis en place à l'aide du logiciel TRNSYS. Dans un premier temps, le système monovalent a été simulé selon le fonctionnement réel observé sur un des sites pilotes, puis il a été validé à partir de mesures in situ. Les résultats obtenus ont montré que le modèle permet de reproduire de manière fidèle le système réel. En effet, les flux entrants et sortants du système sont correctement reproduits avec une erreur annuelle de 3% au maximum, à l'exception de la consommation électrique de la pompe à chaleur (erreur de 19%). Les écarts observés sont principalement dû à (i) la difficulté de considérer dans la simulation tous les changements manuels apportés au système réel au cours de la période d'étude et (ii) à la divergence entre la performance du fabricant de la pompe à chaleur et les mesures. Malgré cela, les corrélations simulations/mesures restent satisfaisantes pour que le modèle serve de base pour le développement des modèles des autres systèmes.

Afin de s'affranchir des spécificités du site pilote, le modèle a ensuite été normalisé pour une année climatique de référence. A partir du modèle du système monovalent validé et normalisé, les trois systèmes bivalents proposés ont été simulés selon les analyses fonctionnelles établies, pour une même demande de chaleur. La bivalence avec une chaudière permet d'améliorer les performances annuelles des pompes à chaleur, puisque l'on passe d'un COP annuel de 2.85 en monovalent contre environ 3.15 pour les systèmes bivalents. En revanche, les émissions de gaz à effet de serre sont nettement plus faibles dans le cas monovalent. Aucun système bivalent ne semble se démarquer considérablement, bien que le système bivalent avec chaudière non-modulante émette environ 20% de CO₂eq de plus que



les deux autres à cause d'une surproduction de la chaudière, réduisant alors le taux de couverture de la pompe à chaleur.

Etude de sensibilité

Les quatre systèmes ainsi obtenus ont alors servi de référence pour une étude de sensibilité portant sur les niveaux de demande de chauffage et d'eau chaude sanitaire, ainsi que sur un éventuel sous- ou surdimensionnement de la pompe à chaleur. Pour les différentes variantes étudiées, le COPa de la pompe à chaleur obtenu varie entre 2.8 et 3.3 et le COP global du système, qui inclut les performances de la chaudière, est compris entre 1.5 et 2.9. Les émissions de gaz à effet de serre des systèmes monovalents sont de l'ordre de 50 gCO₂eq par kWh de demande thermique, tandis que les systèmes bivalents atteignent dans la plupart des cas 80 à 100 gCO₂eq/kWh_{therm}.

Cette étude de sensibilité a montré que l'optimisation des performances de la pompe à chaleur est intéressante, mais que c'est l'efficacité globale du système qui est à considérer pour minimiser la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre. De plus, avec le mix électrique suisse, il semble plus avantageux de mettre en place un système monovalent que bivalent, malgré une certaine dégradation des performances de la pompe à chaleur en hiver. Un système bivalent peut cependant s'avérer être une alternative intéressante, bien que les émissions soient 1.4 à 2.2 fois plus élevées que pour un système monovalent. En effet, elles restent tout de même 2.3 à 3.5 fois plus faibles qu'un système comportant uniquement une chaudière. En particulier, les systèmes bivalents pourraient constituer une solution transitoire pour changer d'agent énergétique avant la rénovation de l'enveloppe du bâtiment.

En plus des problématiques de performances, l'aspect économique entre en jeu pour la prise de décision quant au système à installer. Celui-ci n'a pas été pris en compte dans cette étude, mais plusieurs éléments relatifs au dimensionnement de la pompe à chaleur, intimement liés à l'aspect économique, ont été soulevés. D'une part, les systèmes monovalents requièrent l'installation d'une pompe à chaleur 2 à 3 fois plus puissante que pour des systèmes bivalents dimensionnés de sorte à assurer 80% de la production avec la pompe à chaleur. Il semblerait cependant que la capacité de la pompe à chaleur en monovalent pourrait être fortement réduite en ayant recours à un simple appoint électrique pour les journées les plus froides. D'autre part, la capacité de la pompe à chaleur pourrait également être réduite dans le cas de certains systèmes bivalents en assurant une partie de la production d'eau chaude sanitaire avec la chaudière. La pompe à chaleur ne serait alors plus obligée de disposer de la capacité suffisante lors des jours les plus froids comme c'est le cas dans les schémas hydrauliques proposés dans cette étude.

Perspectives

Etant donné la richesse de la problématique et des résultats obtenus dans ce projet, le projet AirBiVal donnera lieu à des études complémentaires. En particulier, il s'agit du projet « Régulation PAC air en cascade », co-financé par SIG et SuisseEnergie, dont l'objectif est d'améliorer la gestion en cascade des producteurs de chaleur (pompe à chaleur en multi-étage ou multi-pack, chaudière d'appoint).

Il est également question du projet de thèse de doctorat de Omar Montero D. (octobre 2020 – septembre 2025), financé par SIG, portant sur l'intégration dans le parc immobilier existant de sources énergétiques renouvelables, via pompe à chaleur et/ou chauffage à distance. Ce projet permettra notamment de : i) procéder à une revue de littérature et à du benchmark avec d'autres études menées au niveau national et international ; ii) publier les résultats dans des revues scientifiques ; iii) élargir l'étude à des problématiques connexes (schéma hydrauliques de sous-stations pour réseau de chaleur à distance et/ou pompes à chaleur, abaissement des niveaux de température de production, stratégies entre rénovation du bâti (baisse de la demande) et intégration de renouvelables.



Enfin, CSD Ingénieurs SA propose de procéder par la suite à la mise à jour du Vademecum "PAC air-eau en toiture" élaboré par SIG et CSD Ingénieurs SA (CSD Ingénieurs SA et Services Industriels de Genève 2018) de sorte à refléter les résultats des divers travaux réalisés.



10 Bibliographie

- AERMEC. 2014. NRK 0200-0700 Technical manual. <https://www.aermec.co.uk/portfolio/nrk/>
- AERMEC. 2016. Reversible heat pumps high efficiency - Technical manual NRK 0200-0700. <https://aeroventic.com/heat-pumps-anl-aermec>.
- Bontemps, Stéphanie. 2015. « Validation expérimentale de modèles : application aux bâtiments basse consommation ». Thèse de doctorat, Université de Bordeaux. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01271593>.
- Calame, Nicole, Alisa Freyre, Fabrice Rognon, Simon Callegari, et Matthias Rüetschi. 2019. « Air to Water Heat Pumps for Heating System Retrofit in Urban Areas: Understanding the Multi-Faceted Challenge ». *Journal of Physics: Conference Series* 1343 (novembre): 012079. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1343/1/012079>.
- Calame, Nicole. 2021. « Heat Pump Retrofit Projects for Multi-Family Buildings – An Obstacle Run ». *Heat Pumping Technologies Magazine*, 20 mars 2021. <https://heatpumpingtechnologies.org/publications/heat-pump-retrofit-projects-for-multi-familybuildings-an-obstacle-run/>.
- CSD Ingénieurs SA, et Services Industriels de Genève. 2018. « « PAC air-eau en toiture » : Guide pratique pour l'implémentation de pompes à chaleur air-eau en toiture dans les immeubles résidentiels de petite et moyenne taille. » Vademecum. SuisseEnergie.
- CSD Ingénieurs SA. 2019a. « IEA HPT Annex 50 Heat Pumps in Multifamily Buildings. Best Practice Examples: Daru, Geneva, Switzerland ». <https://heatpumpingtechnologies.org/annex50/case-studies/daru/>.
- CSD Ingénieurs SA. 2019b. « IEA HPT Annex 50 Heat Pumps in Multifamily Buildings. Best Practice Examples: St-Julien, Geneva, Switzerland ». <https://heatpumpingtechnologies.org/annex50/case-studies/st-julien/>.
- Cuvillier, Guillaume, Nicole Calame, Fabrice Rognon, Omar Montero D., Pauline Brischoux, et Pierre Hollmuller. 2021. « Schémas et simulations de systèmes avec PAC sur l'air dans les immeubles résidentiels collectifs ». In 27. *Tagung des BFE-Forschungsprogramms «Wärmepumpen und Kältetechnik»*. BFH Burgdorf, Suisse.
- De Sousa Fraga, Carolina, Floriane Mermoud, Pierre Hollmuller, Eric Pampaloni, et Bernard Marie Lachal. 2015. « Large Solar Driven Heat Pump System for a Multifamily Building: Long Term in-Situ Monitoring ». *Solar Energy* 114: 427-39. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.01.039>.
- De Sousa Fraga, Carolina. 2017. « Heat Pump Systems for Multifamily Buildings: Which Resource for What Demand? » Thèse de doctorat, Université de Genève. <https://doi.org/10.13097/archive-ouverte/unige:94939>.
- Gabathuler, Hans Rudolf, Christoph Gmür, Erich Häuselmann, Hans Mayer, et Erich Schadeegg. 1995. Schémas standards. Schémas éprouvés dans la pratique pour pompes à chaleur, couplage chaleur-force et de l'utilisation des rejets thermiques. Ravel. Cahier 5. 724.359 f.



