Avec le soutien de
suisseénergie

Rapport final, Mars 2023

Gestion en cascade de pompes à chaleur air/eau pour immeubles résidentiels collectifs existants

Partie 1
Retours d'expérience sur sites pilotes et étude de sensibilité par simulation numérique

SuisseEnergie
Office fédéral de l'énergie OFEN

Pulverstrasse 13
CH-3063 Ittigen

Adresse postale:
CH-3003 Berne

Infoline 0848 444 444
suisseenergie.ch

Auteurs
Omar Montero D., Université de Genève, omar.monterodominguez@unige.ch
Pauline Brischoux, Université de Genève, pauline.brischoux@unige.ch
Pierre Hollmuller, Université de Genève, pierre.hollmuller@unige.ch

Avec la participation de :
Matthias Rüetschi, SIG, matthias.ruetschi@sig-ge.ch
Carolina Fraga, SIG, carolina.fraga@sig-ge.ch
Edouard Vionnet, SIG, edouard.vionnet@sig-ge.ch
Nicole Calame, CSD Ingénieurs SA, n.calame@csd.ch
Fabrice Rognon, CSD Ingénieurs SA, f.rognon@csd.ch

La présente étude a été élaborée pour le compte de SuisseEnergie.
La responsabilité du contenu incombe exclusivement aux auteurs.

Résumé

Ce projet traite la gestion en cascade des PAC air-eau, avec ou sans chaudière d'appoint, dans le contexte spécifique des immeubles résidentiels collectifs existants, sans rénovation significative de l'enveloppe du bâtiment. Les expériences rencontrées lors du suivi de sites pilotes ont démontré que cette gestion constitue un point délicat, voire problématique. L'objectif de ce projet consiste à analyser la gestion des cascades de PAC air-eau dans le contexte de bâtiments résidentiels collectifs existants, à partir de retours d'expérience de sites pilotes et d'études de sensibilité par simulation numérique dont les paramètres sont calés selon les valeurs mesurées in situ. A partir des résultats, des recommandations sont formulées : i) à l'intention des fabricants, pour l'intégration dans les modèles de PAC air-eau d'une gestion complète des cascades sans devoir recourir à une régulation externe ajoutée ; ii) à l'intention des ingénieurs pour la bonne planification et l'exploitation de tels systèmes. D'après les retours d'expérience sur sites pilotes, les PAC industrielles et de villas ne sont pas munies de certaines fonctionnalités qui permettent de gérer la cascade dans le contexte des immeubles résidentiels collectifs. Par ailleurs, le choix du délai entre l'activation des étages de puissance est important pour maintenir le confort des usagers, sans péjorer la durée de vie des PAC à cause de cycles courts. En bivalence, le réglage de ce délai doit être en adéquation avec l'activation de la chaudière afin d'assurer une couverture par la PAC élevée. Les études de sensibilité montrent que cette temporisation de la cascade devrait être fonction de la période de l'année (en raison des effets saisonniers), du mode d'opération (chauffage/ECS) et des caractéristiques de l'installation (PAC dédiée, volume du ballon, puissance de la PAC, etc.).

Zusammenfassung

Dieses Projekt befasst sich mit der Regelung von Luft/Wasser-Wärmepumpen, die in einer Kaskade miteinander betrieben sind, im spezifischen Umfeld bestehender Mehrfamilienhäusern ohne signifikante Gebäudesanierung. Die Erfahrungen aus den Feldanalysen der Pilotprojekte haben gezeigt, dass die Steuerung von kaskadierten Luft/Wasser-Wärmepumpen, mit oder ohne Spitzenkessel, in diesem Umfeld ein heikler sogar problematischer Punkt ist. Das Ziel dieses Projekts besteht darin, die Regelung von Luft-Wasser-Wärmepumpenkaskaden im Umfeld bestehender Mehrfamilienhäuser zu analysieren. Die Sensitivitätsanalysen werden mit numerischen Simulationen durchgeführt, deren Parameter auf Resultaten der Feldmessungen basieren.. Daraus werden Empfehlungen formuliert: i) für Hersteller für die Integration eines vollständigen Kaskadenmanagementsystems in Luft-Wasser-Wärmepumpenmodelle (ohne Einsatz von einem zusätzlichen externen Regelungssystem); ii) für Ingenieure in Bezug auf die Planung oder den Betrieb solcher Systeme. Auswertungen von Pilotprojekten zeigen, dass in Industrie- und Einfamilienhaus-Wärmepumpen einige Funktionen fehlen, um eine Kaskade im Umfeld von Mehrfamilienhäusern zu verwalten. Darüber hinaus ist die Wahl der Verzögerung zwischen der Aktivierung der Leistungsstufen für die Heizung wichtig, um den Benutzerkomfort aufrechtzuerhalten, ohne die Lebensdauer der Wärmepumpen durch kurze Zyklen zu beeinträchtigen. In Hybridsystemen muss diese Kaskadenverzögerung mit der Aktivierung des Heizkessels übereinstimmen, um einen hohen Anteil der erzeugten Wärme durch Wärmepumpe zu sichern. Sensitivitätsanalysen zeigen, dass diese Kaskadenverzögerung von der Jahreszeit (aufgrund saisonaler Effekte), der Betriebsart (Raumheizung/Heißwasser) und den Systemmerkmalen (gewidmete Wärmepumpe, Volumen des Speichers, Wärmepumpenleistung usw.) abhängen sollte.

Abstract

This project concerns the control of air-to-water heat pumps interconnected in a cascade in the specific context of existing multi-family buildings, without full building renovation. Experiences encountered during the monitoring of pilot projects have shown that, in this context, the control of air-to-water heat pump cascades, with or without backup boiler, is a delicate point, even problematic. The objective of this project is to analyze the control of air-to-water heat pump cascades in the context of existing multi-family buildings, based on feedback from pilot sites and sensitivity analyses (by numerical simulation). Based on the results, recommendations are formulated: i) for manufacturers, for the integration in air-to-water heat pump models of a complete cascade management system (without having to resort to an external control system); ii) for engineers, in relation to planning or operation of such systems. According to feedback from pilot projects,

industrial and single-family house heat pumps lack some functionalities to manage a cascade in the context of multi-family buildings. In addition, the choice of the delay between the activation of the heating stages is important to maintain user comfort, without degrading the lifespan of the heat pumps due to short cycling. In hybrid systems, this cascade delay must be in line with the activation of the boiler to ensure a high heat pump coverage. Sensitivity analyses show that this cascade delay should be function of the time of year (due to seasonal effects), the mode of operation (space heating/domestic hot water) and the characteristics of the system (dedicated heat pump, volume of the storage tank, heat pump capacity, etc.).

Synthèse

Contexte

Ce projet concerne la gestion en cascade des pompes à chaleur (PAC) air-eau, dans le contexte spécifique des immeubles résidentiels collectifs existants, sans rénovation. Les expériences rencontrées lors du suivi de sites pilotes ont démontré que, dans ce contexte, la gestion de pompes à chaleur air-eau en cascade, avec ou sans chaudière d'appoint, constitue un point délicat, voire problématique.

La complexité de la gestion des cascades réside dans : i) les limitations actuelles en termes de régulation des modèles de PAC disponibles sur le marché, et ii) dans le choix des paramètres de temporisation ou d'hystérésis qui influent notamment sur la durée de vie des machines et sur le confort des usagers.

L'objectif de ce projet consiste à analyser la gestion des cascades de PAC air-eau dans le contexte de bâtiments résidentiels collectifs existants, à partir de retours d'expérience de sites pilotes et d'études de sensibilité (par simulation numérique). A partir des résultats, des recommandations sont formulées : i) à l'intention des fabricants, pour l'intégration dans les modèles de PAC air-eau d'une gestion complète des cascades (sans avoir à recourir à une régulation externe) ; ii) à l'intention des ingénieurs, en lien avec la planification ou l'exploitation de tels systèmes.

Modes d'intégration et méthodes de régulation des cascades de PAC (Chapitre 1)

La gestion des cascades dans un système PAC air-eau peut être défini comme l'enclenchement ou l'arrêt successif des pompes à chaleur et de leurs différents compresseurs, effectué de manière centralisée. A cet effet, il est utile de distinguer les configurations suivantes :

1) **Au niveau du mode d'intégration :**

- Les PAC produisant le chauffage et l'ECS, en alternant entre les deux modes (en général avec priorité pour l'ECS) ;
- Les PAC dédiées à l'un des modes de production (chauffage ou ECS), ce qui nécessite au minimum une machine par mode, mais permet de mieux dimensionner les machines, ainsi que de produire en parallèle dans l'un et l'autre mode.

2) **Au niveau du type de PAC :**

- Les PAC conçues pour les villas, qui sont prévues pour opérer à des niveaux sonores compatibles avec les zones d'habitation, mais sont généralement de faible puissance. Le fractionnement de la puissance installée en plusieurs petites machines permet de répartir le poids sur le toit, mais la régulation de la cascade s'avère plus complexe.
- Les PAC conçues pour des applications industrielles, qui présentent l'avantage d'être disponibles en grande puissance (> 50 kW), impliquant moins de machines, ce qui facilite la régulation de la cascade. Cependant, ces machines sont lourdes et dépassent les niveaux sonores acceptables dans le secteur résidentiel, nécessitant des travaux d'insonorisation spécifiques.

3) **Au niveau de la régulation :**

- Une régulation de type « Master/slave », pour laquelle le logiciel de régulation interne de la PAC, conçu par le fabricant, assure la gestion de la cascade à partir de la PAC « Master » pour toutes ses PAC « Slave » ;
- Un système « MCR », externe aux PAC, qui contrôle l'activation des différentes PAC du système. Il arrive que le système MCR puisse seulement commander l'activation des PAC, mais pas l'activation de leurs compresseurs.

4) **Le type de méthode gérant l'activation successive des PAC et/ou des compresseurs, qui peut se faire :**

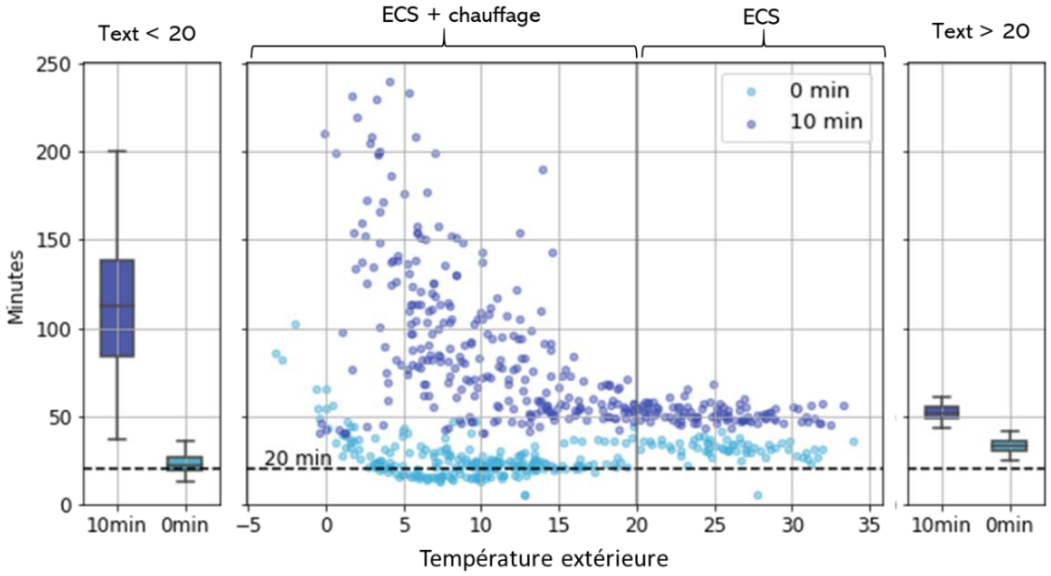
- Par temporisation, en fonction d'un intervalle de temps ;
- Par hystérésis, en fonction d'un écart de température entre la mesure et la consigne dans les ballons.

Retours d'expérience sur installations pilotes (Chapitre 2)

Les sites pilotes étudiés concernent 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.

Sur le premier site, le système de production est constitué de deux PAC air-eau de type industrielles et chaque PAC comporte 4 compresseurs « scroll ». Les principaux constats suite à un suivi de 2 ans sont les suivants :

- Bien que la régulation maître/esclave soit suffisante pour gérer la cascade de 2 PAC (y.c. leurs compresseurs), il s'est avéré que le fonctionnement 24h/24 de la pompe de circulation de la PAC esclave était nécessaire à la régulation. Cette pompe étant à débit fixe (exigence du fabricant), la consommation d'électricité qui en résultait était élevée et péjorait le COP du système. Cela a amené à utiliser le système MCR pour gérer l'activation des deux PAC, et la régulation interne de chaque PAC pour commander l'enclenchement de leurs compresseurs.
- En hiver, le nombre de cycles par jour et la durée des cycles sont plus sensibles au délai d'activation des compresseurs qu'en été. Avec un délai d'activation court de la cascade, la consigne est atteinte plus rapidement. En revanche, les cycles deviennent très courts et nombreux, ce qui risque d'endommager les compresseurs. A l'inverse, avec un délai d'activation long, la consigne est atteinte plus lentement et les cycles deviennent parfois très longs (> 120 min), avec un risque de péjorer le confort.
- En raison d'un faible volume de ballon en chauffage (lié à un manque d'espace dans la chaufferie) et de PAC surdimensionnées (à cause de l'incertitude sur l'évaluation de la demande), avec des délais d'activation faibles, les cycles ont tendance à être courts et nombreux.

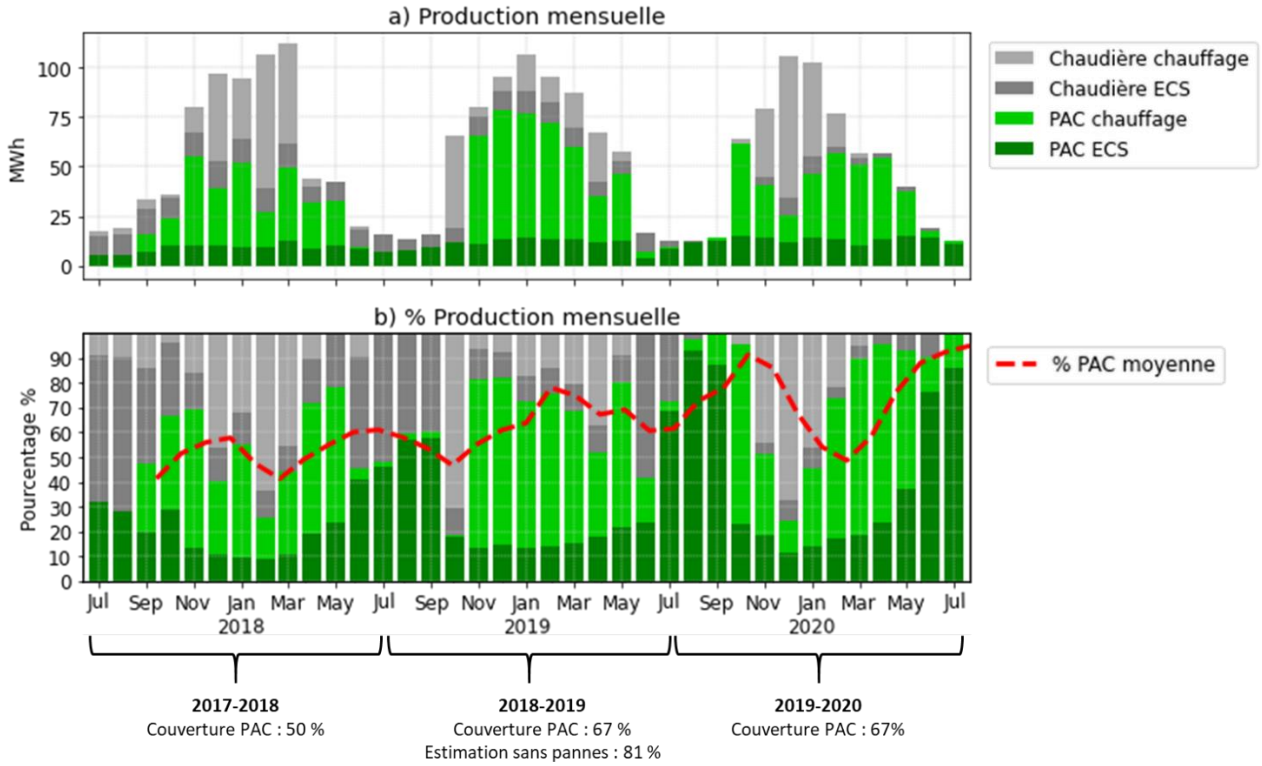


Durée moyenne des cycles, sur le premier site pilote, avec un délai entre l'activation des compresseurs de 0 et 10 minutes en fonction de la température extérieure (valeurs journalières)

Sur le second site, le système de production de chaleur est constitué de 6 PAC air-eau de type villa en bivalence avec la chaudière existante. Chaque PAC comporte 2 compresseurs « scroll ». Les principaux constats suite à un suivi de 3 ans sont les suivants :

- Ce site présente un niveau de complexité élevé en termes de régulation, puisqu'il a été nécessaire de combiner le fonctionnement de plus petites unités en cascade, avec l'ancienne chaudière existante.
- La régulation maître/esclave de ce modèle de PAC de villa n'est pas suffisante pour gérer la cascade de 6 PAC, et encore moins la bivalence avec une chaudière. Les machines manquent de certaines fonctionnalités adaptées à ce contexte, comme le pilotage de plus de trois PAC en cascade.

- En bivalence, si la cascade n'est pas bien gérée, la couverture PAC reste faible. En particulier, il s'agit de régler les niveaux de température entre les PAC et la chaudière, ainsi que la temporisation avant la libération de la chaudière.
- Durant les trois années de suivi, la couverture PAC mensuelle est passée de 40% à 80%, en raison d'ajustements au niveau du système hydraulique, ainsi qu'au niveau de la régulation de la cascade. Sur une base annuelle, la couverture PAC est passée de 50% à 67%, et on estime qu'elle pourrait atteindre environ 80% les années suivantes. Pour y arriver, un suivi minutieux sur 3 années de fonctionnement a été nécessaire.



Évolution de la production mensuelle de chaleur par les PAC et la chaudière à gaz du second site pilote, décomposée entre la production pour l'ECS et pour le chauffage

L'analyse détaillées de ces deux sites pilotes a permis de démontrer l'importance du réglage du délai entre l'activation des étages de puissance de la cascade pour : i) maintenir le confort des usagers sans péjorer la durée de vie de la PAC à cause de courts cycles, et ii) atteindre une couverture PAC élevée en cas de bivalence.

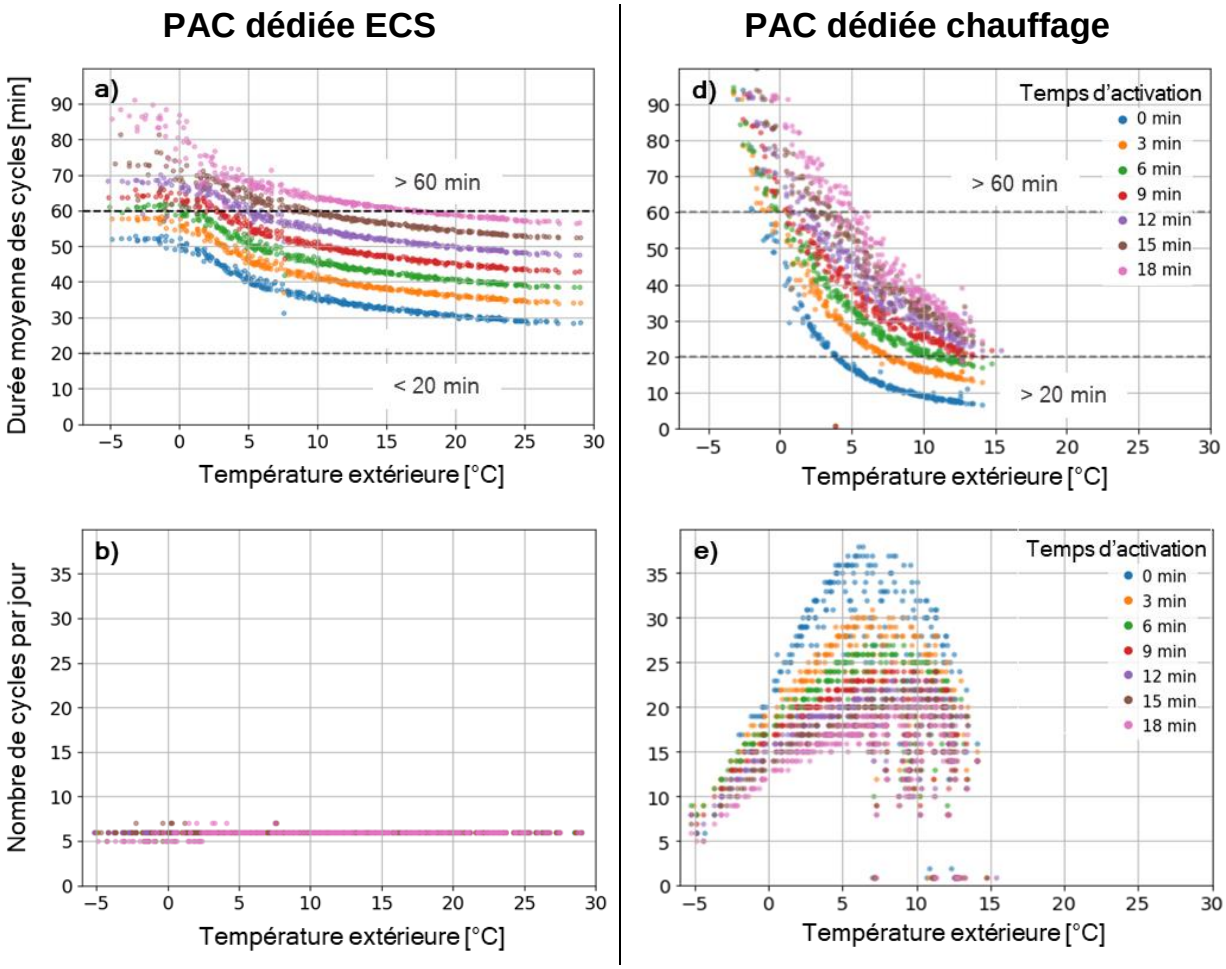
Modélisation des cascades (Chapitre 3)

Afin d'évaluer plus précisément l'impact du délai d'activation de la cascade et d'émettre des recommandations, des modèles numériques ont été mis en place à l'aide du logiciel TRNSYS. Ces modèles s'appuient sur celui réalisé dans le cadre du projet AirBiVal, qui a été calibré et validé à partir de mesures in-situ. La gestion en cascade des PAC a été reproduite pour activer successivement les étages de puissance avec une temporisation.

La gestion en cascade a été étudiée sur trois systèmes monovalents couramment installés lors du changement d'agent énergétique : i) PAC dédiée pour l'ECS, ii) PAC dédiée pour le chauffage et iii) PAC qui alterne entre la production d'ECS et de chauffage. Pour chaque système, le délai entre l'activation de chaque étage de puissance a été varié de 0 min (activation instantanée de tous les étages) à 18 min, par intervalle de 3 minutes (0 min, 3 min, 6 min, …, 18 min).

Des analyses de sensibilité ont été effectuées sur chaque système, portant sur des conditions fréquemment observées sur le terrain : i) des bâtiments avec des niveaux de demande différents, ii) un sous- ou surdimensionnement de la PAC, iii) un volume des ballons plus ou moins grand, et iv) un fonctionnement 24h/24 ou non de la boucle de recirculation d'ECS. Cette étude de sensibilité a montré les résultats suivants :

- Quelle que soit la configuration du système, les cycles et le confort varient de façon saisonnière, en raison de la dégradation de la capacité de la PAC et des variations de la demande par rapport à la température extérieure. De longs cycles accompagnés d'une diminution du confort sont présents au milieu de l'hiver en ECS et en chauffage. Ainsi, comme observé sur les retours d'expérience, le délai d'activation de la cascade devrait être fonction de la période de l'année en raison des effets saisonniers, du mode d'opération (chauffage/ECS) et des caractéristiques de l'installation (PAC dédiée, volume du ballon, puissance de la PAC, etc.).
- Il est important de pouvoir mesurer la demande de chaleur avant la mise en place de la PAC afin d'éviter : i) les surdimensionnements en chauffage, qui entraînent des surinvestissements et présentent davantage de risques de courts-cycles néfastes pour les machines ; ii) les sous-dimensionnements de PAC dédiée à l'ECS, qui rendent plus difficile le respect du confort et des normes anti-légionnelles.
- Que ce soit en chauffage ou en ECS, le volume du ballon a une influence importante pour éviter les courts-cycles de la PAC, limiter le nombre d'heures de fonctionnement et assurer le confort des usagers, en particulier en mode chauffage. Une taille de stockage suffisante procure également une certaine flexibilité sur le choix du délai d'activation de la cascade.



Variations saisonnières des systèmes de référence PAC – ECS (à gauche) et PAC – chauffage (à droite) : durée moyenne des cycles et nombre de cycles par jour, en fonction de la température extérieure pour différents temps d'activation des étages de puissance (valeurs journalières)

Recommandations (Chapitre 4)

Finalement, ce travail a abouti à une liste de recommandations relatives à la gestion des cascades, sur la base des retours d'expériences sur installations pilotes, des simulations numériques, ainsi que d'échanges avec des professionnels (chauffagistes, bureaux d'ingénieurs, installateurs).

De manière générale, de nombreux problèmes peuvent être évités avec une bonne communication entre les nombreux acteurs du projet (fournisseurs de PAC, ingénieurs, chauffagistes, etc.). Chaque corps de métier peut avoir une logique et une perception différente, ce qui peut facilement conduire à des malentendus. En avant-projet, la communication est notamment importante lors du choix du modèle de PAC, pour être au clair avec les fonctionnalités qu'il comporte. Pour la mise en service et le suivi du système, l'optimisation de la cascade de PAC requiert une coordination entre l'automaticien du système et le fournisseur de la PAC, en partie parce que certains paramètres ne sont modifiables que par le fournisseur.

Une première partie est destinée aux fabricants de PAC, afin de développer de nouveaux modèles adaptés aux contraintes du secteur résidentiel collectif. Les recommandations concernent notamment : i) l'ajout de flexibilité au délai d'activation de la cascade (par mode d'opération et selon la température extérieure) ; ii) les capacités de gestion de la cascade des PAC « master » (nombre de PAC « slaves » prisent en charge, gestion de la cascade en mode chauffage et ECS, etc.) ; iii) la prise en compte de l'état de fonctionnement des PAC (nombre de compresseurs activés, dégivrage, panne, etc.) ; iv) la libération de la chaudière en cas de bivalence.

La seconde partie regroupe des points de vigilance à l'intention des ingénieurs et des chauffagistes, dans le but de faciliter le dimensionnement et le réglage de tels systèmes. Il s'agit notamment : i) du choix du modèle de PAC et des solutions possibles en cas d'absence d'une fonctionnalité ; ii) du paramétrage du délai d'activation de la cascade ; iii) des réglages nécessaires en cas de bivalence ; iv) du dimensionnement de la PAC et des ballons tampons.

Synthese

Umfeld

Im vorliegenden Projekt wurde das Kaskadenmanagement von Luft-Wasser-Wärmepumpen im spezifischen Umfeld von bestehenden Mehrfamilienhäusern ohne Sanierung der Gebäudehülle untersucht. Die Erfahrungen aus den Pilotprojekten haben gezeigt, dass die Steuerung von Luft-Wasser-Wärmepumpen in Kaskaden, mit oder ohne zusätzlichem Heizkessel, im diesem Kontext ein heikler oder sogar problematischer Punkt ist.

Die Komplexität des Kaskadenmanagements liegt in: i) den derzeitigen Einschränkungen bei der Regelung der auf dem Markt erhältlichen Wärmepumpenmodelle und ii) der Wahl der Verzögerungs- oder Hysterese Parameter, die sich besonders auf die Lebensdauer der Maschinen und den Komfort der Nutzer auswirken.

Das Ziel dieses Projekts besteht darin, die Steuerung von Kaskaden von Luft-Wasser-Wärmepumpen im Umfeld bestehender Mehrfamilienhäusern zu analysieren, und zwar auf der Grundlage von Erfahrungsberichten aus Pilotanlagen und Sensibilitätsstudien (durch numerische Simulation). Ausgehend von den Ergebnissen werden Empfehlungen formuliert: i) für Hersteller, um in die Modelle der Luft-Wasser-Wärmepumpen ein vollständiges Kaskadenmanagement zu integrieren (ohne auf eine externe Regelung zurückgreifen zu müssen); ii) für Ingenieure, im Zusammenhang mit der Planung oder dem Betrieb solcher Systeme.

Integrationsmodi und Regulierungsmethoden für WP-Kaskaden (Chapitre 1)

Das Kaskadenmanagement in einem Luft-Wasser-Wärmepumpensystem kann als das zentral angeordnetes, aufeinanderfolgende Ein- und Ausschalten der Wärmepumpen bzw. ihrer verschiedenen Kompressoren definiert werden. Zu diesem Zweck ist es sinnvoll, zwischen den folgenden Konfigurationen zu unterscheiden:

1) Auf der Ebene des Integrationsmodus:

- Wärmepumpen, die sowohl die Heizung als auch das Warmwasser erzeugen und zwischen den beiden Betriebsarten wechseln (in der Regel mit Vorrang für das Warmwasser);
- Wärmepumpen, die für eine der Produktionsarten (Heizung oder Warmwasser) bestimmt sind, was mindestens eine WP-Einheit pro Betriebsart erfordert. Die erlaubt eine bessere Dimensionierung der Einheiten sowie eine Produktion in den zwei Betriebsarten gleichzeitig.

2) Auf der Ebene des Wärmepumpentyps:

- Speziell für Einfamilienhäuser ausgerichtete, seriell hergestellte Wärmepumpen, die auf einen tiefen Schallleistungspegel optimiert wurden. Damit sind ihre Schallemissionen besser vereinbar mit den Schallanforderungen in Wohngebieten. Durch die Kaskadierung wird die maximale Leistung mit der Anzahl Geräte multipliziert, die Schallemissionen erhöhen sich aber nicht gleich stark. Im Falle einer Dachaufstellung kann zudem das Gewicht besser verteilt werden. Der Nachteil ist das die Regelung der Kaskade ist komplexer.
- Für industrielle Anwendungen konzipierte Wärmepumpen haben den Vorteil, dass sie in großen Leistungsklassen (> 50 kW) erhältlich. Aus diesem Grund werden weniger Maschinen benötigt, was die Regelung der Kaskade vereinfacht. Diese Maschinen sind jedoch schwerer und überschreiten meistens den für Wohngebiete akzeptablen Schallpegel, sodass spezielle Schallschutzmaßnahmen erforderlich sind.

3) Auf der Ebene der Regulierung:

- Eine Regelung vom Typ "Master/Slave", bei dem die interne Regelungssoftware der Wärmepumpe, die vom Hersteller entwickelt wurde, die Kaskade von der "Master"-Wärmepumpe aus für alle ihre "Slave"-Wärmepumpen steuert;
- Ein "MSR"-System (zusätzliches Leitsystem), das die Aktivierung der Wärmepumpen von aussen ansteuert. Es kommt vor, dass das MSR-System nur die Aktivierung der WPs, aber nicht die Aktivierung ihrer Kompressoren steuern kann.

4) **Möglichkeiten um die sukzessive Aktivierung der WPs und/oder Kompressoren zu verwalten:**

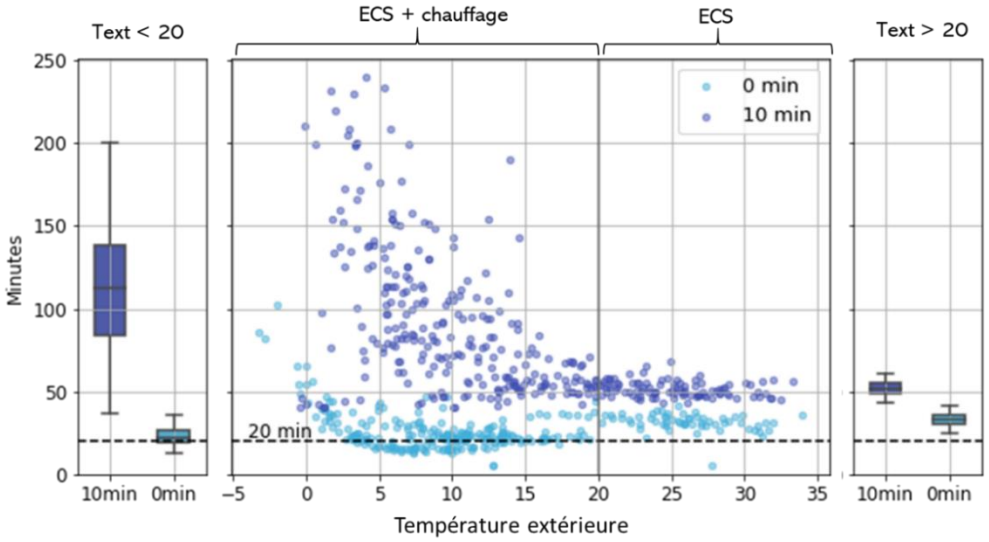
- Zeitgesteuert, in Abhängigkeit von einem Zeitintervall;
- Durch Hysterese, abhängig von einer Temperaturabweichung zwischen Messung und Sollwert in den Wasserspeicher.