- Gadola, Reto, Bless Claudia. 2017. « Wärmepumpen-Heizungszentralen in der Praxis : Worschläge für eine gesamtheitliche Betrachtung kleiner und mittelgrosser Anlagen ». Energie Schweiz.
- Khoury, Jad. 2014. « Rénovation énergétique des bâtiments résidentiels collectifs: état des lieux, retours d'expérience et potentiels du parc genevois ». Thèse de doctorat, Université de Genève. <https://doi.org/10.13097/archive-ouverte/unige:48085>.
- Klein, S.A. et al. 2010. *TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program*. Madison, USA,: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin. <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>.
- Mermoud, Floriane, Pierre Hollmuller, Eric Pampaloni, et Bernard Marie Lachal. 2014. « 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 ». Office cantonal de l'énergie. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:41178>.
- Montero D., Omar, Carolina De Sousa Fraga, Simon Augustin Callegari, et Pierre Hollmuller. 2020a. « Air-to-Water Heat Pumps as a Substitution of Oil-Boiler in a Non-Retrofitted Multi-Family Building of the 70's. In-Situ Monitoring, Actual Energy Balance and Performance ». In *Proceedings of the 13th IEA Heat Pump Conference 2020*. Jeju, Korea. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:136513>.
- Montero D., Omar, Carolina De Sousa Fraga, Simon Augustin Callegari, et Pierre Hollmuller. 2020b. « 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. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:136507>.
- Montero D., Omar. 2020. « Pompe à chaleur air/eau pour bâtiments résidentiels collectifs : retour d'expérience et validation par simulation numérique ». Master en sciences de l'environnement, Université de Genève.
- OCEN (Office cantonal de l'énergie). 2020. « Energie - Degrés jour ». <https://www.ge.ch/document/energie-degres-jour>.
- OFEV, Office fédéral de l'environnement. 2019. « Facteurs d'émission de CO2 selon l'inventaire des gaz à effet de serre de la Suisse ».
- Primas Alex, Stettler Yves, Sonderegger Beat. 2014. « Wärmepumpen für die Instandsetzung, Systemevaluation für die Instandsetzung », Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik, Amt für Hochbauten Stadt Zürich.
- Quiquerez, Loic, Jose D. Cabrera Santelices, Pierre Hollmuller, et Bernard M. Lachal. 2013. « Températures de distribution de chauffage du parc immobilier genevois ». Université de Genève. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:27989>.
- Quiquerez, Loic, Bernard M. Lachal, Michel Monnard, et Jérôme Faessler. 2016. « Evaluation quantitative de scénarios de développement du marché de la chaleur à Genève à l'horizon 2035 : Quel rôle pour les réseaux de chaleur ? » Université de Genève. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:84656>.
- Quiquerez, Loic. 2017. « Analyse comparative des consommations de chaleur pour la production d'eau chaude sanitaire estimées à partir de relevés mensuels: Etude sur un échantillon de bâtiments



- résidentiels collectifs alimentés par un réseau de chaleur à Genève ». <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:91218>.
- Rognon, Fabrice, Alisa Yushchenko, et Matthias Rüetschi. 2017. « Retrofitting Fossil-Based Heating Systems with Air to Water Heat Pumps in Multifamily Houses ». In *Proceedings of the 12th IEA Heat Pump Conference 2017*. Rotterdam, Netherlands.
- Romano, Elliot, Pierre Hollmuller, et Martin Patel. 2018. « Émissions horaires de gaz à effet de serre liées à la consommation d'électricité – une approche incrémentale pour une économie ouverte : Le cas de la Suisse ». Université de Genève. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:131622>.
- SIA. 2008. « Norme 2028:2010 - Données climatiques pour la physique du bâtiment, l'énergie et les installations du bâtiment ». Société suisse des ingénieurs et des architectes.
- SIA. 2015. « Norme 385/2:2015 - Installations d'eau chaude sanitaire dans les bâtiments - Besoins en eau chaude, exigences globales et dimensionnement ». Société suisse des ingénieurs et des architectes.
- Schneider, Stefan, Jad Khoury, Bernard Marie Lachal, et Pierre Hollmuller. 2018. « Geo-Dependent Heat Demand Model of the Swiss Building Stock: Method, Results and Example of Application ». Genève: SCCER Future Energy Efficient Buildings & Districts. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:103112>
- Suarez, A. 2020. Nachrüsten mit Wärmepumpen. In *Phase 5, Fachzeitschrift für Planer, Ingenieure und Installateure*, no 04:2020, pp. 59-63.
- Tornare, Guy, Gaëlle Barras, Raphaël Elio, François Baud, Jan Scheider, Wolfgang Thiele, Olivier Graf, et al. 2017. « 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 ». Office fédéral de l'énergie (OFEN). <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:92770>.



11 Annexes

Annexe A IEA Annex 50 Status Report 2020

Annex 50: "Heat Pumps in Multi-Family Buildings for space heating and DHW"

January 2017 – December 2020

Annex status report covering the period February 2019 to September 2019

Marek Miara, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE)

Highlights / success stories

- Developing the concept of "solutions matrix" allowing for an overview of different heat pumps solutions in MFB
- Extending the case studies (current status: examples of Germany, France, Austria and Switzerland), expanding the website (the website is published and available at: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex50/best-practices/>)

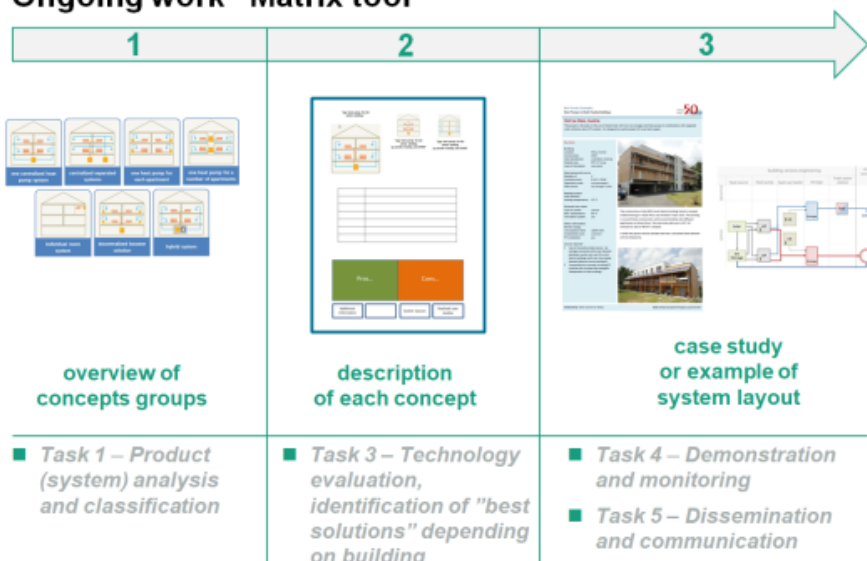
Activities since the last ExCo report

Since the last status report two meetings took place. One in May in Fribourg, Switzerland (hosted by CSD Ingénieurs) and the second in October in Turino, Italy (hosted by Politecnico di Torino).