Rückmeldungen aus Pilotanlagen (Chapitre 2)

Bei den untersuchten Pilotanlagen handelt es sich um zwei bestehende Mehrfamilienhäuser, deren fossile Wärmeerzeugungssystem teilweise (Hybridsystem) oder vollständig (monovalentes System) durch mehrere Luft/Wasser-Wärmepumpen ersetzt wurden. In beiden Fällen wurden weder die Gebäudehülle noch das Wärmeverteilungssystem renoviert.

Am ersten Standort besteht die Anlage aus zwei industriell hergestellten Luft-Wasser-Wärmepumpen und jede Wärmepumpe verfügt über vier Scroll-Kompressoren. Die wichtigsten Erkenntnisse nach einer zweijährigen Messkampagne sind die folgenden:

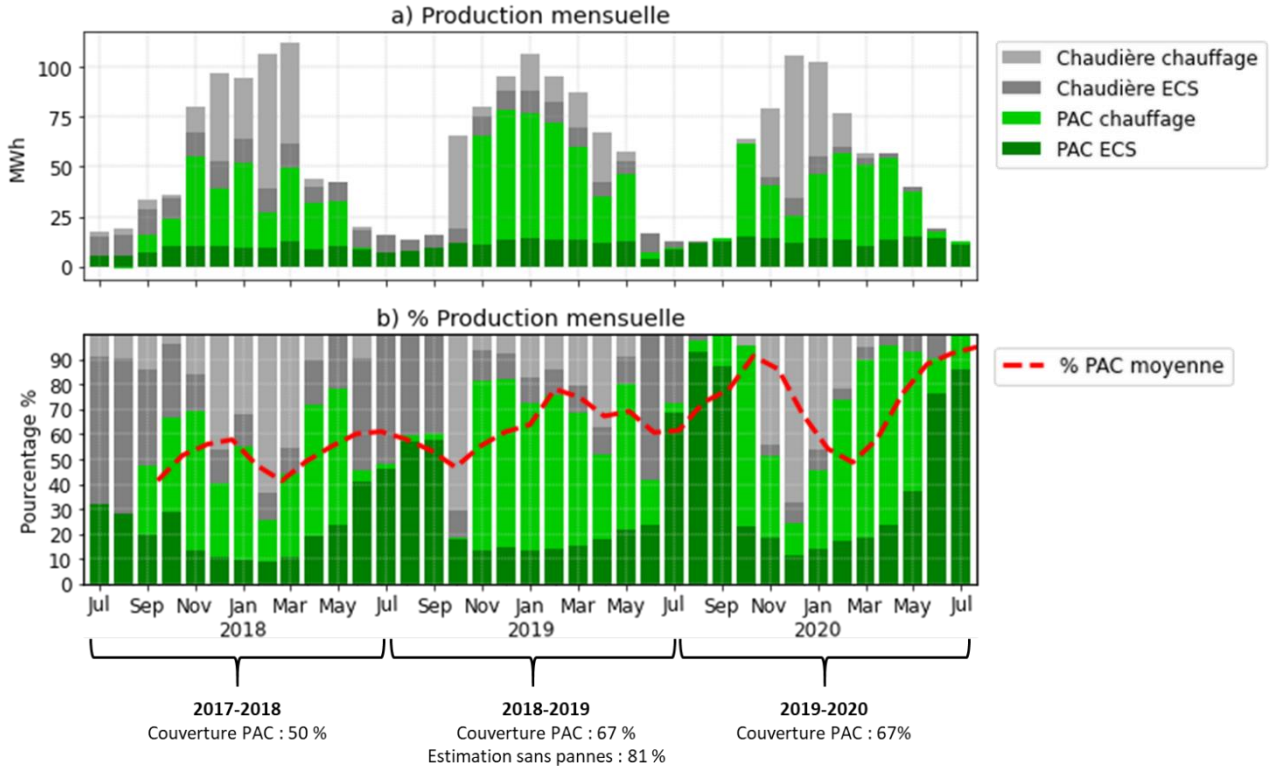
- Obwohl die Master/Slave-Regelung fähig ist, die Kaskade von 2 WP (einschließlich ihrer 4 Kompressoren) zu verwalten, hat sich gezeigt, dass ein 24-Stunden-Betrieb der Umwälzpumpe der Slave-WP für die Regelung erforderlich ist. Da diese Pumpe eine feste Fördermenge hat (Anforderung des Herstellers), war der daraus resultierende Stromverbrauch relativ hoch und verschlechterte den COP des Systems. Dies führte dazu, dass das MSR-System zu nutzen anstatt der vorhandenen Master/Slave-Regelung. Das MSR-System steuert nur die Aktivierung der beiden Wärmepumpen und die interne Regelung jeder Wärmepumpe Steuert die Ein- und Ausschaltung seiner Kompressoren.
- Die eingestellte Einschaltverzögerung der Kompressoren hat einen Einfluss auf die Anzahl und die Länge der Zyklen. Im Winter ist dieser Einfluss grösser als im Sommer. Bei einer kurzen Einschaltverzögerung der Kaskade wird der Sollwert schneller erreicht. Andererseits werden die Zyklen sehr kurz und zahlreich, was zu Schäden an den Kompressoren führen kann. Umgekehrt wird bei einer langen Aktivierungszeit der Sollwert langsamer erreicht und die Zyklen werden manchmal sehr lang (> 120 min), was die Lebensdauer der Wärmepumpe erhöht, jedoch zu einer Verschlechterung des Komforts führen kann.
- Aufgrund des geringen Speichervolumens im Heizbetrieb (aufgrund von Platzmangel im Heizraum) und der überdimensionierten Wärmepumpen (aufgrund der Unsicherheit bei der Bedarfsermittlung) sind die Zyklen bei kurzen Aktivierungszeiten tendenziell kurz und zahlreich.



Durchschnittliche Zyklusdauer, am ersten Pilotstandort, mit einer Verzögerung zwischen der Aktivierung der Kompressoren von 0 und 10 Minuten, abhängig von der Außentemperatur (Tageswerte).
«ECS» heisst BWW, Brauchwarmwasser, «Chauffage» heisst Heizung, «Text» heisst Aussentemperatur, «Minutes» heisst Minuten.

Am zweiten Standort besteht das Wärmeerzeugungssystem aus 6 Luft-Wasser-Wärmepumpen des Typs Villa in Bivalenz mit dem bestehenden Heizkessel. Jede WP verfügt über 2 "Scroll"-Kompressoren. Die wichtigsten Erkenntnisse nach einer dreijährigen Messkampagne sind folgende:

- Dieser Standort weist einen hohen Grad an Regelungskomplexität auf, da es notwendig war, den Betrieb kleinerer Einheiten in Kaskadenschaltung mit dem alten, bestehenden Kessel einzustimmen.
- Die Master/Slave-Regelung dieser WP-Modelle ist nicht ausreichend, um die Kaskade von 6 WPs zu verwalten, geschweige die Bivalenz mit einem Heizkessel. Den Maschinen fehlen einige Funktionen, die für dieses Umfeld geeignet sind, wie die Steuerung von mehr als drei WP in einer Kaskade.
- Wenn bei der Bivalenz die Kaskade nicht gut verwaltet wird, bleibt die Abdeckung durch WP gering. Insbesondere müssen die Temperaturniveaus zwischen den Wärmepumpen und dem Kessel sowie die Zeitverzögerung vor der Freigabe des Kessels gut eingestellt werden.
- Während den drei Jahren des Monitorings stieg die monatliche WP-Deckung von 40% auf 80%, was auf die Anpassungen des Hydrauliksystems und der Kaskadenregelung zurückzuführen ist. Auf Jahresbasis stieg die Abdeckung mit Wärmepumpen von 50% auf 67%, und es wird geschätzt, dass sie in den folgenden Jahren auf etwa 80% steigen könnte. Um dies zu erreichen, war eine sorgfältige Überwachung über drei Betriebsjahre hinweg erforderlich.



Entwicklung der monatlichen Wärmeerzeugung durch die Wärmepumpen und den Gaskessel am zweiten Pilotstandort, aufgeschlüsselt nach der Erzeugung für Warmwasser und Heizung.
Chaudière chauffage: Kessel Heizung, Chaudière ESC: Kessel BWW, PAC chauffage: WP Heizung, PAC ECS: WP BWW, Couverture: Deckung, % Pac moyenne: Durchschnitt WP-Anteil in %

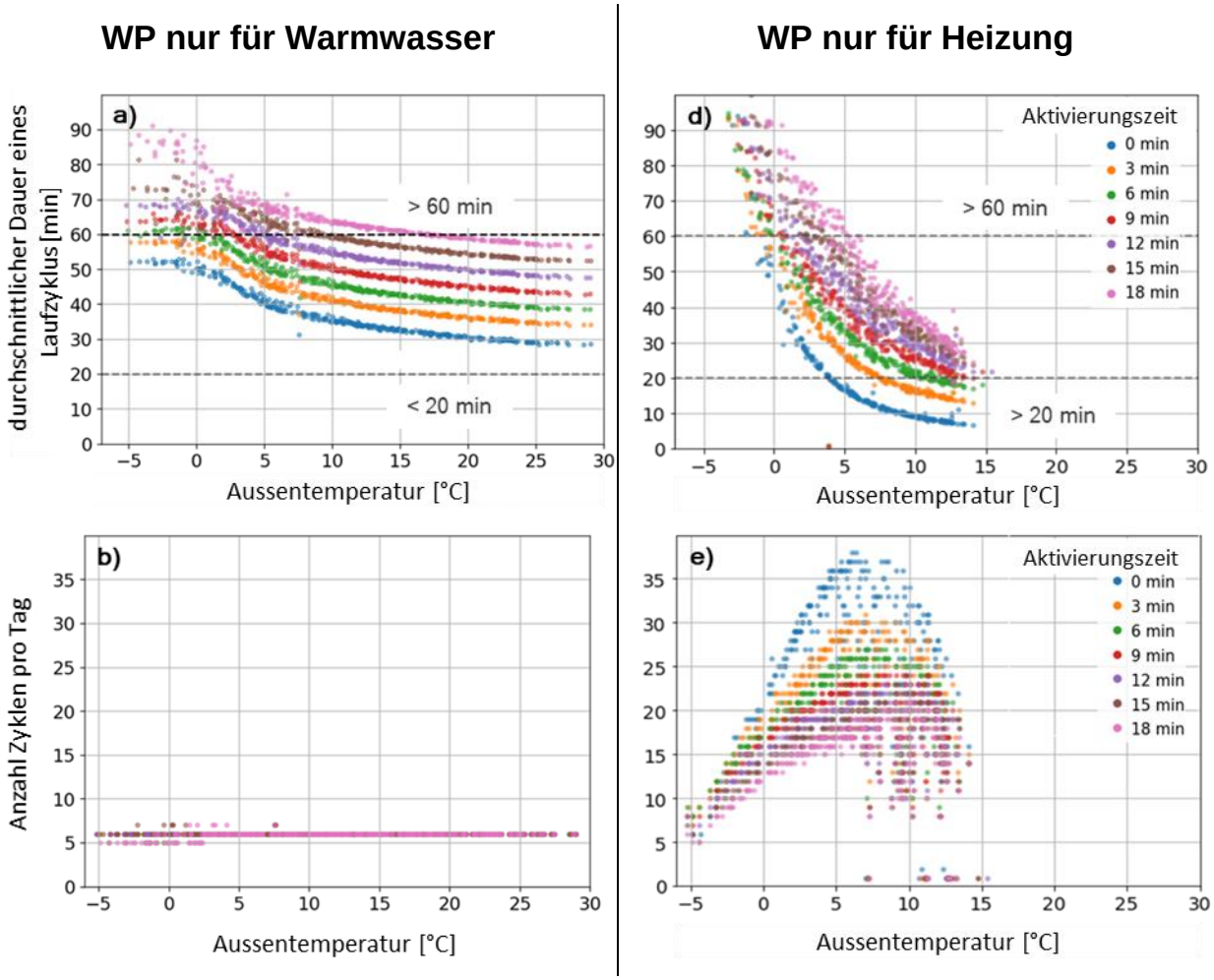
Die detaillierte Analyse dieser beiden Pilotanlagen hat gezeigt, wie wichtig die Einstellung der Verzögerung zwischen der Aktivierung der Leistungsstufen der Kaskade ist, um i) den Komfort der Nutzer aufrechtzuerhalten, ohne die Lebensdauer der WP durch kurze Zyklen zu beeinträchtigen, und ii) eine hohe WP-Abdeckung im Fall von Bivalenz zu erreichen.

Modellierung von Kaskaden (Chapitre 3)

Um die Auswirkungen der Verzögerung der Kaskadenaktivierung genauer zu bewerten und Empfehlungen auszusprechen, wurden mithilfe der Software TRNSYS numerische Modelle erstellt. Diese Modelle basieren

auf dem im Rahmen des AirBiVal-Projekts erstellten Modell, das anhand von In-situ-Messungen kalibriert und validiert wurde. Das Kaskadenmanagement der WP wurde nachgebildet, um die Leistungsstufen nacheinander mit einer Zeitverzögerung zu aktivieren.

Das Kaskadenmanagement wurde für drei monovalente Systeme untersucht, die üblicherweise beim Wechsel des Energieträgers installiert werden: i) dedizierte WP für die Warmwasserbereitung, ii) dedizierte WP für die Heizung und iii) WP, die zwischen der Warmwasserbereitung und der Heizung wechselt. Für jedes System wurde die Zeit zwischen der Aktivierung jeder Leistungsstufe von 0 min (sofortige Aktivierung aller Stufen) bis 18 min in 3-Minuten-Intervallen (0 min, 3 min, 6 min, ..., 18 min) variiert.



Saisonale Schwankungen der Referenzsysteme WP - Warmwasser (links) und WP - Heizung (rechts): durchschnittliche Zyklusdauer und Anzahl der Zyklen pro Tag, in Abhängigkeit von der Außentemperatur für verschiedene Aktivierungszeiten der Leistungsstufen (Tageswerte)

Für jedes System wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, die sich auf häufig vor Ort beobachtete Bedingungen bezogen: i) Gebäude mit unterschiedlichen Bedarfsniveaus, ii) Unter- oder Überdimensionierung der WP, iii) mehr oder weniger große Speichervolumina und iv) 24-Stunden-Betrieb oder Nicht-Betrieb der Warmwasserumwälzschleife. Diese Sensitivitätsstudie ergab folgende Ergebnisse:

- Unabhängig von der Systemkonfiguration variieren die Zyklen und der Komfort saisonal, was auf die Verschlechterung der WP-Kapazität und die Schwankungen der Nachfrage im Verhältnis zur Außentemperatur zurückzuführen ist. Während des Winters werden lange Zyklen mit vermindertem Komfort für die Warmwasseraufbereitung und Heizung zu beobachtet. Wie in den Erfahrungsberichten beobachtet, sollte die Zeit bis zur Aktivierung der Kaskade aufgrund der jahreszeitlichen Effekte, der Betriebsart (Heizen/Warmwasser) und der Anlagenmerkmale (dedizierte WP, Speichervolumen, WP-Leistung usw.) von der Jahreszeit abhängig sein.
- Es ist wichtig, den Wärmebedarf vor der Installation der WP messen zu können, um Folgendes zu vermeiden: i) Überdimensionierungen für den Heizmodus, die zu Überinvestitionen führen und ein

höheres Risiko für maschinenschädliche Kurzzyklen bergen; ii) Unterdimensionierungen von dedizierten WP für das WWS, die die Einhaltung des Komforts und der Anti-Legionellen-Normen erschweren.

- Sowohl beim Heizen als auch beim Warmwasser hat das Speichervolumen einen wichtigen Einfluss auf die Vermeidung von Kurzzyklen der Wärmepumpe, die Begrenzung der Betriebsstunden und die Gewährleistung des Komforts für die Nutzer, insbesondere im Heizbetrieb. Eine ausreichende Speichergröße ermöglicht auch eine gewisse Flexibilität bei der Wahl der Aktivierungszeit der Kaskade.

Empfehlungen (Chapitre 4)

Schließlich führte diese Arbeit zu einer Liste von Empfehlungen für das Kaskadenmanagement, die auf Erfahrungsberichten von Pilotanlagen, numerischen Simulationen und dem Austausch mit Fachleuten (Heizungsbauern, Ingenieurbüros, Installateuren) basieren.

Generell können viele Probleme durch eine gute Kommunikation zwischen den zahlreichen Projektbeteiligten (WP-Lieferanten, Ingenieure, Heizungsbauer usw.) vermieden werden. Jede Berufsgruppe kann eine andere Logik und Wahrnehmung haben, was leicht zu Missverständnissen führen kann. Im Vorprojekt ist die Kommunikation insbesondere bei der Wahl des WP-Modells wichtig, um sich über die darin mitgelieferten Funktionen im Klaren zu sein. Bei der Inbetriebnahme und Überwachung des Systems erfordert die Optimierung der WP-Kaskade eine Koordination zwischen dem Systemautomatisierer und dem WP-Lieferanten, unter anderem weil einige Parameter nur vom Lieferanten geändert werden können.

Ein erster Teil richtet sich an die Hersteller von Wärmepumpen, um neue Modelle zu entwickeln, die an die Einschränkungen des kollektiven Wohnsektors angepasst sind. Die Empfehlungen betreffen insbesondere: i) die Flexibilisierung der Kaskadenaktivierungszeit (je nach Betriebsart und Außentemperatur); ii) die Kaskadenmanagementfähigkeiten der Master-Wärmepumpen (Anzahl der unterstützten "slawischen" Wärmepumpen, Kaskadenmanagement im Heiz- und Warmwassermodus usw.); iii) die Berücksichtigung des Betriebszustands der Wärmepumpen (Anzahl der aktivierten Verdichter, Abtauung, Ausfall usw.); iv) die Freigabe des Kessels im Falle einer Bivalenz.

Der zweite Teil enthält Hinweise für Ingenieure und Heizungsfachleute, um die Dimensionierung und Einstellung solcher Systeme zu erleichtern. Dazu gehören: i) die Wahl des WP-Modells und mögliche Lösungen für den Fall, dass eine Funktion fehlt; ii) die Parametrierung der Kaskadenaktivierungszeit; iii) die notwendigen Einstellungen bei Bivalenz; iv) die Dimensionierung der WP und der Pufferspeicher.

Executive summary

Context

This project concerns the control of air-to-water heat pumps (HP) interconnected in a cascade in the specific context of existing multi-family buildings, without a full renovation of the building. The monitoring of pilot projects has shown that the control of air-to-water HP cascades, with or without backup boiler, is a delicate, even problematic point in this context.

The complexity of controlling HP cascades lies in: i) the current limitations in terms of control of HP models available on the market, and ii) the choice of time delay or hysteresis parameters which in particular affect the HP lifespan and user comfort.

The objective of this project is to analyze the control of air-to-water HP cascades in the context of existing multi-family buildings, based on feedback from pilot sites and sensitivity analyses (by numerical simulation). Based on the results, recommendations are formulated: i) for manufacturers, to integrate a complete cascade management system into air-to-water HP models (without resorting to an external control system); ii) for engineers, to design and operate such systems.

Integration and control strategies for HP cascades (Chapitre 1)

The control of cascades in an air-to-water HP system can be defined as the successive switching on and off of heat pumps and their various compressors, carried out centrally. For this purpose, it is useful to distinguish between the following configurations:

1) HP integration:

- Heat pumps producing heat for space heating (SH) and domestic hot water (DHW), alternating between the two modes (generally giving priority to DHW);
- Heat pumps dedicated to one of the production modes (SH or DHW), which requires at least one HP unit per mode, but allows better sizing of the units, as well as parallel production in one and the other mode.

2) HP type:

- Heat pumps designed for single-family houses, developed to operate at noise levels compatible with residential areas, but generally of low capacity. Splitting the installed HP capacity into several small units allows to distribute the weight on the roof, but the control of the HP cascade is more complex.
- Heat pumps designed for industrial applications, which have the advantage of being available in high capacities (> 50 kW), requiring fewer machines and thus facilitating the control of the HP cascade. However, these machines are heavy and exceed acceptable noise levels in residential areas, requiring specific soundproofing.

3) Control device:

- A "Master/slave" type control, where the internal software of the HP (designed by the manufacturer) ensures the control of the cascade from the "Master" HP for all its "Slave" HP;
- A Building Automation System (BAS), external to the HP, which controls the activation of the various HP in the system. Sometimes, the BAS system can only control the activation of the HPs, but not the activation of their compressors.

4) The control method for the successive activation of the HP and/or the compressors:

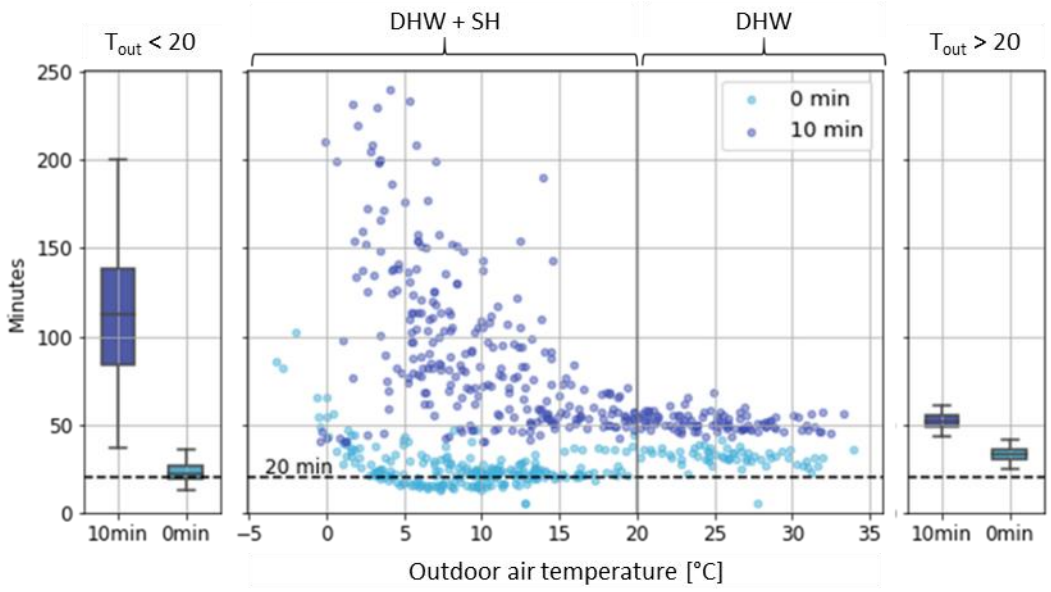
- A time delay, according to a time interval;
- A hysteresis, according to a temperature difference between measurement and setpoint in the buffer tanks.

Feedback from pilot projects (Chapitre 2)

The pilot sites studied are two existing multi-family residential buildings, where the fossil-fuel heat production system has been partially (hybrid system) or completely (monovalent system) replaced by air-to-water heat pumps. In both cases, the building envelope and heat distribution systems were not renovated.

On the first site, the production system consists of 2 large industrial air-to-water HPs, each with 4 scroll compressors. The main findings after two years of monitoring are as follows:

- Although the master/slave control is sufficient to manage the cascade of 2 HP (including their compressors), it turned out that the 24-hour operation of the circulating pump of the slave HP was necessary for the control. Since this pump is a fixed flow rate pump (manufacturer's requirement), the resulting electricity consumption was high and reduced the COP of the system. This led to the use of the BAS system to manage the activation of the two heat pumps, and the internal software of each heat pump to control the activation of its compressors.
- In winter, the daily number of cycles and the cycle duration are more sensitive to the time delay between the activation of the compressors than in summer. With a short time delay, the setpoint is reached more quickly. However, the cycles become very short and numerous, which can damage the compressors. On the other hand, with a long time delay, the setpoint is reached more slowly and the cycles are sometimes very long (> 120 min), with a risk of deteriorating comfort.
- Due to the small volume of the buffer tank for space heating (caused by the lack of space in the boiler room) and the oversized heat pumps (caused by the uncertainty of the heat demand estimation), the cycles tend to be short and numerous when the time delay is short.

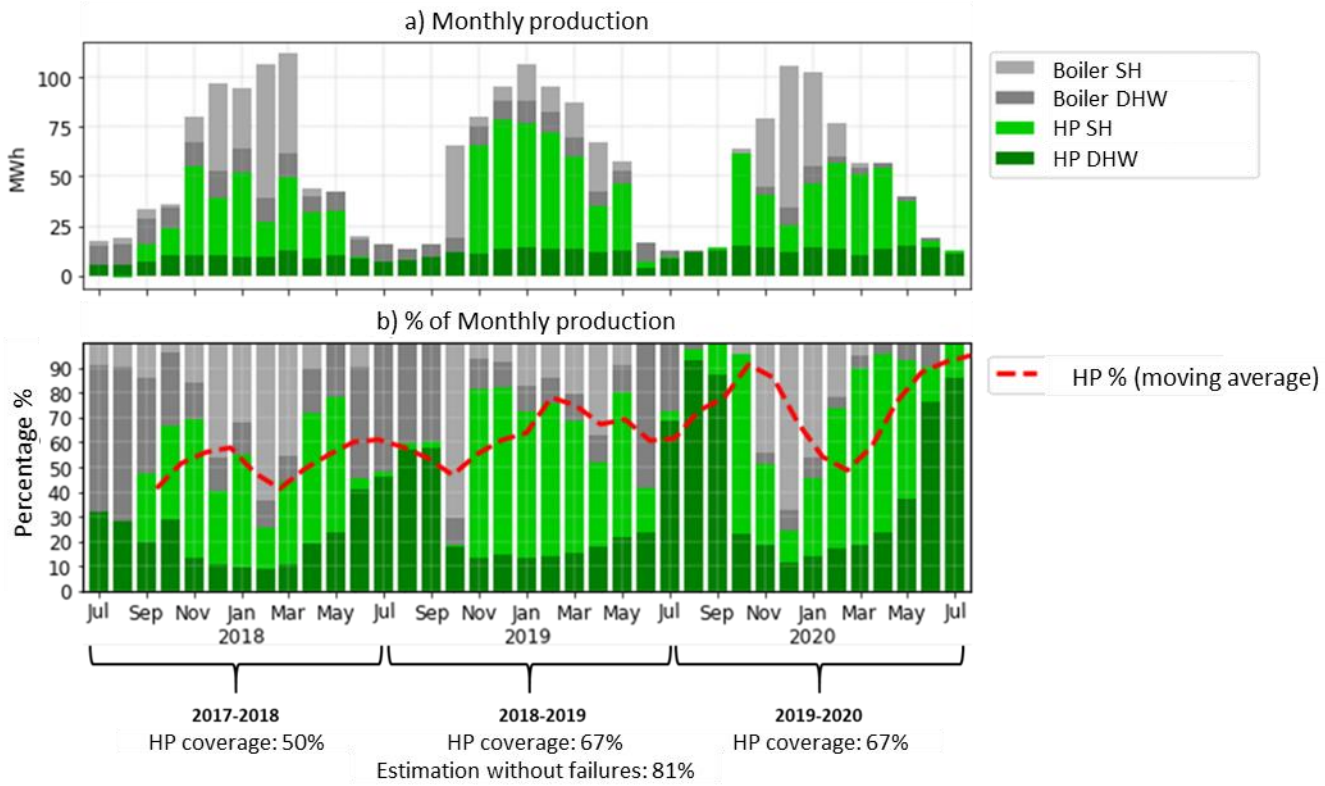


Average cycle duration for the first pilot site, with a 0 and 10 minute delay between each compressor activation as a function of the outdoor air temperature (daily values)

On the second site, the heat production system consists of 6 air-to-water HPs designed for single-family houses, operating in parallel with the existing boiler. Each HP has 2 scroll compressors. The main findings after three years of monitoring are as follows:

- This site has a high level of complexity in terms of control, due to the need to coordinate the operation of smaller HP units in cascade with the old existing boiler.
- The master/slave control of this HP model, designed for single-family houses, is not sufficient to manage the cascade of 6 HPs, let alone in parallel with a boiler. The HP units lack certain functions adapted to this context, such as the control of more than three HPs in cascade.
- In a hybrid system, if the cascade is not well managed, the HP coverage remains low. In particular, it is necessary to adjust the temperature levels between the HP and the boiler, as well as the time delay before the boiler is released.

- Over the three years of monitoring, the monthly HP coverage increased from 40% to 80%, due to adjustments in the hydraulic system and cascade control. On an annual basis, the HP coverage increased from 50% to 67%, and we estimate that it could reach approximately 80% in subsequent years. To achieve this, it was necessary to closely monitor the system over three years of operation.



Evolution of the monthly heat production of the heat pumps and the gas boiler of the second pilot site, broken down into production for DHW and space heating

The detailed analysis of these two pilot sites has demonstrated the importance of adjusting the time delay between the activation of the heating stages in order to: i) maintain user comfort without compromising the lifespan of the heat pumps due to short cycling, and ii) achieve a high heat pump coverage in hybrid systems.

Modeling of HP cascades (Chapitre 3)

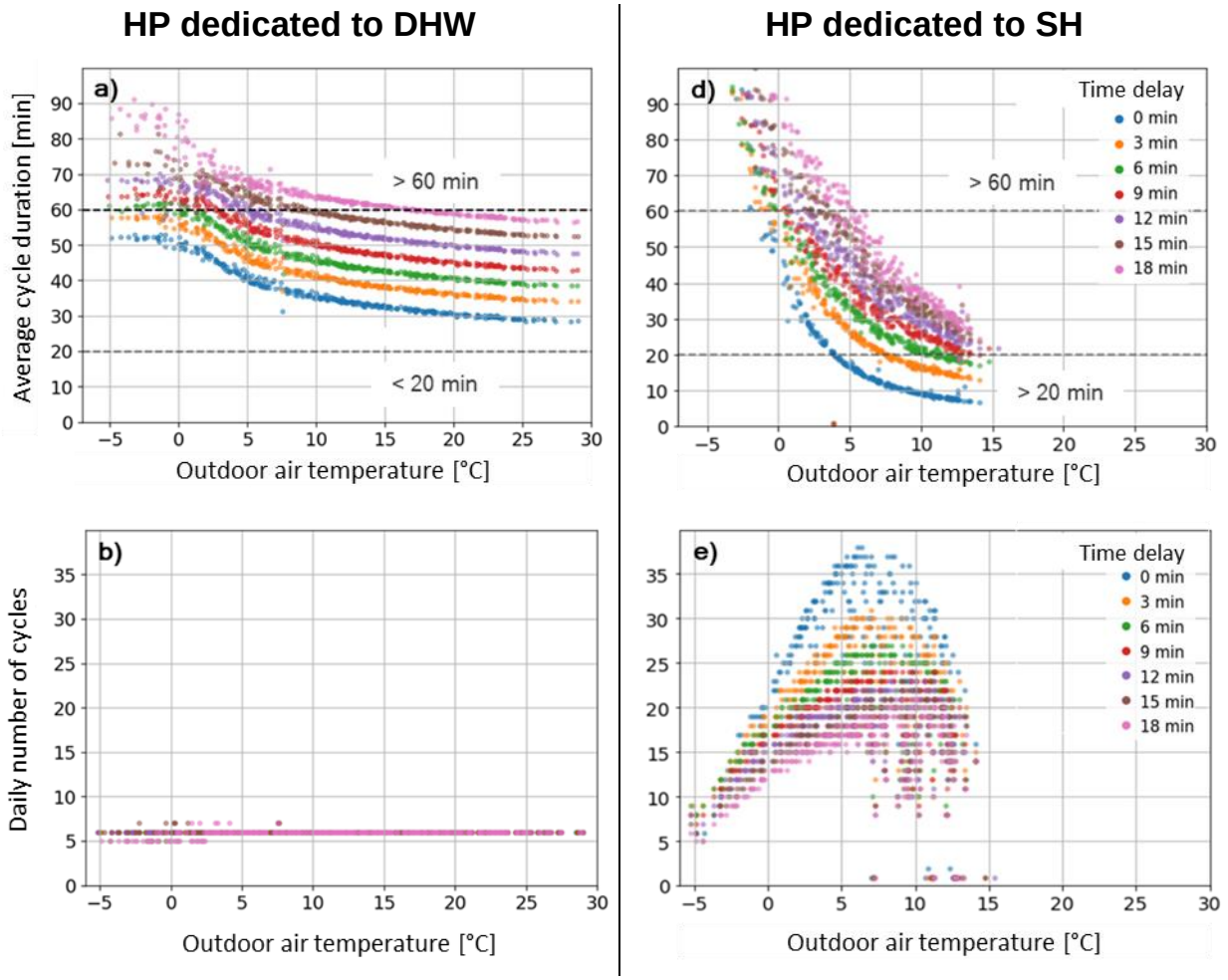
In order to evaluate more precisely the impact of the cascade time delay between the activation of each heating stage and to make recommendations, numerical models have been developed using the TRNSYS software. These models are based on the one developed in the AirBiVal project, which has been calibrated and validated with in-situ measurements. The control of the HP cascade has been reproduced in order to activate the heating stages successively based on a time delay.

The cascade control is studied on three monovalent HP systems commonly installed when replacing fossil-fuel boilers: i) HP dedicated to DHW, ii) HP dedicated to SH and iii) HP alternating between DHW and SH production. For each system, the time delay between the activation of each heating stage varies from 0 min (instantaneous activation of all stages) to 18 min, by 3-minute intervals (0 min, 3 min, 6 min, ..., 18 min).