The first draft of the Task 1 report has been prepared (by Odile Cauret, EDF, France) and discussed during the last Annex meeting.

The case studies data base has been enlarged, new case studies sheets have been prepared. Current status of the "Case Studies Map":

Ongoing work "Matrix tool"



The collection of examples of Denmark, UK, The Netherlands and Italy are still in progress.

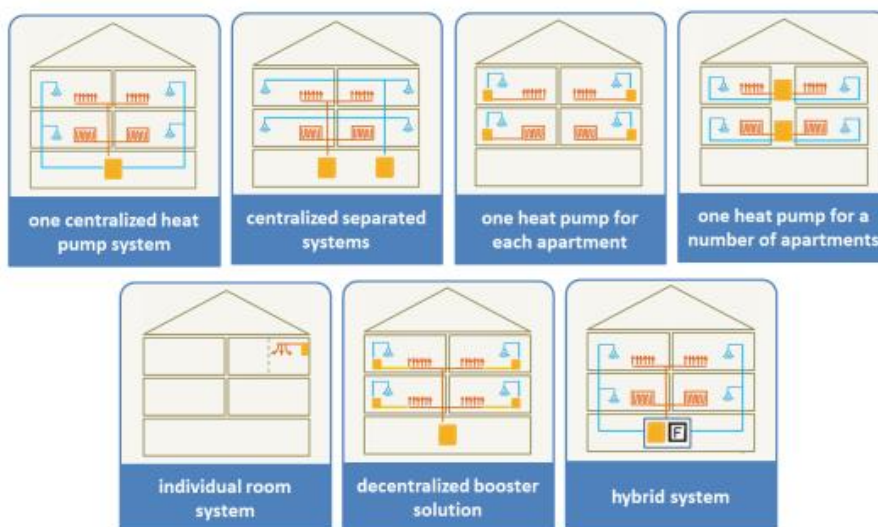


Achievements in the Annex

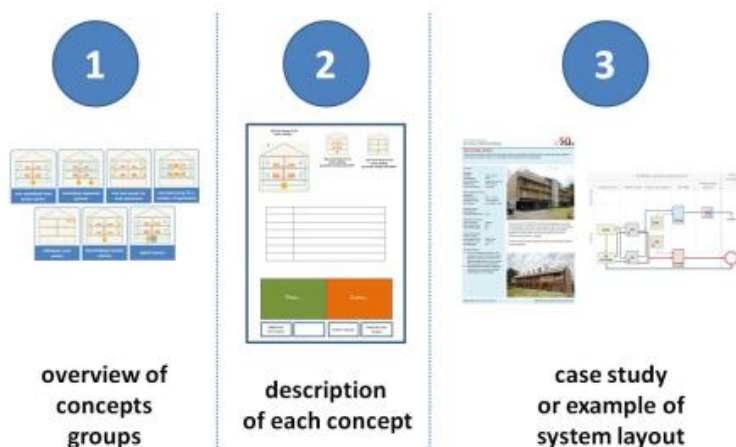
The main achievement of the Annex in the last period is the development of the “solution matrix” allowing for an overview of various heat pumps solutions in MFB. The matrix has been developed during the last two physical meetings with an active participation of all present members of the Annex.

The “solution matrix” consists of a number of “solution families” representing the general types of the solutions of HP in MFB. Each “family”, represented by schematic drawing, consists of several “family members” representing different variations of the main solution.

The “solutions families” are presented on the picture below.



The presentation of the “solutions families” is the first step in the three steps process presented below.



The second step is a more detailed description of the solution with specification of the “family members”, main advantages and disadvantages of the system, as well as much more information. This step will be developed in the next period of the Annex50.

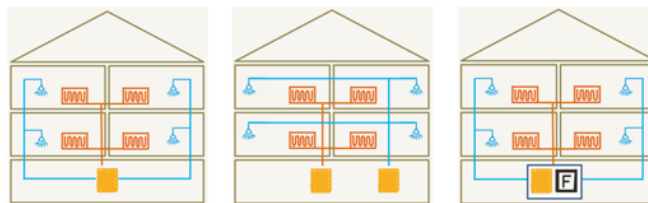


The third step consists of the corresponding case studies, showing realized system. The second part included in this step forms the system layouts in form of energy flows. An example of an energy flow, based on one of the case studies, has been presented below.

Vision – online tool “solution finder”

Building envelope	new	old	renovated
Type of system	central	decentralised	mix
mode	heating	DHW	Heating + DHW
medium	water	air	

Suggested solutions:

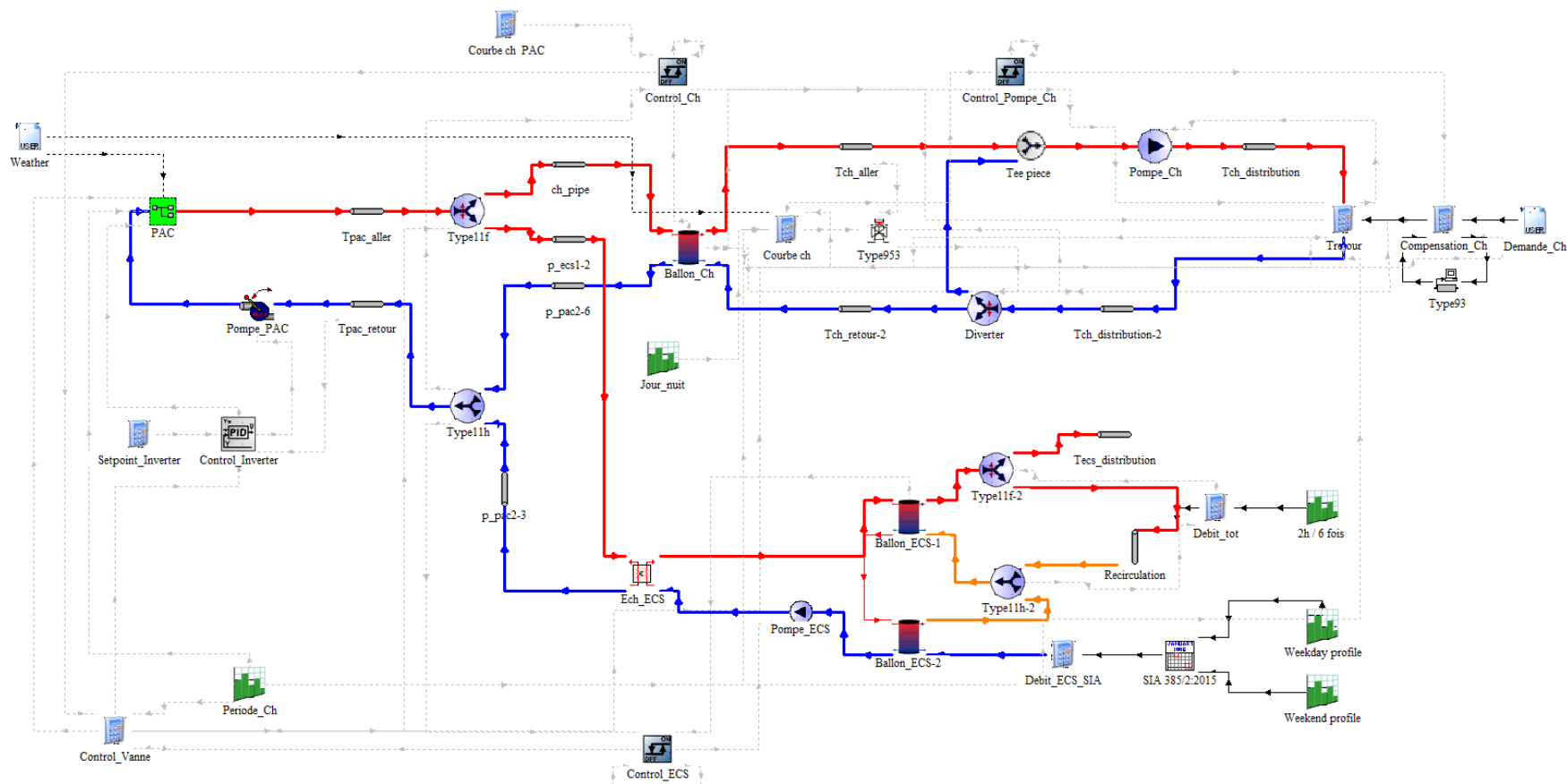


The members of the Annex have the ambition to develop further the presented tool and to prepare an online version which should include the number of different selection criteria (for example type of the building, energy demand, heat source, etc.). As a result of the user should get the preselected solutions including all members of the “family solutions”.



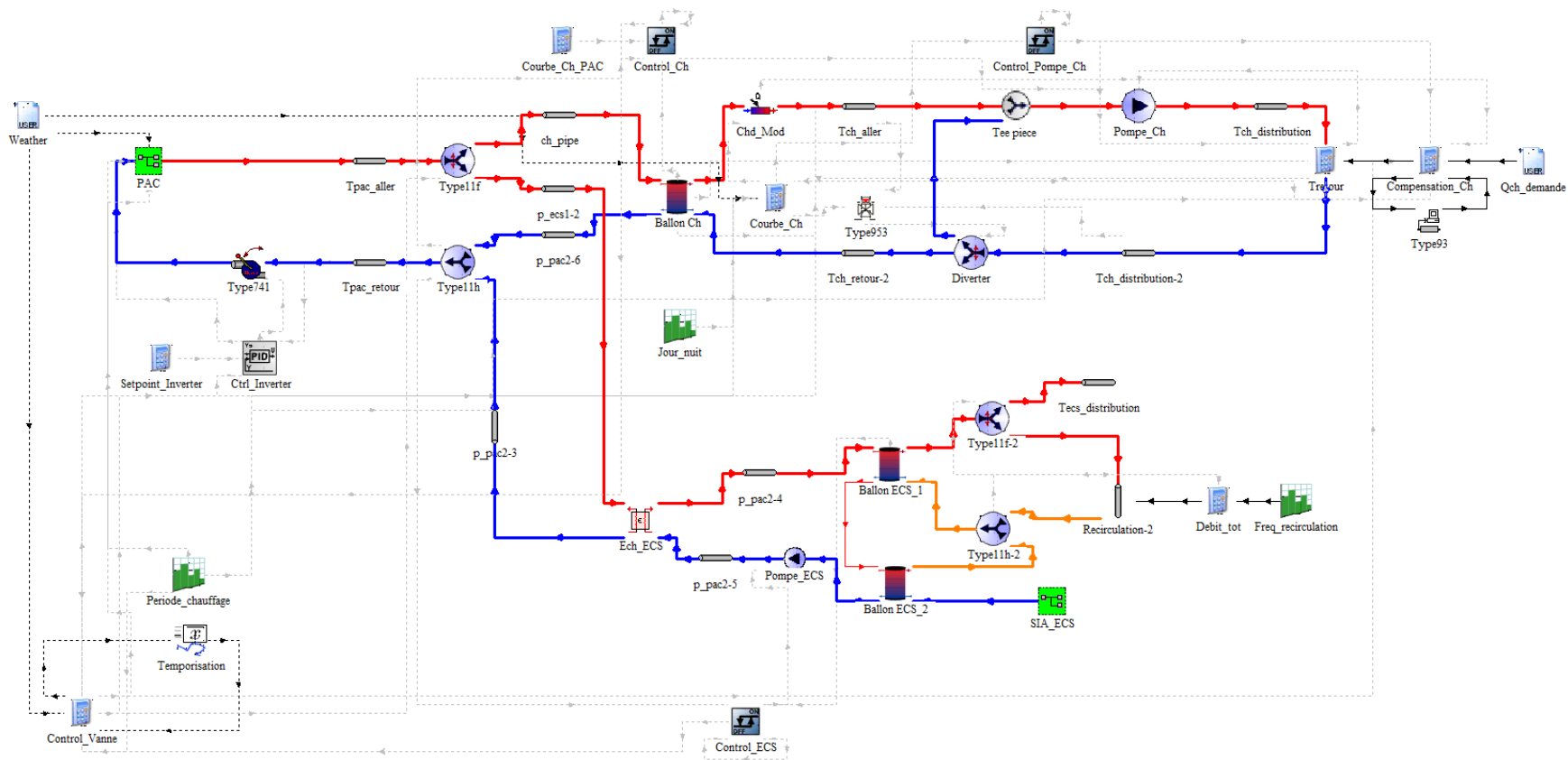
Annexe B Assemblages des modèles TRNSYS

(a) Système monovalent



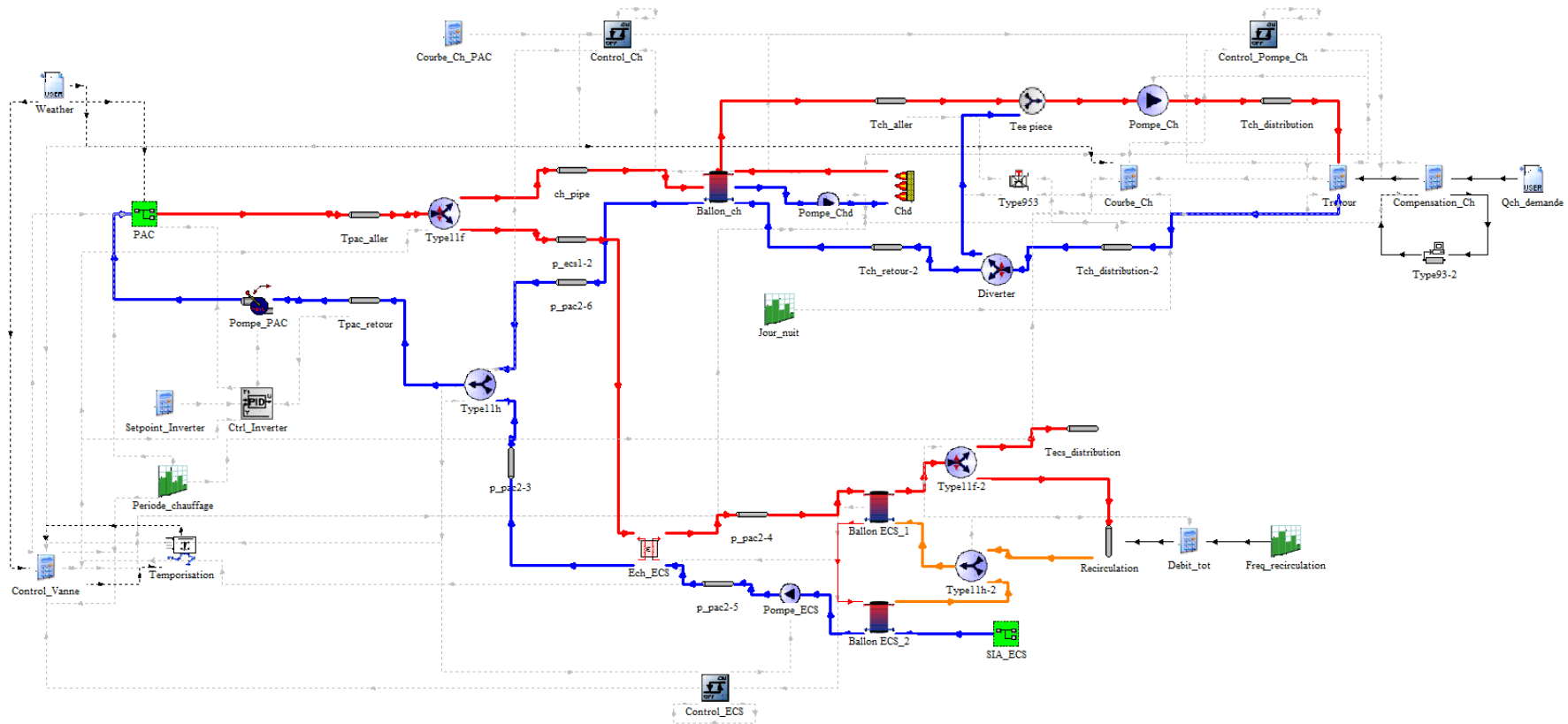


(b) Système bivalent parallèle avec chaudière modulante pour le chauffage



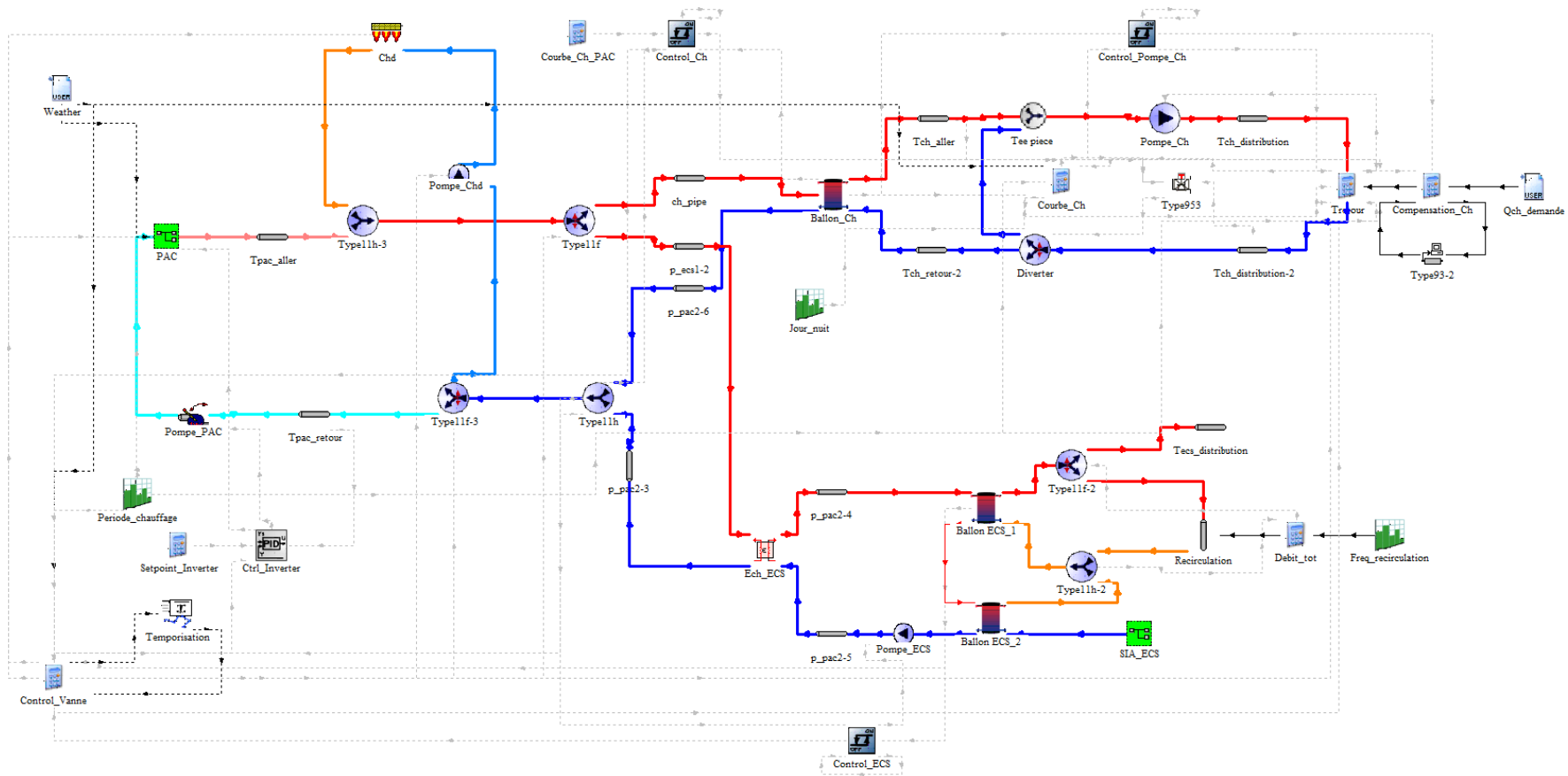


(c) Système bivalent parallèle avec chaudière non-modulante pour le chauffage





(d) Système bivalent alternatif avec chaudière non-modulante pour le chauffage





Annexe C Jours typiques pour les systèmes de référence modélisés

Cette annexe présente les résultats de simulation des 4 systèmes de référence (voir chapitres 4 et 6.5) pour des jours typiques de fonctionnement. Le système monovalent est illustré par deux journées, l'une durant la période estivale (le 2 juillet) et l'autre durant la période de chauffage (le 2 décembre). Comme les résultats estivaux sont très similaires dans système à l'autre, seule la journée d'hiver est présentée dans le cas des systèmes bivalents.

Il est à noter que, les données étant issues d'un modèle numérique dans lequel les pertes de chaleur des tuyaux sont définies comme nulles, certaines températures visualisées ici restent constantes lorsqu'il n'y a pas de débit (ex. : T aller PAC, T retour PAC, T distribution). De plus, lorsque la température de distribution de chauffage est constante, cela signifie que la pompe de distribution est arrêtée car la température de distribution est trop faible (inférieure de 5°C par rapport à la consigne). La demande non comblée durant cette période est ensuite compensée durant les heures suivantes. Ceci est un choix de modélisation permettant d'éviter d'alimenter le bâtiment, simulé par des courbes de charge, avec des températures qui ne sont pas réalistes.

(a) Système monovalent

Durant l'été (Figure 80), on observe environ 8 cycles d'ECS par jour d'une durée de seulement 15 à 30 minutes. Cette courte durée provient du fait que la PAC est surdimensionnée pour le mode ECS : une PAC de 84 kW (@ 7°C / 45°C) suffirait alors que 250 kW (@ 7°C / 45°C) sont requis pour combler la demande de chauffage.

La PAC s'enclenche lorsque la température mesurée par la sonde située à environ 1/3 du haut du ballon d'ECS descend en-dessous de 50°C. Elle charge alors le ballon jusqu'à ce que cette température atteigne 60°C.

Au début des cycles d'ECS, on constate une baisse significative de la température au niveau de la sonde du ballon. Cela est dû à un soutirage important alors que la PAC vient tout juste de s'activer. La température de sortie du ballon reste cependant acceptable, généralement supérieure à 49°C.