A sensitivity analysis is performed on each system, covering conditions frequently observed in the field: i) buildings with different heat demands, ii) under- or oversized HP, iii) larger or smaller buffer tank, and iv) 24-hour operation of the DHW recirculation loop or scheduled operation. The results of this sensitivity analysis are as follows:

- Regardless of the system configuration, cycles and comfort vary seasonally due to fluctuations in HP capacity and heat demand relative to outdoor temperature. Long cycles associated with a decrease in comfort are prevalent in the mid-winter in DHW and SH. Therefore, as observed in the pilot sites, the time delay of the HP cascade should vary according to the time of year (due to seasonal effects), the operation mode (SH / DHW) and the characteristics of the installation (dedicated HP, volume of the buffer tank, HP capacity, etc.).

- It is important to be able to measure the heat demand before installing the HP in order to avoid: i) oversizing in SH, which leads to overinvestment and increased risk of short cycling harmful to the units; ii) undersizing of the HP dedicated to DHW, which makes it more difficult to meet comfort and anti-legionella standards.
- Whether for SH or DHW, the volume of the buffer tank has an important influence in avoiding short cycling of the HP, limiting the number of hours of operation and ensuring user comfort, especially in SH mode. Sufficient tank size also provides flexibility in the choice of cascade time delay.



Seasonal variations of the reference systems HP - DHW (left) and HP - SH (right): average cycle duration and number of cycles, as a function of outdoor temperature for different time delays between activation of heating stages (daily values)

Recommendations (Chapitre 4)

Finally, this work resulted in a list of recommendations for the control of HP cascades, based on feedback from pilot sites, numerical simulations, as well as discussions with professionals (heating technicians, engineering firms, HP installers).

In general, many problems can be avoided with a good communication between the many actors of the project (HP suppliers, engineers, heating technicians, etc.). Each profession may have a different logic and perception, which can easily lead to misunderstandings. In the pre-project phase, communication is particularly important when choosing the HP model in order to be clear about its functionalities. During commissioning and monitoring of the system, the optimization of the HP cascade requires coordination between the system automation expert and the HP supplier, partly because some parameters can only be modified by the HP supplier.

The first part is addressed to HP manufacturers to develop new models adapted to the constraints of multi-family buildings. The recommendations concern in particular: i) the addition of flexibility to the cascade time delay (by operating mode and according to the outdoor temperature); ii) the ability of master heat pumps to

control the cascade (number of "slave" HPs supported, cascade management in SH and DHW mode, etc.); iii) the consideration of the operating status of the HP (number of compressors activated, defrosting, failure, etc.); iv) the activation of the boiler in hybrid systems.

The second part lists recommendations and critical points for engineers and heating technicians to facilitate the sizing and optimization of such systems. These include: i) the choice of the HP model and possible solutions in case of missing functionality; ii) the choice of the cascade time delay; iii) the necessary adjustments in case of hybrid systems; iv) the sizing of the HP and buffer tanks.

Contenu

Résumé **3**

Zusammenfassung **3**

Abstract **3**

Synthèse **5**

Synthese **10**

Executive summary **15**

Introduction **22**

Objectifs et structure du projet **22**

Chapitre 1 Modes d'intégration et méthodes de régulation des cascades de PAC dans les bâtiments résidentiels collectifs **24**

1.1 Intégration des PAC dans les bâtiments résidentiels collectif existants 24

1.2 Gestion de la cascade de PAC 25

1.3 Conclusion 28

Chapitre 2 Retours d'expérience sur installations pilotes **29**

2.1 Sites pilotes 29

2.2 St-Julien : système PAC monovalent 30

2.3 Daru : système PAC bivalent 38

2.4 Conclusions des retours d'expérience 46

Chapitre 3 Modélisation des cascades **48**

3.1 Description du modèle 48

3.2 Indicateurs 50

3.3 Systèmes de référence 51

3.4 Résultats des systèmes de référence 54

3.5 Etude de sensibilité 59

3.6 Conclusions de la modélisation 67

Chapitre 4 Recommandations **69**

4.1 Recommandations et remarques pour les fabricants 69

4.2 Recommandations pour les ingénieurs 71

Conclusions et perspectives **74**

Bibliographie **77**

Annexes **78**

Annexe A. Dimensionnement des PAC et des ballons du site pilote « St-Julien » 78
Annexe B. Performance de la PAC du site pilote de St-Julien en fonction de la température extérieure selon les données du fabricant 79
Annexe C. Courbes de chauffe programmées dans la simulation 79
Annexe D. Assemblages des modèles TRNSYS 80
Annexe E. Jours typiques de la charge et décharge du ballon 81
Annexe F. Résultats journaliers sur système de référence PAC combinée chauffage & ECS 82
Annexe G. Résultats de l'étude de sensibilité PAC dédiée 83
Annexe H. Résultats de l'étude de sensibilité PAC combinée chauffage & ECS 87
Annexe I. Liste de problèmes rencontrés sur les sites pilotes 89

Introduction

Genève met actuellement en place un programme de changement massif d'agent énergétique pour l'approvisionnement de chaleur, en particulier pour les bâtiments résidentiels collectifs existants. Ce programme est co-construit avec les associations faîtières de l'industrie du bâtiment et des propriétaires de bâtiments. L'objectif pour les 15 à 20 prochaines années est de réaliser 25'000 opérations de changement de combustible (1.6 GW), avec des économies de CO_2 de 580'000 t/an (dont 30% dans les bâtiments résidentiels collectifs).

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 apparait que les pompes à chaleur sur l'air constituent le potentiel le plus important pour la réduction des émissions de CO_2 en zone urbaine.

Dans ce contexte, les Services Industriels de Genève (SIG) ont développé une série de projets pilotes où le système de chauffage fossile a été remplacé partiellement (système bivalent) ou entièrement (système monovalent) par des PAC air-eau dans des bâtiments résidentiels existants non rénovés. Ces projets, qui sont développés dans le cadre du portefeuille éco21 des SIG, ont fait l'objet de campagnes de mesure détaillées, couvrant trois années d'exploitation. Les contraintes et performances en conditions réelles de ce type de systèmes ont été exposées dans le cadre du projet AirBiVal [1] sous la forme d'un retour d'expérience.

Les expériences rencontrées lors du suivi de sites pilotes ont démontré que la gestion de pompes à chaleur air-eau en cascade dans les bâtiments existants, avec ou sans chaudière d'appoint, constitue un point délicat, voire problématique. Autant les pompes à chaleur sont bien optimisées individuellement, autant un ensemble de pompes à chaleur ne fait pas l'objet d'une optimisation globale chez les fournisseurs que nous avons contactés, choisis parmi les leaders établis du marché.

Objectifs et structure du projet

L'objectif de ce projet est d'analyser la gestion des cascades de PAC air-eau dans le contexte de bâtiments résidentiels collectifs existants, à partir de retours d'expérience de sites pilotes et d'études de sensibilité (par simulation numérique). La complexité réside dans les limitations actuelles en termes de régulation des modèles de PAC disponibles sur le marché, ainsi que dans le choix des paramètres de régulation de la cascade qui influent notamment sur la durée de vie des machines et sur le confort des usagers. Dans les gammes de puissance considérées, il n'y a pas de machines à variation de puissance continue. Celles-ci ne sont donc pas étudiées dans ce projet.

Le Chapitre 1 consiste à donner une description des différents modes d'intégration des PAC air-eau dans les bâtiments résidentiels collectifs, ainsi que la présentation des principales méthodes de gestion des cascades de PAC. Le but est d'introduire les principales situations qui sont abordées tout au long de ce rapport et de définir les termes techniques qui leur sont associés.

Le Chapitre 2 se focalise sur le retour d'expérience sur la gestion en cascade des pompes à chaleur air-eau, en situation d'usage réel, de deux projets pilotes. Le but est d'identifier les problèmes rencontrés, de partager les solutions mises en place et d'émettre des recommandations pour faciliter l'implémentation des PAC air-eau dans les bâtiments résidentiels collectifs.

Dans le Chapitre 3, nous analysons la gestion en cascade par le biais de simulations numériques, selon le mode d'opération (chauffage/ECS) et les caractéristiques de l'installation (volume du ballon, puissance de la PAC, etc.). Des analyses de sensibilité portent sur des conditions fréquemment observées sur le terrain : i) des bâtiments avec des niveaux de demande différents, ii) un sous- ou surdimensionnement de la PAC, iii) un volume des ballons plus ou moins grand. Les résultats permettront d'émettre des recommandations ou points d'avertissement dans le but de respecter le confort des usagers sans péjorer la durée de vie de la PAC.

Finalement, dans le Chapitre 4, nous formulons des recommandations : i) à l'intention des fabricants, pour l'intégration dans les modèles de PAC air-eau d'une gestion complète des cascades (sans avoir à recourir

à une régulation externe) ; ii) à l’intention des ingénieurs, en lien avec la planification ou l’exploitation de tels systèmes.

Chapitre 1
Modes d'intégration et méthodes de régulation des cascades de PAC dans les bâtiments résidentiels collectifs

Ce chapitre se concentre sur la description des différents modes d'intégration des PAC air-eau dans les bâtiments résidentiels collectifs, ainsi que la présentation des principales méthodes de gestion des cascades de PAC. Le but est d'introduire les situations qui sont abordées tout au long de ce rapport et de définir les termes techniques qui leur sont associés. On s'intéresse tout d'abord aux modes d'intégration des PAC, à leurs modes de fonctionnement, ainsi qu'au type de PAC utilisées dans le secteur résidentiel collectif. L'attention est ensuite portée sur les principales méthodes de gestion des cascades de PAC.

1.1 Intégration des PAC dans les bâtiments résidentiels collectif existants

1.1.1 Modes d'intégration et modes de fonctionnement

Il existe deux principaux modes d'intégration des PAC air-eau [2] :

– **Système monovalent :** la ou les PAC air-eau assurent l'intégralité de la production de chaleur pour le chauffage et l'ECS.

– **Système bivalent :** la ou les PAC air-eau n'assurent qu'une partie de la production de chaleur et un autre générateur de chaleur, par exemple une chaudière, réalise l'appoint.

Que le système soit monovalent ou bivalent, les PAC peuvent soit être dédiées à un mode de fonctionnement (chauffage ou ECS), soit produire de la chaleur alternativement pour le chauffage et l'ECS, en général en donnant la priorité à la production d'ECS. On distingue donc deux configurations principales :

– **PAC combinée pour le chauffage et l'ECS :** Les PAC alternent entre les deux modes de fonctionnement (chauffage/ECS), en général en donnant la priorité à la production d'ECS. Il n'y a donc pas de production simultanée pour le chauffage et l'ECS. Ce type de système présente l'avantage de limiter la puissance totale à installer, ce qui peut être avantageux en cas de manque de place en chaufferie.

– **PAC dédiée au chauffage ou à l'ECS :** Les PAC sont dédiées à l'une ou l'autre des productions (chauffage ou ECS) et n'opèrent ainsi que dans un mode de fonctionnement. Ce type de système présente notamment l'avantage de pouvoir : i) adapter la puissance aux demandes respectives ; ii) utiliser des réfrigérants adaptés au niveau de température de chaque mode de fonctionnement, afin d'obtenir des COP plus élevés. La production de chaleur pour le chauffage et pour l'ECS étant alors indépendantes l'une de l'autre, la régulation et l'hydraulique du système est moins complexe que dans le cas où les PAC alternent entre les deux modes de fonctionnement.

1.1.2 Types de PAC

Une fois que le mode d'intégration et de fonctionnement sont définis, et que la puissance requise pour répondre aux besoins de chaleur est déterminée, il s'agit de sélectionner le modèle et le nombre de PAC permettant de fournir cette puissance.

Actuellement, il existe très peu de modèles de PAC de grande puissance (> 50 kW) répondant aux contraintes du secteur résidentiel collectif [3]. Les principales options possibles consistent alors à utiliser :

– **PAC conçues pour les villas :** Ce type de PAC présente l'avantage d'être destiné au secteur résidentiel, et est donc conçu pour les mêmes modes de fonctionnement (chauffage/ECS) que pour l'habitat collectif. De plus, elles sont prévues pour opérer à des niveaux sonores compatibles avec les zones d'habitation. Cependant, puisqu'elles sont généralement de faible puissance (< 50 kW), il est nécessaire d'en installer un grand nombre pour atteindre la puissance requise dans le secteur résidentiel collectif. Le fractionnement de la puissance installée en plusieurs petites machines permet de répartir les efforts exercés sur la structure, ce qui facilite l'implantation en toiture. Cependant, cela complexifie la régulation du système (voir site pilote « Daru » à la section 2.3.4) ; par ailleurs, en cas de place restreinte, cela peut compromettre la mise en place d'un système monovalent.

– **PAC conçues pour des applications industrielles :** Ce type de PAC présente l'avantage d'être disponible en grande puissance (> 50 kW). Il y a donc besoin de moins de machines pour atteindre la puissance requise dans le résidentiel collectif que lorsque l'on utilise des PAC conçues pour les villas. La régulation est donc, au premier abord, moins complexe car moins d'éléments doivent être contrôlés (voir site pilote « St-Julien » à la section 2.2.4). Cependant, ces machines industrielles ont généralement une masse importante qui peut compromettre leur installation en toiture à cause des contraintes structurelles du toit. De plus, leurs émissions sonores sont souvent élevées, supérieures aux valeurs limites pour les zones d'habitation. Cela nécessite alors l'installation d'éléments réducteurs de bruit, voire empêche leur implémentation.

Pour l'une et l'autre de ces options, il est généralement recommandé d'installer plusieurs PAC en cascade, en particulier dans le cas d'un système monovalent [2]. Cela permet d'une part d'adapter la puissance fournie à la demande et d'autre part de garantir un approvisionnement, même partiel, en cas de panne d'une des machines. Contrairement aux systèmes mis en place dans les villas, il est donc nécessaire de gérer l'activation d'une cascade de PAC plutôt que d'une seule PAC.

1.2 Gestion de la cascade de PAC

Pour que la production de chaleur soit adaptée à la demande, il est judicieux d'activer les PAC progressivement pour moduler la puissance fournie. Il s'agit de trouver un équilibre entre une activation rapide pour assurer le confort des usagers, et une activation plus lente pour préserver la durée de vie des machines. En fonction de la configuration, cette modulation peut se faire au niveau de l'enclenchement successifs des PAC, mais aussi des compresseurs, à l'interne de chaque PAC. Par exemple, la Figure 1 illustre un système avec 3 PAC comportant 2 compresseurs chacune, soit un total de 6 étages de puissance pour moduler la puissance. Il reste alors à savoir quel élément commande l'activation des étages de puissance et sur quel critère est effectué l'enclenchement d'un nouvel étage. Il est à noter que dans les gammes de puissance considérées, il n'y a pas de machines à variation de puissance continue. Celles-ci ne sont donc pas étudiées dans ce projet.

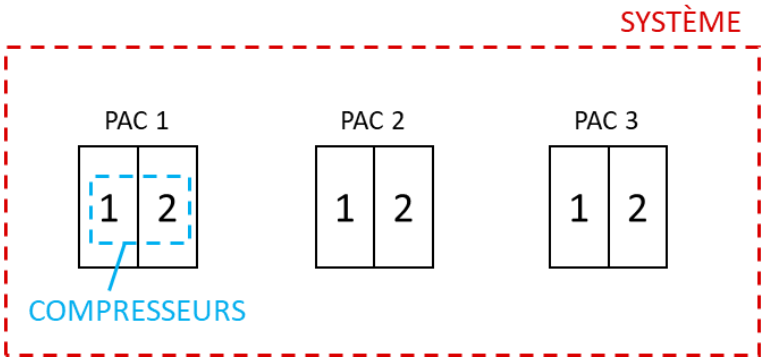


Figure 1 : Exemple de niveaux de fractionnement de la puissance du système (ici : 3 PAC avec 2 compresseurs chacune, soit 6 étages de puissance)

1.2.1 Dispositifs de gestion de la cascade

Deux principaux éléments peuvent commander l'activation de la cascade de PAC :

– **PAC avec une régulation de type « Master/slave » ou « Maître/esclave » :** C'est le logiciel de régulation interne de la PAC, conçu par le fabricant, qui assure la gestion de la cascade à partir de la PAC « Master » pour toutes ses PAC « Slave » (Figure 2).

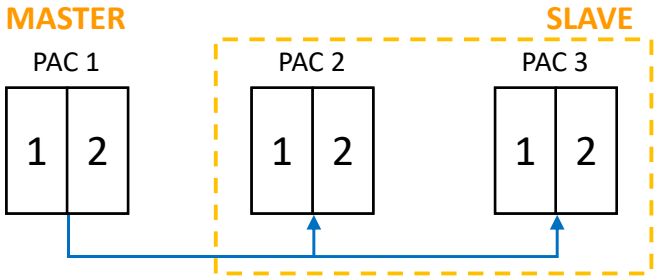


Figure 2 : Schéma de principe de la gestion de la cascade de PAC par une PAC « Master »

– **Système MCR (Mesure, Contrôle, Régulation) :** Un système MCR, externe aux PAC, contrôle l'activation des différentes PAC du système (Figure 3).