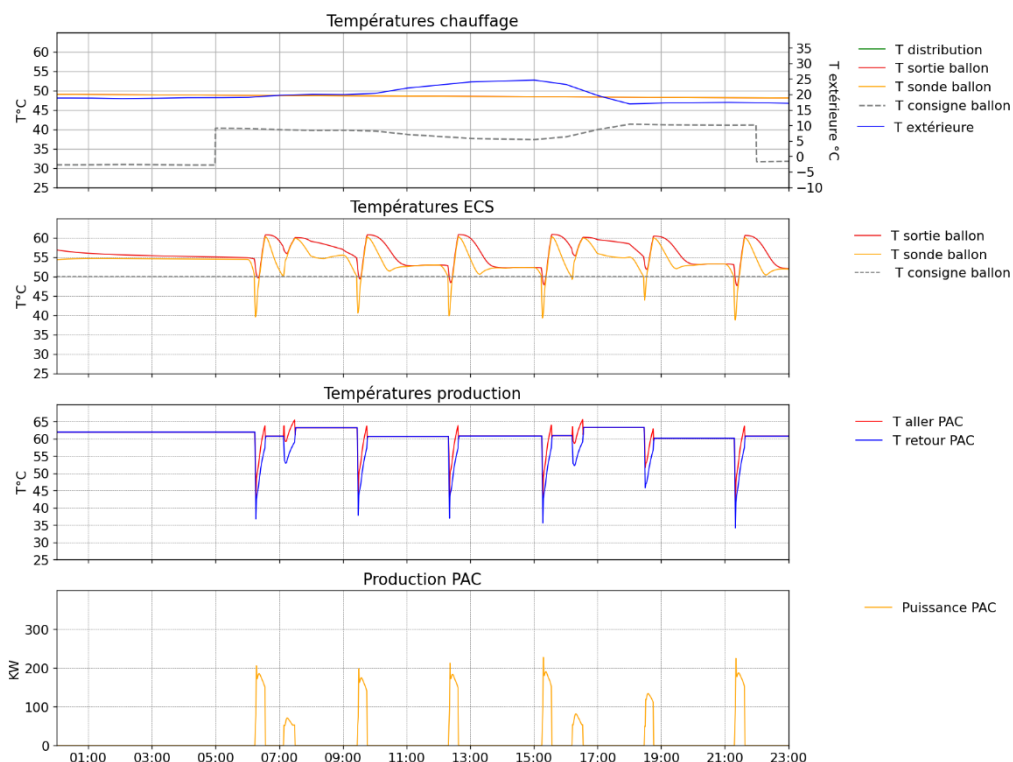


Figure 80 : Résultats de simulation pour une journée typique de fonctionnement du système monovalent durant l'été (le 2 juillet)



Durant l'hiver (Figure 81), on retrouve environ le même nombre de cycles d'ECS que pendant la période estivale. On voit qu'à présent la PAC s'enclenche également pour répondre à la demande de chauffage en modulant sa puissance. Elle s'active lorsque la température du ballon de chauffage, au niveau de la sonde située à environ 1/3 du haut du ballon, devient inférieure à la température de consigne. Elle s'arrête lorsqu'elle atteint la température de consigne + 5°C (hystérèse).

La température de distribution suit bien la température de consigne à quelques exceptions près, principalement liées au mode ECS (prioritaire par rapport au mode chauffage) et à l'enclenchement de la PAC après un arrêt durant la nuit lorsque la température extérieure est faible.

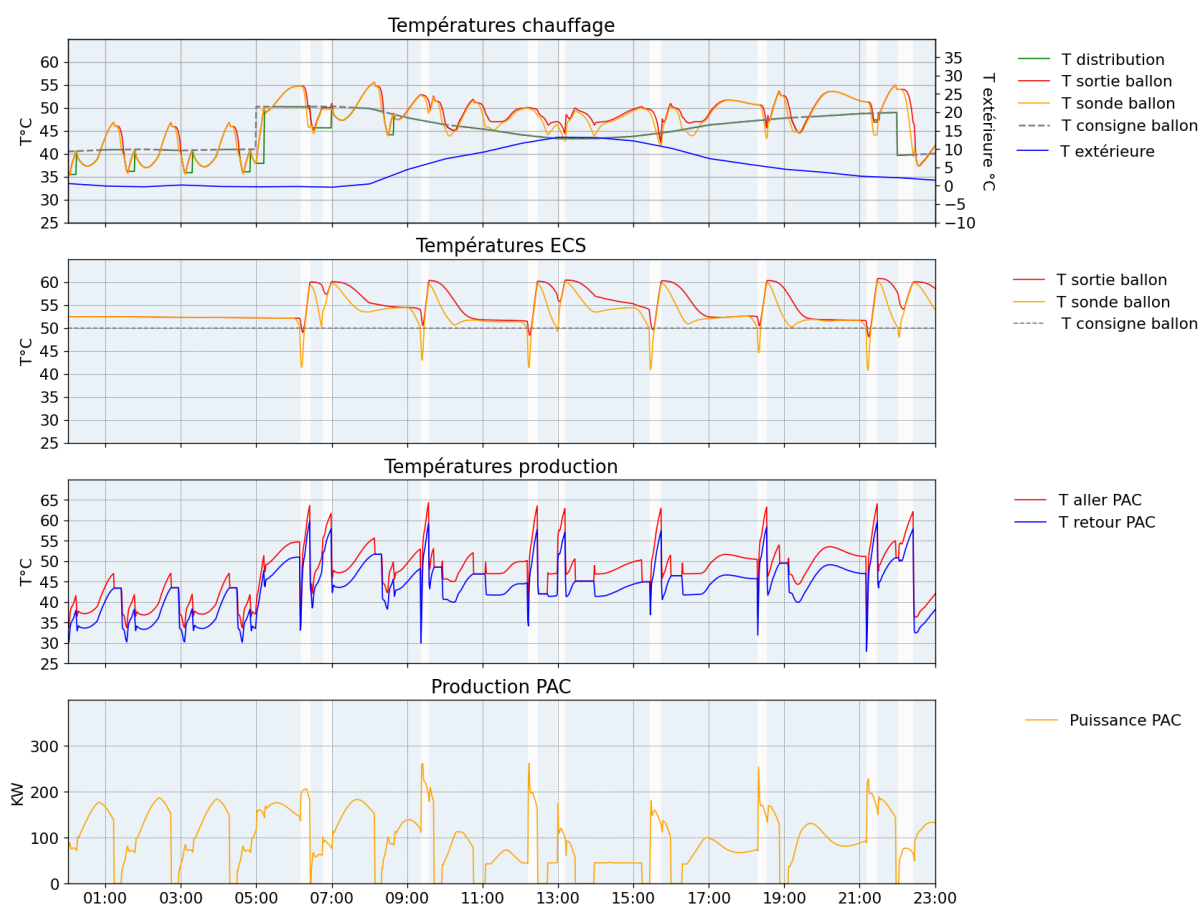


Figure 81 : Résultats de simulation pour une journée typique de fonctionnement du système monovalent durant la période de chauffage (le 2 décembre). Les bandes blanches représentent le mode ECS, tandis que les bandes bleues correspondent au mode chauffage.



(b) Système bivalent parallèle avec chaudière modulante pour le chauffage

Le fonctionnement du système bivalent parallèle avec chaudière modulante est similaire à celui du système monovalent en mode ECS (Figure 82). Cependant, les cycles d'ECS sont plus longs, allant de 30 minutes à 1h, car la puissance PAC installée est plus faible (88 kW installés contre 274 kW en monovalent) et que seule la PAC opère en mode ECS.

En mode chauffage, la chaudière s'active lorsque la température extérieure est inférieure à la température de bivalence (4.5°C), c'est-à-dire avant 9h du matin et après 19h dans cet exemple. Elle module sa puissance pour atteindre la température de consigne en chauffage. Il arrive occasionnellement, par exemple vers 6h du matin, que la puissance de la chaudière (95 kW) ne suffise pas tout à fait au respect de la consigne. A ces moment-là, la chaudière et la PAC opèrent toutes deux à pleine puissance.

Durant le mode ECS, l'énergie stockée au préalable dans le ballon tampon de chauffage est fréquemment trop faible pour pouvoir respecter la consigne de distribution. La pompe de distribution de chauffage s'arrête alors lorsque la température de distribution est inférieure de 5°C par rapport à la consigne, et la demande non comblée durant cette période est compensée au cours des heures suivantes.

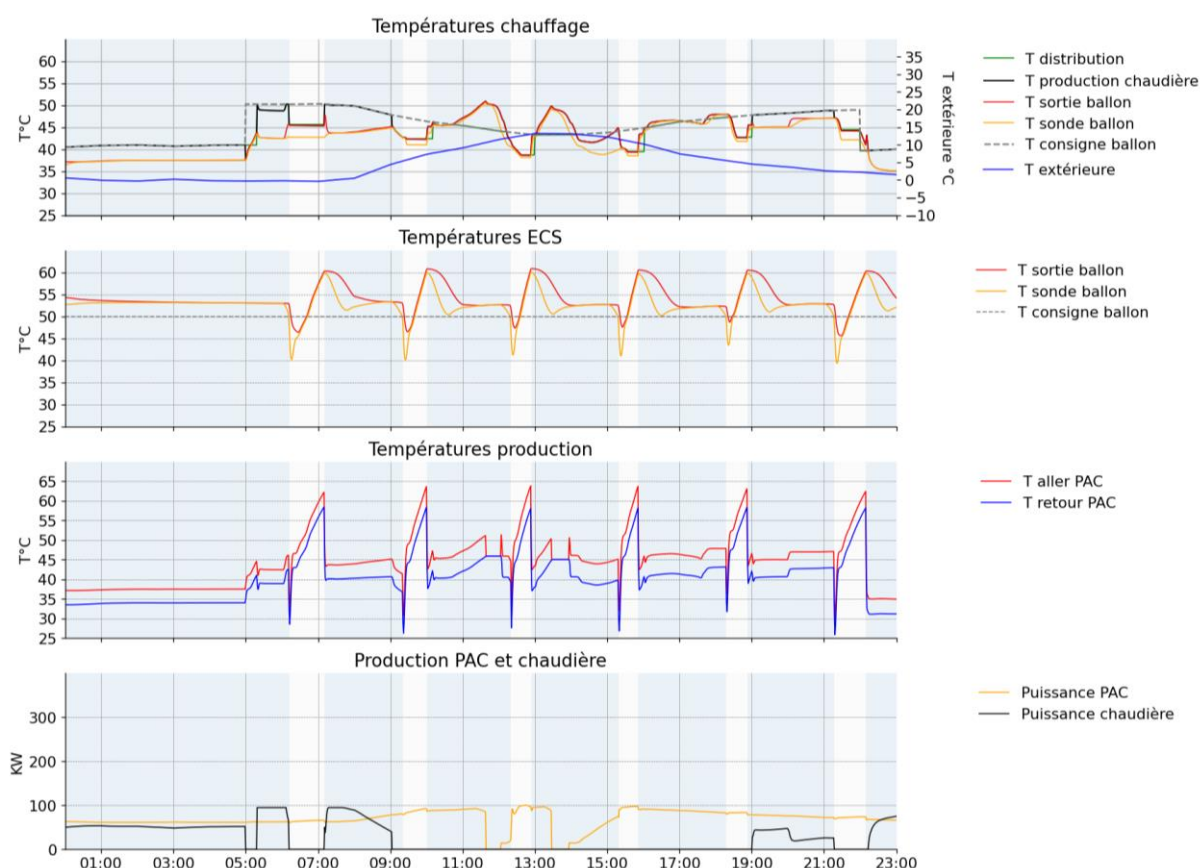


Figure 82 : Résultats de simulation pour une journée typique de fonctionnement du système bivalent parallèle avec chaudière modulante durant la période de chauffage (le 2 décembre). Les bandes blanches représentent le mode ECS, tandis que les bandes bleues correspondent au mode chauffage. La température de bivalence est égale à 4.5°C.



(c) Système bivalent parallèle avec chaudière non-modulante pour le chauffage

En mode ECS, le système bivalent parallèle avec chaudière non-modulante (Figure 83) se comporte de la même façon que le système (b), équipé d'une chaudière modulante (Figure 82).

En mode chauffage, la chaudière s'active également durant les mêmes périodes que le système (b) car la température de bivalence est identique dans ces deux systèmes (4.5°C). La chaudière non-modulante n'opère cependant pas en continu car elle délivre toute sa puissance (95 kW) à chaque enclenchement. La température de consigne du ballon de chauffage (+ hystérèse de 5°C) est donc rapidement atteinte. Ceci implique que la PAC s'arrête aussi, plutôt que de fonctionner en continu comme c'est le cas avec une chaudière modulante connectée en sortie de ballon (Figure 82).

A chaque enclenchement, la PAC n'opère pas immédiatement à 100% de sa capacité (88 kW @ 7°C/45°C). Elle augmente progressivement la puissance qu'elle fournit tandis que, pendant ce temps, la chaudière opère à pleine puissance (95 kW). Etant donné les puissances mises en jeu, la chaudière assurera donc une plus grande partie de la production de chaleur pour le chauffage en-dessous du point de bivalence. Ainsi, la production de chaleur totale assurée par la PAC dans ce système (71%, voir Tableau 20) est inférieure à l'objectif fixé lors du dimensionnement (80%). C'est notamment pour cette raison que l'analyse fonctionnelle (Figure 54) suggère de mettre en place une temporisation avant l'activation de la chaudière, non implémentée dans ce modèle numérique. Cela permettrait de laisser une chance à la PAC de combler la demande et ainsi de diminuer la part de production fossile pour ce système.