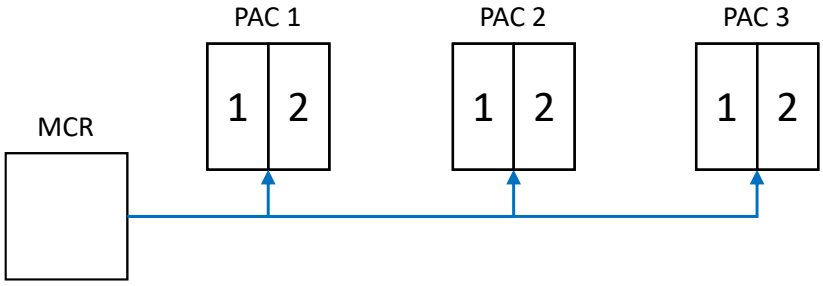


Figure 3 : Schéma de principe de gestion de la cascade de PAC par un système MCR

Les avantages et inconvénients de chacun de ces deux dispositifs sont présentés dans le Tableau 1.

Il est important de noter que les différents niveaux de fractionnement de la puissance (PAC et compresseurs) amènent parfois à différents niveaux de régulation des étages de puissance. Par exemple, dans le cas d'une régulation externe aux PAC de type MCR, il arrive que le système MCR puisse seulement commander l'activation des PAC, mais pas l'activation de leurs compresseurs. Il est alors possible, ou nécessaire, de combiner un dispositif MCR avec un dispositif Master/slave (voir Chapitre 2).

Tableau 1 : Avantages et inconvénients des deux dispositifs de gestion de la cascade

	Régulation Master/slave	Régulation avec MCR
Coût	+ intégrée dans les PAC	- système supplémentaire aux PAC
Commande des différents niveaux du système (PAC et compresseurs)	+	- PAC uniquement
Commande de toutes les PAC	+ attention aux limitations de certains modèles sur le nombre de PAC slave prises en charge	+
Commande des vannes, circulateurs, chaudière, etc.	- pas toujours possible selon le modèle de PAC ou le mode de fonctionnement*, système MCR parfois requis en complément	+
Régulation en cas de panne d'une PAC	- si panne de la PAC master, alors PAC slaves bloquées	+ aucun changement
Nombre de sondes requises dans chaque ballon tampon	- une par PAC master ou une par PAC, selon le modèle de PAC et le mode de fonctionnement*	+ une seule
Prise en compte du statut des PAC (nombre de compresseurs activités, cycle de dégivrage, panne haute pression, etc.)	+ prise en compte des pannes (sur certains modèles uniquement)	- informations pas toujours transmises par les PAC aux dispositifs externes, selon le modèle de PAC
Répercussion automatique d'un changement de paramètre à toutes les PAC	+ à répéter uniquement si plusieurs PAC master	- à effectuer manuellement

** Chauffage/ECS*

1.2.2 Méthodes de gestion de la cascade

L'élément qui assure la régulation des cascades (PAC « Master » ou système MCR) doit déterminer quand activer une nouvelle PAC ou un nouveau compresseur. Pour cela, il existe principalement deux méthodes, à savoir :

– **Temporisation :** Activation successives des différents étages de puissance (compresseurs ou PAC) selon un intervalle de temps. Par exemple, si la temporisation est fixée à 10 min, tant que la consigne de température n'est pas atteinte, alors un nouvel étage de puissance s'enclenche toutes les 10 min.

– **Hystérésis :** Activation successive des différents compresseurs ou PAC selon un écart de température entre la mesure et la consigne. Par exemple, le premier étage de puissance s'active lorsque la température mesurée est inférieure de 1°C par rapport à la consigne, le suivant si l'écart est de 2°C, etc.

De façon générale, la complexité de la gestion de la cascade réside dans le choix des paramètres de temporisation ou d'hystérésis. Plus le délai entre l'activation des étages de puissance est faible, plus la consigne est atteinte rapidement et plus le confort des usagers est assuré. Un délai trop faible mène toutefois à des cycles très courts et fréquents, ce qui peut endommager et réduire la durée de vie des machines. A l'opposé, pour un délai long, les machines sont préservées mais la consigne est atteinte plus lentement. Si le délai est trop long, la puissance fournie n'est alors pas suffisante pour répondre rapidement à la demande et les conditions de confort des usagers ne sont pas respectées. Il faut donc trouver les paramètres permettant à la fois de préserver les machines et d'assurer le confort des usagers.

La durée minimale recommandée pour un cycle est de **20 minutes**, soit au maximum 3 démarrages par heure [2]. Si l'on tient compte d'un temps d'arrêt entre deux cycles, on peut donc fixer une limite raisonnable de 2 cycles par heure, soit **48 cycles par jour**.

Il est à noter que, dans le cas d'un dispositif MCR, il est possible que ce soit la régulation interne de chaque PAC qui assure l'enclenchement successif des compresseurs, suivant une méthode (temporisation/hystérésis) qui peut être différente de celle du système MCR (voir site pilote « St-Julien, Système monovalent », section 2.2.4). Cela ajoute de la complexité à la gestion de la cascade et demande une coordination entre l'automaticien de la MCR et le fournisseur des PAC.

1.3 Conclusion

En conclusion, la gestion des cascades dans un système PAC air-eau peut être défini comme l'enclenchement ou l'arrêt successif des pompes à chaleur et de leurs différents compresseurs, effectué de manière centralisée. L'aspect centralisé de cette régulation peut correspondre à un système MCR (Mesure, Contrôle et Régulation), à une pompe à chaleur « Master » qui régule des pompes à chaleur « Slave », ou encore à une combinaison des deux. L'enclenchement/arrêt peut être effectué à l'aide d'une temporisation ou bien d'un écart de température par rapport à la consigne (hystérésis).

La complexité de la gestion des cascades réside dans : i) les limitations actuelles en termes de régulation des modèles de PAC disponibles sur le marché, et ii) dans le choix des paramètres de temporisation ou d'hystérésis qui influent notamment sur la durée de vie des machines et sur le confort des usagers.

Le Chapitre 2 de ce rapport présente les résultats concernant la gestion de la cascade de PAC de deux installations pilotes : l'une pour un système monovalent, avec des PAC de type industrielles (« St-Julien », section 2.2) ; l'autre bivalent, avec des PAC conçues pour les villas (« Daru », section 2.3).

Le Chapitre 3 se concentre quant à lui sur la simulation de cascades de PAC pour des systèmes monovalents. On y étudie la gestion des cascades pour des PAC dédiées à l'ECS ou au chauffage, ainsi que des PAC qui alternent entre la production de chauffage et d'ECS.

Chapitre 2
Retours d'expérience sur installations pilotes

Ce chapitre se focalise sur la gestion en cascade des pompes à chaleur air-eau, en situation d'usage réel, de deux projets pilotes du programme Chaleur renouvelable des SIG. Le but est d'identifier les problèmes rencontrés, de partager les solutions mises en place et d'émettre des recommandations pour faciliter l'implémentation des PAC air-eau dans les bâtiments résidentiels collectifs. Une liste qui résume les problèmes rencontrés sur les sites pilotes se trouve dans l'Annexe I.

2.1 Sites pilotes

Les sites pilotes étudiés ont déjà fait l'objet d'un retour d'expérience dans le cadre du projet AirBiVal [1]. Cette étude portait sur l'analyse énergétique du système de production de chaleur de ces bâtiments, afin d'en déterminer les performances en conditions réelles de fonctionnement. Le but était d'évaluer le potentiel ainsi que les barrières à la mise en place de ce type de système dans le cadre de bâtiments résidentiels collectifs existants. Le projet actuel se concentre quant à lui sur la régulation des PAC qui composent le système, c'est-à-dire la gestion de leur enclenchement en cascade.

2.1.1 Systèmes

Il s'agit 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 :

- **St-Julien, système PAC monovalent :** cet immeuble résidentiel collectif a été construit en 1972, avec une SRE de 4'047 m². Le système de 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, puis démantelée.
- **Daru, système PAC bivalent :** cet immeuble résidentiel collectif a été construit en 1992, avec une SRE de 7'563 m^2. Le système de production de chaleur (deux 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.

Pour le système PAC monovalent, le retour d'expérience s'est déroulé sur une période de 2 ans et pour le système PAC bivalent sur 3 ans.

2.1.2 Gestion de la cascade de PAC

Au fil du temps, la méthode de régulation de ces sites pilotes a été adaptée de sorte à garantir le bon fonctionnement du système et des performances énergétiques élevées. L'évolution pour chacun d'eux est la suivante :

- **St-Julien, système PAC monovalent :** Dans un premier temps, la gestion de la cascade de PAC était assurée par la régulation interne des deux PAC industrielles sous la forme d'un fonctionnement maître/esclave en combinaison avec un système MCR. Par la suite, la régulation maître/esclave a été désactivée en raison de dysfonctionnements qui péjoraient la performance. La gestion de la cascade a alors été assignée au système MCR pour l'activation des PAC, en combinaison avec la régulation interne des PAC industrielles pour l'activation de leurs compresseurs. Pour plus de détails, se référer à la section 2.2.4.

- **Daru, système PAC bivalent** : La cascade de 6 PAC était régulée par leur propre logiciel sous la forme maître/esclave. L'intérêt était de tester la capacité de la régulation interne de PAC de type villa à gérer la cascade dans un bâtiment résidentiel collectif. Cette régulation, peu adaptée aux bâtiments résidentiels collectifs à causes de limitations décrites plus loin, a finalement été remplacée par un système MCR. Pour plus de détails, se référer à la section 2.3.4.

On remarque que les méthodes de gestion des cascades mises en place sur ces sites pilotes sont plus complexes que les options de base décrites au chapitre précédent. Le choix de cette régulation plus complexe découle d'une combinaison de facteurs variés tels que la communication entre les différents acteurs impliqués dans le projet ou les limitations des différents éléments du système.

2.2 St-Julien : système PAC monovalent

2.2.1 Description du site

Situé à Genève et construit en 1972, le bâtiment du site pilote de St-Julien (Figure 4) 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 @ 7°C/45°C). 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 a été démantelée par la suite.

Figure 4 : 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)

Tableau 2 : Résumé des principales caractéristiques du site pilote "St-Julien"

Type de bâtiment	Résidentiel collectif
Année de construction	1972
SRE	4'047 m²
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 @ 7°C/45°C)
Besoins de chaleur pour le chauffage **(sans / avec correction climatique)**	58 kWh/m².an (du 1er juillet 2018 au 1er juillet 2019) ou 77 kWh/m².an (277 MJ/m².an) corrigés climatiquement
Besoins de chaleur pour la production d'ECS	55 kWh/m².an
Période de monitoring	1er juin 2018 au 1er juin 2021

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. Les deux PAC ont leur propre circulateur intégré à débit fixe (30 m³/h chacune). Les principales caractéristiques du site pilote sont résumées dans le Tableau 2 ci-dessus.

2.2.2 Schéma hydraulique

Le schéma hydraulique est présenté dans la Figure 5. 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. A noter qu'ici le ballon de chauffage est raccordé au reste du système avec une connexion en 4 points. Il existe des branchements plus performants, néanmoins les contraintes d'espace ne permettent pas toujours de les mettre en place. Dans cette installation, faute d'espace disponible en chaufferie, le volume du ballon est faible (1 m³) par rapport aux débits impliqués côté PAC (30-60 m³/h). Ce ballon constitue donc davantage un découplage hydraulique qu'un stockage de chaleur. La question du branchement optimal des ballons dans ce genre de cas reste ouverte et serait à traiter par ailleurs.

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.

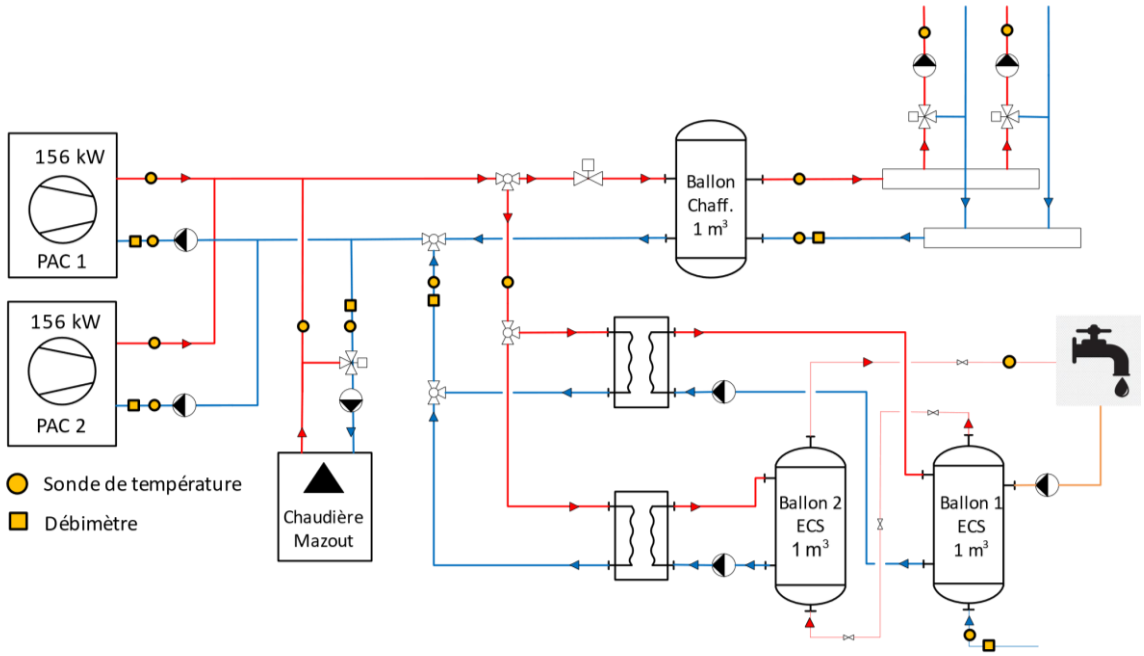


Figure 5 : Schéma du système monovalent du site pilote « St-Julien ». La puissance nominale des PAC correspond à 7°C en entrée d'évaporateur et 45°C en sortie du condenseur

2.2.3 Bilan énergétique annuel

Un bilan annuel effectué sur la période du 1er juillet 2019 au 30 juin 2020 est représenté sur la Figure 6 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). Après correction climatique au climat « standard » (2'659 $DJ_{18/12}$ selon [4]), la demande de chauffage s'élève à 77 kWh/m².

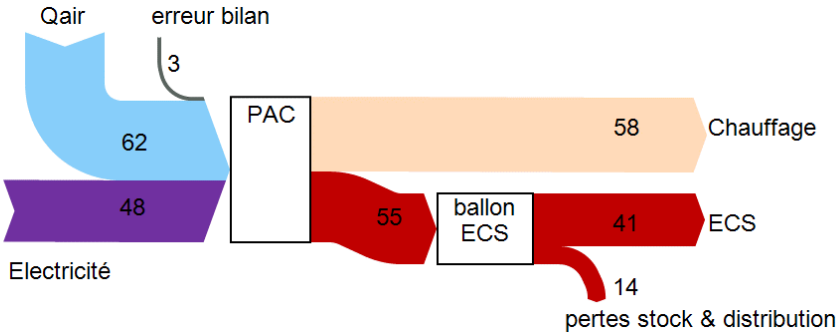


Figure 6 : Diagramme de flux du bâtiment de St-Julien, du 1er juillet 2019 au 30 juin 2020 (en kWh/m².an)

2.2.4 Régulation de la cascade

Dans un premier temps, la gestion de la cascade de PAC était assurée par la régulation interne des deux PAC industrielles sous la forme d'un fonctionnement maître/esclave en combinaison avec un système MCR. Par la suite, la régulation maître/esclave a été désactivée en raison de dysfonctionnements qui péjoraient la performance (voir ci-dessous). La gestion de la cascade a alors été assignée au système MCR pour l'activation des PAC, en combinaison avec la régulation interne des PAC industrielles pour l'activation de leurs compresseurs.

Régulation initiale : MCR – Maître/esclave

La Figure 7 illustre le principe d'enclenchement des PAC au début du projet (jusqu'à décembre 2019). L'activation des deux PAC industrielles, et de chacun de leurs 4 compresseurs, était pilotée par la régulation interne d'une des PAC sous la forme d'une gestion maître/esclave. Par contre, cette régulation pensée pour des applications industrielles n'était pas suffisante pour contrôler les composants de la chaufferie (ouverture des vannes d'isolement ou des vannes trois voies, activation de circulateurs, etc.). Un système de régulation externe (MCR) a alors été mis en place pour gérer ces éléments. Il est également requis pour gérer les modes de fonctionnement (ECS et chauffage). En effet, la régulation interne des PAC ne dispose que d'un seul mode de fonctionnement (pas de contrôle chauffage/ECS). Le système MCR fait alors passer les PAC d'un mode à l'autre en envoyant une consigne de température de production différente.