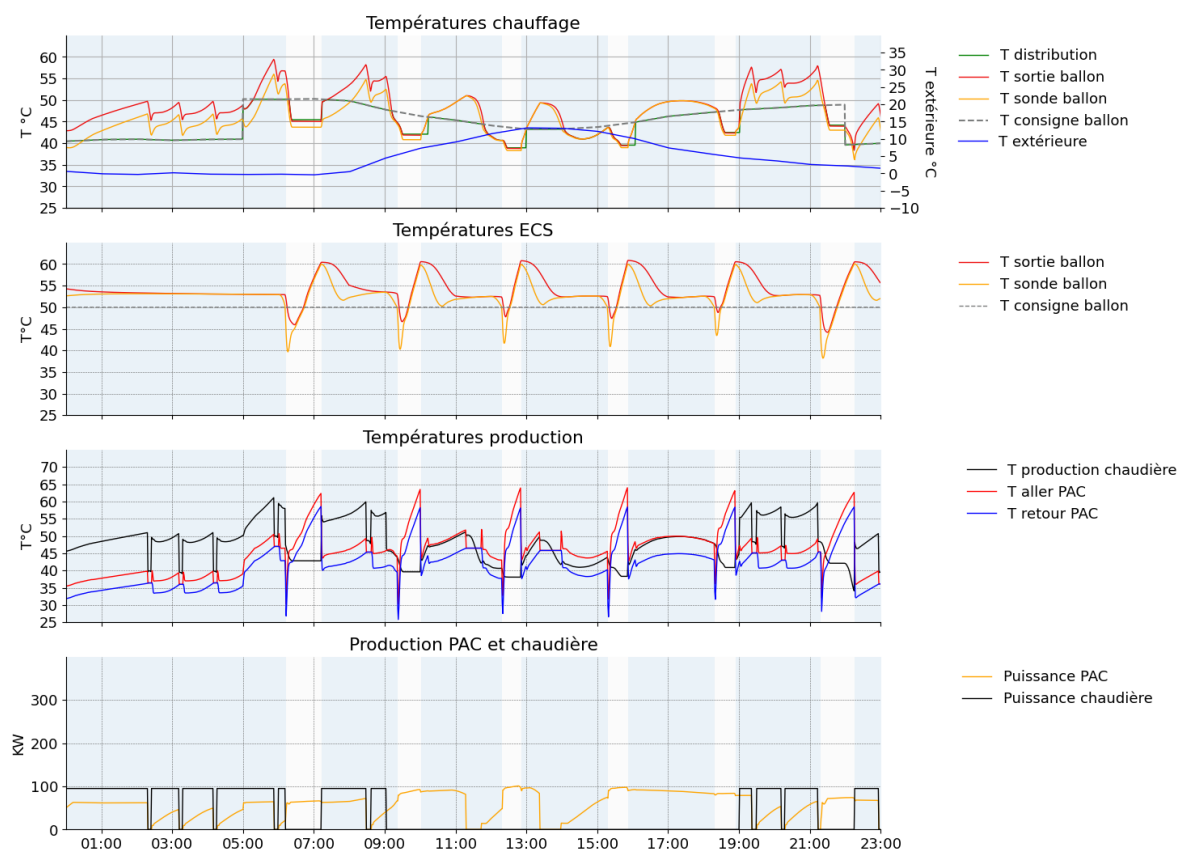


Figure 83 : Résultats de simulation pour une journée typique de fonctionnement du système bivalent parallèle avec chaudière non-modulante durant la période de chauffage (le 2 décembre). Les bandes blanches représentent le mode ECS, tandis que les bandes bleues correspondent au mode chauffage. La température de bivalence est égale à 4.5°C.



Quant à la température de distribution en chauffage (« T distribution »), elle respecte la plupart du temps la consigne quand le système est en mode chauffage. Tout comme pour le système (b) avec chaudière modulante, on observe cependant des arrêts fréquents de la distribution durant le mode ECS à cause de températures trop faibles. L'énergie non fournie est toutefois compensée durant les heures suivantes.

Il est à noter que, lorsque la chaudière est à l'arrêt, la température de production indiquée à la Figure 83 correspond simplement à la température du ballon au niveau de la connexion à la chaudière. D'où les variations observées.



(d) Système bivalent alternatif avec chaudière non-modulante pour le chauffage

Dans le cas du système bivalent alternatif (Figure 84), l'allure des températures liées à l'ECS est semblable à celle des 3 autres systèmes (a à c). Le nombre de cycles de charge du ballon tampon est similaire, soit 7 à 8 cycles par jour. En revanche, leur durée est comprise entre celle, très courte, du système monovalent (a) et celle des systèmes bivalents parallèles (b) et (c). Cela provient du fait que la capacité de la PAC installée pour le système bivalent alternatif (137 kW @ 7°C/45°C) est comprise entre celle du système monovalent (257 kW @ 7°C/45°C) et celle des systèmes bivalents parallèles (88 kW @ 7°C/45°C), et que la PAC assure seule la préparation de l'ECS.

A la différence des systèmes bivalents parallèles (b et c), la chaudière et la PAC n'opèrent jamais simultanément. De plus, comme la température de bivalence est plus faible (0.5°C en alternatif contre 4.5°C en parallèle, voir Tableau 19), la chaudière s'active moins pour la journée choisie.

Chaque cycle d'opération de la chaudière est court (15-20 min), ce qui met en évidence que sa capacité est bien plus élevée que la demande de chauffage pour ce jour-là. En effet, en bivalence alternative, la chaudière doit pouvoir combler seule la demande de chauffage durant les journées les plus froides. Sa capacité est donc élevée (189 kW) et, puisqu'elle ne peut pas moduler sa puissance, les cycles sont courts durant les journées plus clémentes.

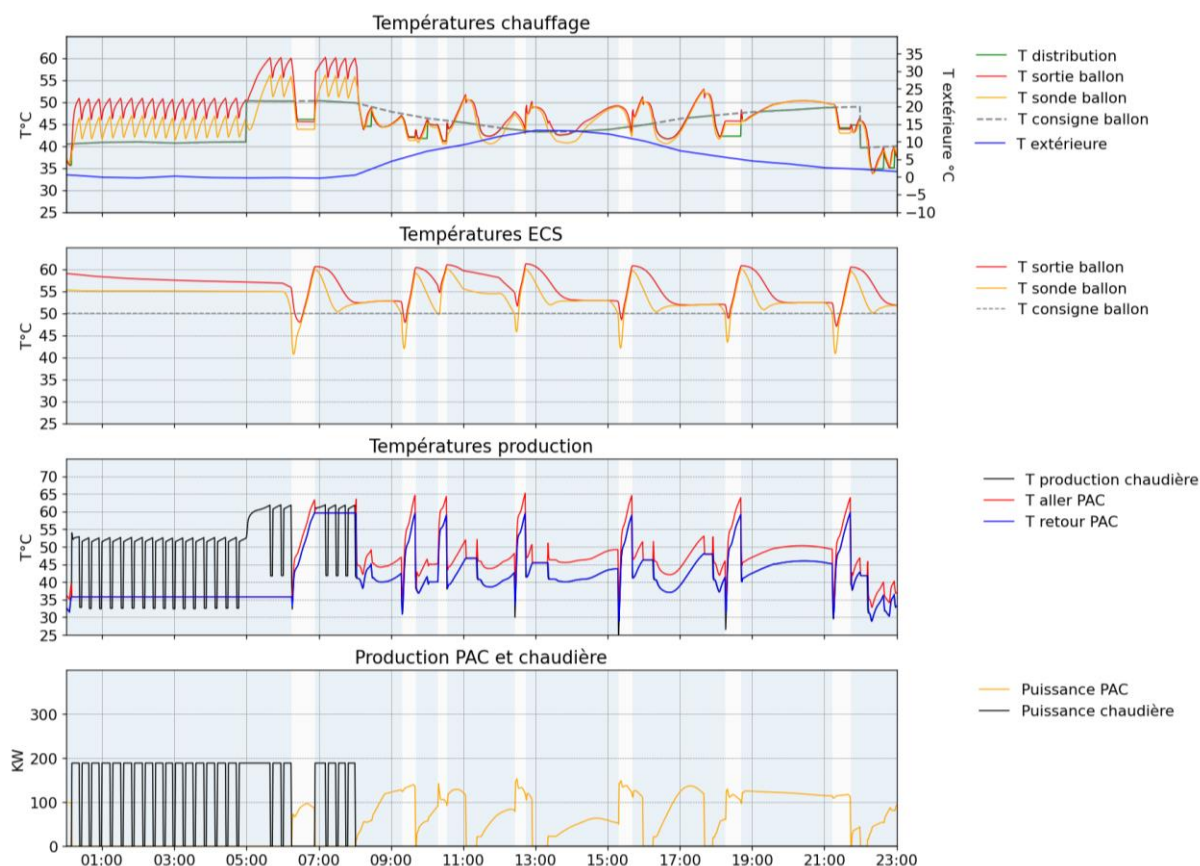


Figure 84 : Résultats de simulation pour une journée typique de fonctionnement du système bivalent alternatif avec chaudière non-modulante durant la période de chauffage (le 2 décembre). Les bandes blanches représentent le mode ECS, tandis que les bandes bleues correspondent au mode chauffage. La température de bivalence est égale à 0.5°C.



En revanche, le fait que la chaudière ne puisse pas moduler sa puissance est moins pénalisant pour ce système qu'en bivalence parallèle car la chaudière ne fait pas concurrence à la PAC. Le système parvient donc bien à atteindre l'objectif de couverture de 80% des besoins de chaleur totaux (chauffage et ECS) par la PAC, ce qui n'est pas le cas pour le système (c) (voir Tableau 20).

Enfin, tout comme pour les autres systèmes de référence, l'énergie stockée dans le ballon tampon de chauffage est fréquemment trop faible pour pouvoir respecter la consigne de distribution. La demande non comblée durant cette période est alors compensée au cours des heures suivantes.