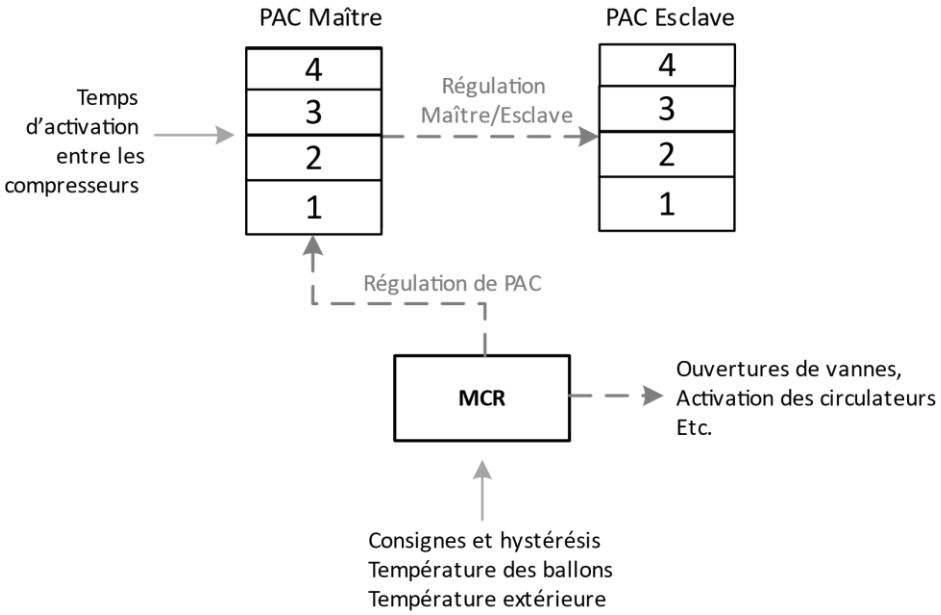


Figure 7 : Diagramme simplifié de la régulation MCR – maître/esclave. Les nombres 1-4 font référence au nombre de compresseurs de chaque PAC

Ce système MCR communiquait uniquement à la PAC « Master » les températures des ballons, ainsi que les consignes et les hystérésis en mode chauffage et ECS. C'était la régulation maître/esclave, interne aux PAC, qui décidait comment activer les PAC et leurs compresseurs.

Chaque PAC comporte 4 compresseurs « scroll », dont l'activation successive est gérée par la PAC master, selon une temporisation, jusqu'à ce que la consigne soit atteinte.

Cette régulation maître/esclave a été maintenue la première année de fonctionnement. Elle a finalement été désactivée car la PAC « master » avait besoin de connaître la température de retour de la PAC « slave » pour la contrôler. Pour cela, la PAC1 « master » faisait fonctionner son propre circulateur 24h/24, même lorsqu'elle était à l'arrêt comme le montre la Figure 8.a. Comme le circulateur des PAC utilisées sur ce site pilote ne disposent pas de variateur de fréquence, la consommation d'électricité liée à son fonctionnement en continu n'est pas négligeable. Cette régulation non-optimale a provoqué une surconsommation de 72 kWh/jour d'électricité, ce qui a eu pour effet de dégrader le COP de 2.1 à 1.5 durant l'été 2018 [1].

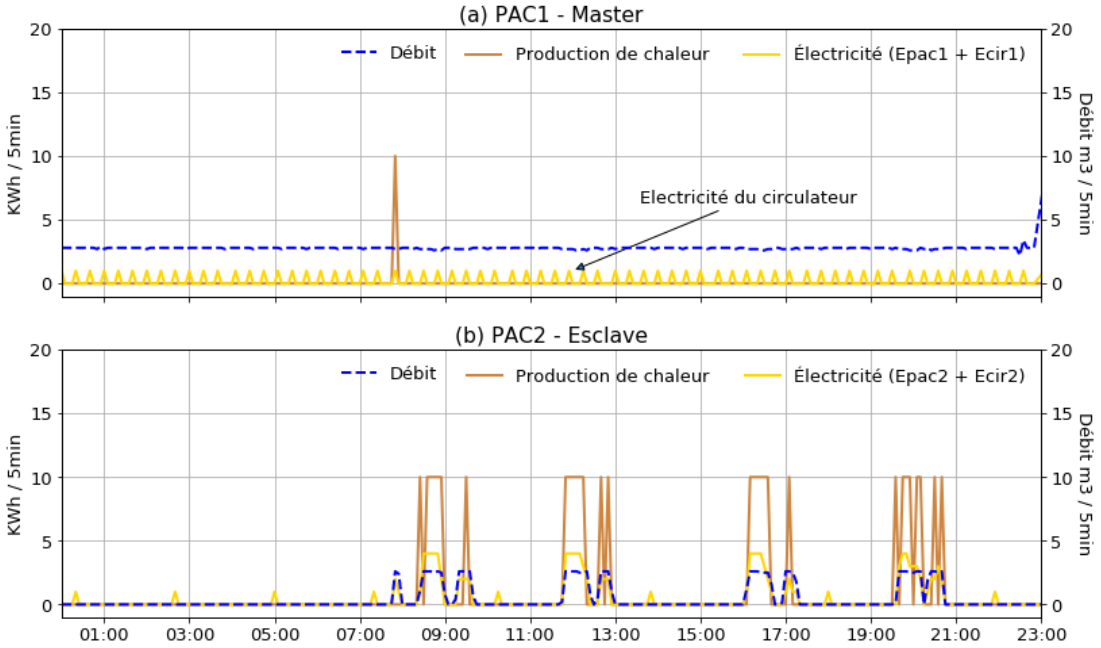


Figure 8 : Fonctionnement de la PAC maître et de la PAC esclave au cours de la journée du 16 septembre 2018 (pas de temps de 5 minutes). L'électricité correspond à la consommation de la PAC et de son circulateur.

Régulation améliorée : MCR – Régulation interne de la PAC

Puisque le problème de l'activation du circulateur 24h/24 n'a pas pu être résolu auprès du fournisseur de la PAC, la régulation maître/esclave a été désactivée à partir de décembre 2019. Comme le montre la Figure 9, la PAC esclave a alors été connectée au système MCR afin d'obtenir deux machines indépendantes. Cela a permis de synchroniser l'enclenchement des PAC avec leur circulateur et ainsi d'obtenir des COP supérieurs à 2.5 durant l'été 2019.

Le système MCR prend en charge l'activation des deux PAC entre le mode chauffage et le mode ECS. La deuxième machine s'active avec une temporisation, c'est-à-dire que si la consigne n'est pas atteinte au bout d'un certain temps d'opération de la première machine en chauffage ou en ECS, alors la deuxième démarre en parallèle. La machine avec le moins d'heures de fonctionnement démarre en premier, afin d'équilibrer le temps de fonctionnement entre les différentes machines.

Par contre, la gestion des compresseurs est toujours assurée par la régulation interne de chaque PAC. Le système MCR ne fait que donner l'information à chaque PAC de s'enclencher dans un mode ou dans l'autre. Pour des questions de garantie des machines, le fournisseur des PAC n'a pas donné l'autorisation de gérer l'enclenchement des compresseurs depuis le système MCR.

Avec cette régulation, la gestion de la cascade a été séparée en deux niveaux comme le montre la Figure 9. D'un côté, le système MCR gère l'activation des PAC et de l'autre la régulation interne de chaque PAC gère les compresseurs.

Lorsqu'il y a une demande, l'enclenchement des PAC se fait donc de la manière suivante :

- Le système MCR démarre en premier la machine avec le moins d'heures de fonctionnement (la PAC1 dans cet exemple)
- La PAC1 active de façon progressive chaque étage de puissance (compresseurs) selon le temps d'activation (temporisation) paramétré dans cette machine
- Si la PAC1 n'a pas atteint la consigne au bout d'un certain temps, le système MCR active la deuxième machine (PAC2), même si la PAC1 n'a pas encore activé ses 4 compresseurs.
- La PAC2 active de façon progressive chaque étage de puissance selon le temps d'activation paramétré dans cette machine

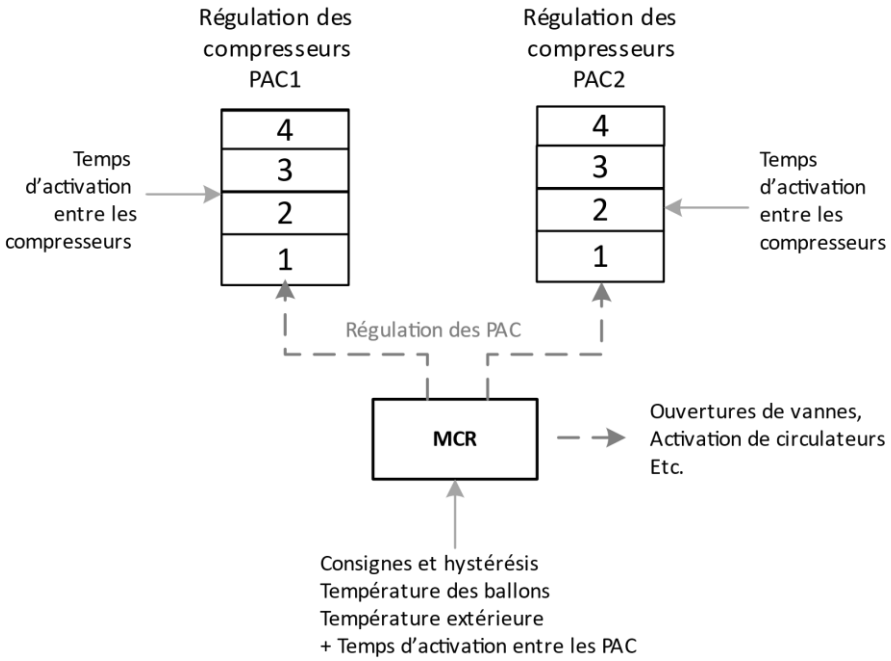


Figure 9 : Diagramme simplifié de la régulation avec MCR en combinaison avec la régulation interne de chaque PAC. Les nombres 1-4 font référence aux compresseurs de chaque PAC

L'inconvénient de ce type gestion est que le système MCR ne prend pas en compte la temporisation paramétrée dans la régulation interne de chaque PAC, ainsi que l'état de fonctionnement de chaque machine (temporisations, pannes haute pression, etc.). L'utilisation d'une régulation externe aux PAC ne permet donc pas une gestion complète de la cascade, basée sur une connaissance du statut de l'intégralité du système. De plus, l'optimisation de la cascade générale demande une coordination entre l'automaticien du système MCR, (pour paramétrer l'activation des PAC) et le technicien de la PAC (pour paramétrer l'activation des compresseurs).

2.2.5 Effet de la temporisation des compresseurs sur la dynamique du système

Cette section présente une analyse de l'influence de la temporisation de la cascade sur la dynamique du système en chauffage et en ECS, au cours de deux années de mesure, après amélioration de la régulation : l'enclenchement successif des PAC est commandé par le système MCR, celui des compresseurs par la régulation interne de chaque PAC ; tous deux se font par temporisation.

La temporisation d'enclenchement des PAC par la MCR n'a pas été modifiée durant cette période, contrairement à celui des compresseurs qui a été diminué graduellement, de sorte à réduire la consommation d'électricité liée au pompage. En effet, pour rappel, le COP est péjoré si la PAC fonctionne à charge partielle car son circulateur n'est pas équipé de variateur de vitesse. En vue d'améliorer le COP, les compresseurs sont activés plus rapidement (diminution du délai d'activation) pour forcer la PAC à opérer à pleine charge. Il est toutefois difficile d'évaluer l'amélioration réelle du COP par la diminution du délai d'activation, puisque de nombreux autres paramètres ont été modifiés durant ces deux années de mesures. En revanche, il est intéressant d'observer l'effet du délai d'activation sur la dynamique du système.

Pour comparer les différentes périodes où le délai d'activation a été modifié, deux indicateurs sont utilisés : la durée des cycles et le nombre de cycles par jour.

Evolution du temps d'activation des compresseurs

La Figure 10 montre la dynamique, en valeurs journalières, de la production de chaleur des deux PAC (kWh/jour), de la durée moyenne des cycles (minutes), ainsi que du nombre de cycles (cycles/jour). La dynamique des cycles en hiver correspond aux modes ECS et chauffage confondus, tandis que les résultats de l'été correspondent uniquement à l'ECS.

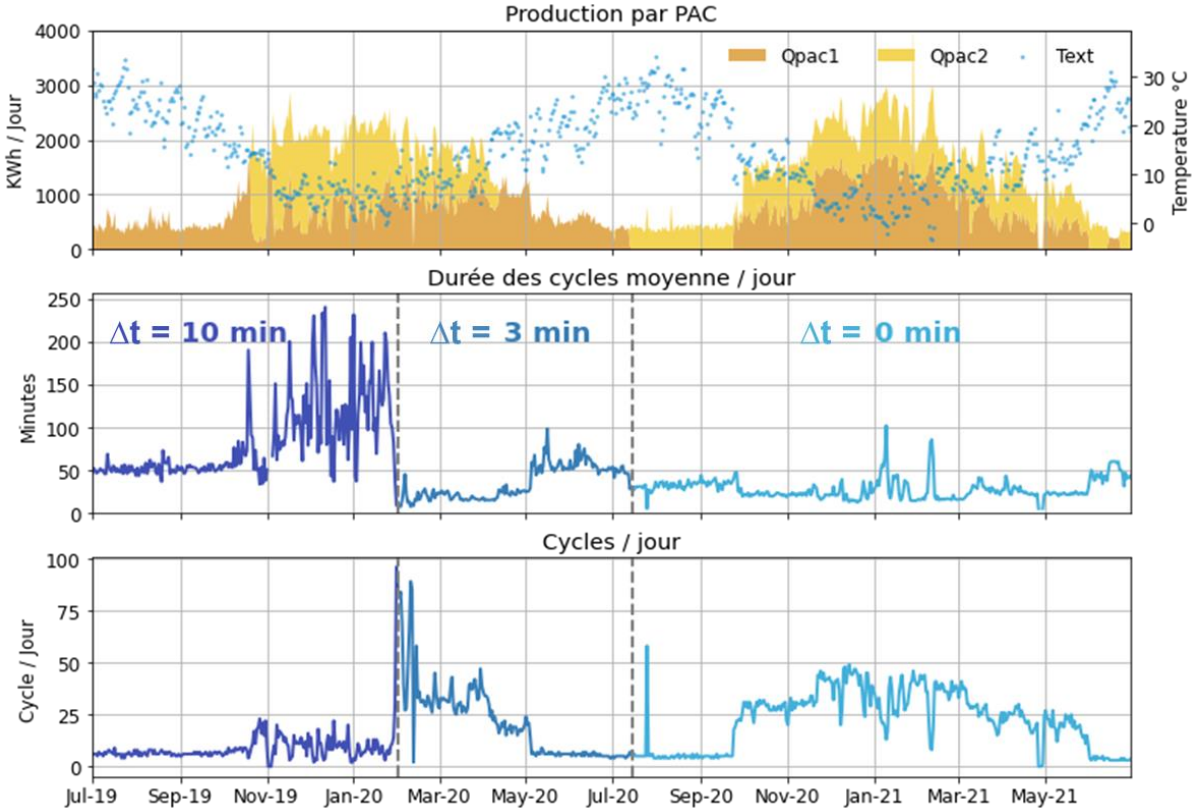


Figure 10 : Dynamique de la production de chaleur, de la durée moyenne et du nombre de cycles par jour pour la période du 1er juillet 2019 au 30 juin 2021 (valeurs journalières). La période est séparée selon le temporisation entre l'activation des différents compresseurs paramétrée dans les PAC (10, 3 et 0 min).

Les deux années sont séparées en trois périodes qui correspondent au changement de la temporisation entre l'activation de chaque compresseur. La temporisation a été diminuée de 10 à 3 minutes, puis à 0 minutes de la manière suivante :

Δt = 10 minutes (juillet 2019 – février 2020) :

- Durant l'été 2019, la durée moyenne des cycles d'ECS est de 50 min avec 4 à 6 cycles par jour.
- Au cours de la saison de chauffe, les deux PAC ont fonctionné en parallèle, à charge partielle, pour la production d'ECS. Lors de l'activation du chauffage (jusqu'à février 2020), les cycles fluctuent beaucoup entre 40 et 180 minutes et de 3 à 18 cycles/jour.

Δt = 3 minutes (février 2020 - juillet 2020) :

- En février 2020, le temps d'activation entre les compresseurs a été réduit à de 10 à 3 min. Ce changement a eu comme résultat une diminution marquée de la durée des cycles à 20 min et une augmentation à 35 cycles/jour en moyenne (max 80 cycles/jour).
- Durant tout l'été, une seule PAC est utilisée pour répondre à la demande de chaleur afin de réduire la consommation d'électricité liée au pompage.
- Le passage en mode été en mai 2020 a éliminé les cycles courts et nombreux liés au mode chauffage. Tout comme l'été précédent, les cycles d'ECS durent 50 min en moyenne avec 4 à 6 cycles

par jour. Le délai d'activation des compresseurs a donc peu d'impact sur la durée et le nombre de cycles de la PAC durant l'été.

∆t = 0 minute (juillet 2020 - juillet 2021) :

- En juillet 2020, le temps entre l'activation des compresseurs a été réduit de 3 à 0 min. La PAC enclenche donc ses 4 étages de puissance en même temps. Ce changement a induit une légère diminution dans la durée des cycles à 35 minutes sans avoir d'impact sur le nombre de cycles par jour.
- Lors du passage à la période de chauffage (hiver 2020-2021), les deux PAC ont à nouveau été gérées en parallèle. Les cycles sont très courts et plus nombreux que dans le cas du premier hiver avec une temporisation de 10 minutes (2019-2020). La durée moyenne des cycles (ECS et chauffage confondus) est de 20 min avec des cycles inférieurs à 18 minutes (en moyenne journalière). Les PAC ont effectué entre 25 à 50 cycles/jour.

Le Tableau 3 montre le nombre d'heures de fonctionnement (nombre d'heures où au moins 1 compresseur parmi les 8 compresseurs du système est activé), total et par service. Le nombre total d'heures durant lesquelles les PAC ont fonctionné au cours de la première année (Juillet 2019 - Juin 2020) s'élève à 4'145 heures. La diminution du temps d'activation durant la deuxième année (Juillet 2020 - Juin 2021) engendre une diminution du nombre d'heures de fonctionnement annuel à 3'242 heures, soit une diminution de 21% par rapport à la première année.

Tableau 3 : Nombre d'heures de fonctionnement total et par service de la première et la deuxième année (de juillet à juin de l'année suivante)

	2019-2020	**2020-2021**
ECS (h)	1'882	1'187
Chauffage (h)	2'263	2'055
Total (h)	**4'145**	**3'242**

Analyse en fonction de la température extérieure

En complément, on analyse ici les indicateurs d'activité des PAC en fonction de la température extérieure, pour un délai de temporisation des compresseurs de 0 ou 10 minutes. Les résultats sont présentés dans la Figure 11 (durée moyenne des cycles) et la Figure 12 (nombre de cycles par jour).

Les points inférieurs à une température extérieure de 20°C (température de non-chauffage) correspondent aux cycles d'ECS et de chauffage confondus durant la période de chauffage. La dispersion marquée au-dessous de cette température est principalement liée aux cycles de chauffage qui sont plus sensibles aux variations de température extérieure que les cycles d'ECS. Plus la température extérieure est faible, plus les cycles de chauffage durent longtemps. Cela est dû d'une part à l'augmentation de la demande de chauffage et d'autre part à la dégradation de la puissance de la PAC. En revanche, les cycles d'ECS en hiver dépendent surtout de la dégradation de la capacité de la PAC, car la demande d'ECS est relativement constante sur l'année.

En hiver, le nombre de cycles par jour et la durée des cycles sont plus sensibles au temps d'activation des compresseurs qu'en été. La durée de cycle avec un temps d'activation de 10 min montre une dispersion plus marquée avec une médiane de 120 minutes (voir boxplot de gauche), tandis qu'avec 0 min les points restent plus concentrés autour de 20 minutes (soit une réduction de 85% des valeurs médianes).

Pour des températures extérieures supérieures à 20°C, il s'agit uniquement de cycles d'ECS. La durée et le nombre de cycles/jour sont moins sensibles aux variations de la température extérieure que durant l'hiver. La réduction de la temporisation de 10 à 0 min a principalement un impact sur la durée des cycles, qui diminue de 53 à 35 minutes en valeur médiane (soit une différence de 33%). Le nombre de démarrages journalier varie très peu puisque l'on passe de 6 à 5 cycles par jour.

Pour une température extérieure entre 5 à 15°C, on observe pour une temporisation de 0 minutes un grand nombre de jours avec des cycles trop courts (< 20 minutes), avec des journées atteignant jusqu'à 48 cycles/jour. Globalement, cela se produit sur 28% des jours sur l'année. Avec un délai d'activation de 10 min, la PAC cycle moins (5 - 15 cycles/jour) et les cycles sont de plus longue durée, pouvant dépasser 120 minutes.

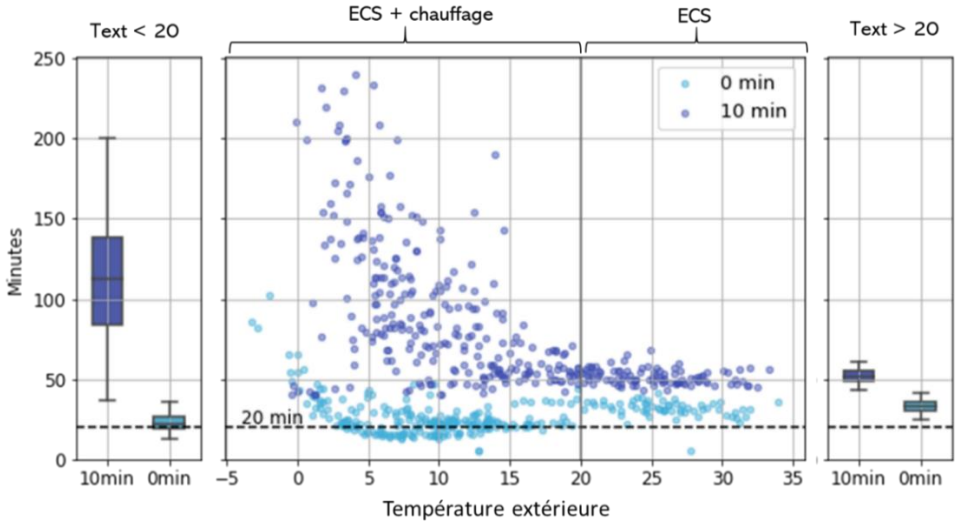


Figure 11 : Durée moyenne des cycles avec un temps entre l'activation des compresseurs de 0 et 10 minutes en fonction de la température extérieure (valeurs journalières)

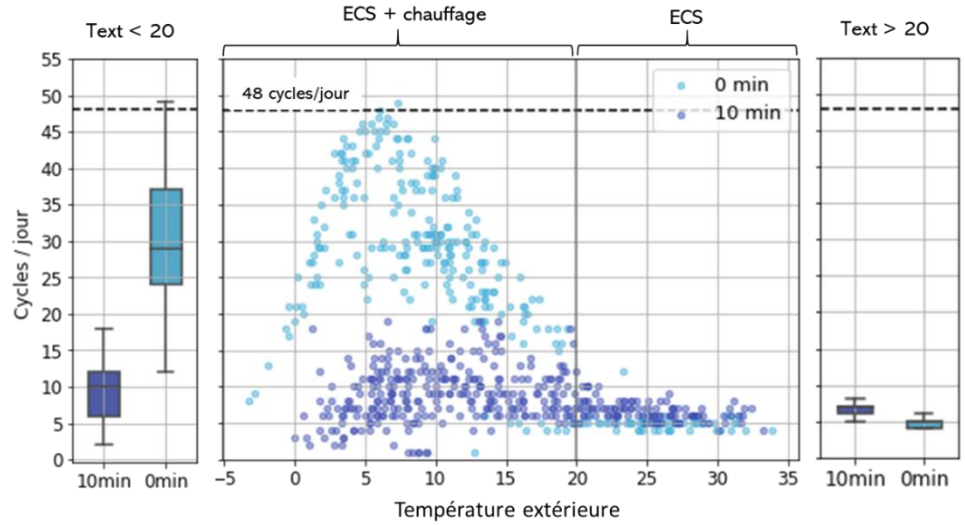


Figure 12 : Nombre de cycles par jour avec un temps entre l'activation des compresseurs de 0 et 10 minutes en fonction de la température extérieure (valeurs journalières)

En dessous de 5°C, on observe qu'avec un délai d'activation de 0 min, le nombre de cycles diminue soudainement et ils deviennent long. Cela s'explique en partie par le fait que les PAC dégivrent de manière automatique à intervalles de temps réguliers en-dessous de 5°C. Par conséquent, les PAC doivent rattraper la demande soutirée (chauffage ou ECS) durant laquelle les cycles de dégivrages automatiques se sont produits. Par ailleurs, comme expliqué par la suite avec la modélisation (section 3.4.1), cela provient également du fait que, lorsque la température extérieure diminue, la demande de chaleur augmente et la capacité de la PAC diminue. A chaque enclenchement de la PAC, il faut donc plus longtemps pour atteindre la consigne, c'est-à-dire que les cycles sont plus longs (Figure 11). Comme la demande augmente, le ballon se décharge plus rapidement. Il est donc nécessaire d'enclencher la PAC plus fréquemment, d'où l'augmentation du nombre de cycles (Figure 12). A partir d'une certaine température extérieure (ici environ 5-7°C), on arrive finalement à un point où, comme les cycles sont plus longs et plus fréquents, certains fusionnent en un seul long cycle. Cela fait finalement baisser le nombre de cycle journalier, mais continue à faire augmenter la durée moyenne des cycles. Ce phénomène est moins marqué avec le délai d'activation de 10 min.

Au final, les temps d'activation analysés (0 min ou 10 min) semblent tous deux convenir pour le fonctionnement estival du système. En revanche, un temps d'activation de 0 min mène à des cycles très courts (< 20 min) durant la saison de chauffe, tandis qu'avec un délai de 10 min, ils sont parfois très longs (> 120 min). Il s'agit alors de trouver un temps d'activation intermédiaire permettant d'éviter ces valeurs extrêmes.

Ainsi que nous le verrons avec la simulation dans la section 3.5.1, les cycles sont plus sensibles au délai d'activation et aux variations de la température extérieure lorsque le volume de stockage est faible, surtout en mode chauffage. Ce site pilote en est un exemple, car le volume des ballons est faible par rapport à la puissance PAC installée (6.4 L/kW en ECS et 3.2 L/kW en chauffage, à 7°C/45°C), en raison de l'espace limité en chaufferie (explication détaillée dans l'Annexe A). Le faible volume du ballon fait que la PAC atteint les consignes plus rapidement. La charge et décharge des ballons est donc plus rapide et plus fréquente.

2.3 Daru : système PAC bivalent

2.3.1 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 13). 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 × 34 kW = 204 kW @ 7°C/45°C) (Figure 13), 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 @ 7°C/45°C et disposent chacune de leur propre circulateur. 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 4 résume les caractéristiques principales du projet Daru.

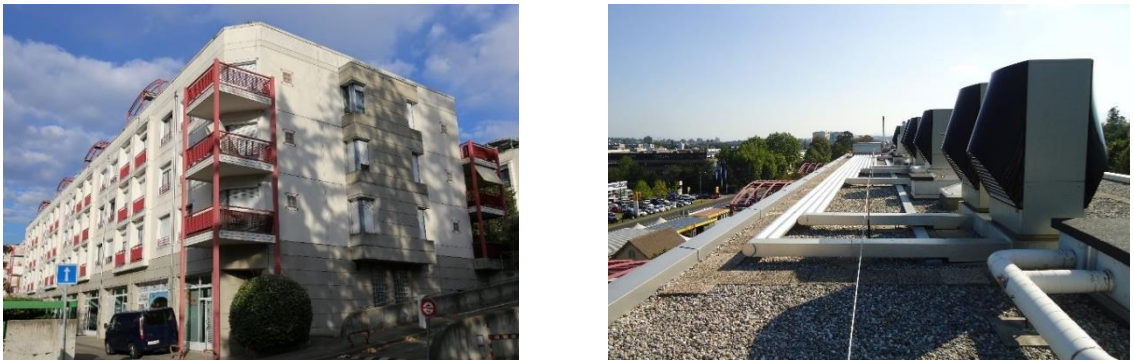


Figure 13 : Bâtiment de « Daru » (à gauche) et vue des pompes à chaleur air-eau en toiture pour le chauffage et l'ECS (à droite)

Tableau 4: Résumé des principales caractéristiques du site pilote "Daru"

Type de bâtiment	Résidentiel collectif + arcades commerciales au rez
Année de construction	1992
SRE	7'563 m²
Ancienne installation de chauffage	Chaudières à gaz (2 x 200 kW)
Nouvelle installation de chauffage	Système PAC air-eau (6 x 34 kW @ 7°C/45°C) bivalent avec chaudière gaz (200 kW)
Besoins de chaleur pour le chauffage **(sans / avec correction climatique)**	64 kWh/m².an (du 1er juillet 2018 au 1er juillet 2019) ou 72 kWh/m².an (259 MJ/m².an) corrigés climatiquement
Besoins de chaleur pour la production d'ECS	30 kWh/m².an
Période de monitoring	1er juillet 2017 au 1er juillet 2019

2.3.2 Schéma hydraulique

Le schéma hydraulique simplifié du système est montré dans la Figure 14. 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). Comme pour le site pilote « St-Julien », le ballon de chauffage est raccordé au reste du système avec une connexion en 4 points. Il existe des branchements plus performants, néanmoins les contraintes d'espace ne permettent pas toujours de le mettre en place. La question du branchement optimal des ballons dans ce genre de cas reste ouverte et serait à traiter par ailleurs.

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 est rehaussée par la chaudière, via un échangeur, avant d'être distribuée. Le retour du bouclage ECS arrive dans ce ballon.

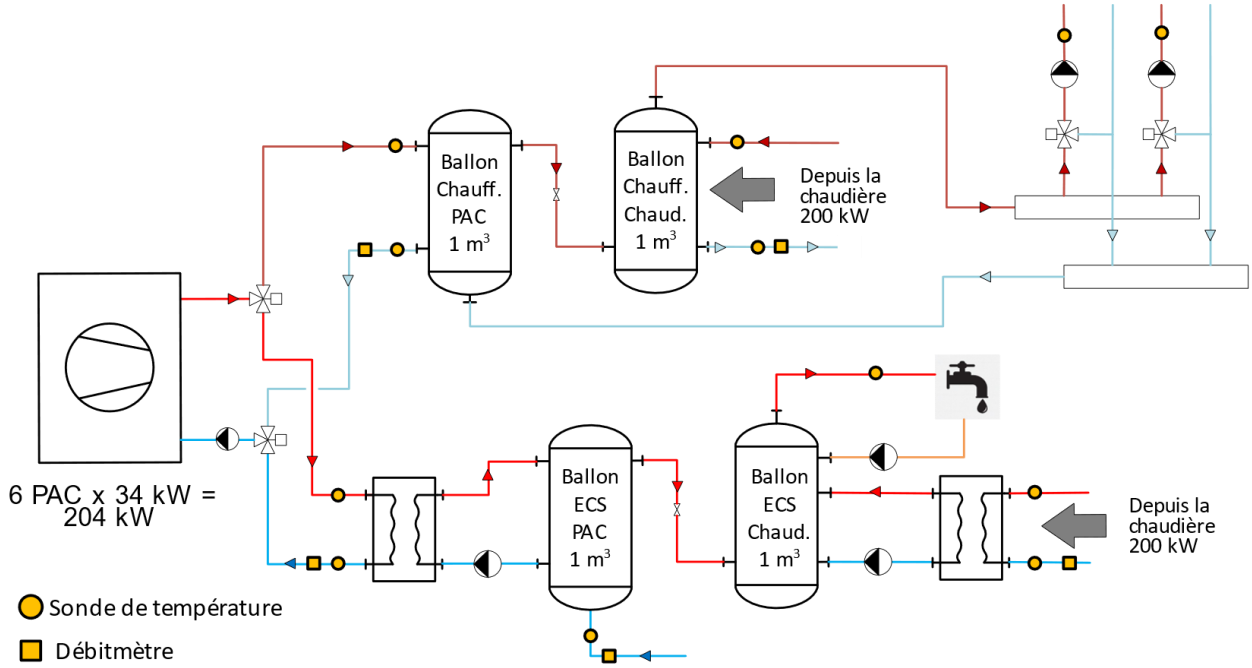


Figure 14 : Schéma hydraulique simplifié de l'installation « Daru » : énergie finale, production et distribution de chaleur, avec points de mesure principaux. Les six PAC en toiture sont représentées schématiquement par une seule machine. La puissance des PAC est indiquée pour 7°C en entrée d'évaporateur et 45°C en sortie de condenseur.

2.3.3 Bilan énergétique annuel

Le bilan énergétique annuel effectué sur la période du 1er juillet 2018 au 30 juin 2019 est présenté dans la Figure 15 (diagramme de Sankey).

La production de chaleur (94 kWh/m²) est 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. 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. 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 DJ18/12 selon [4], 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.

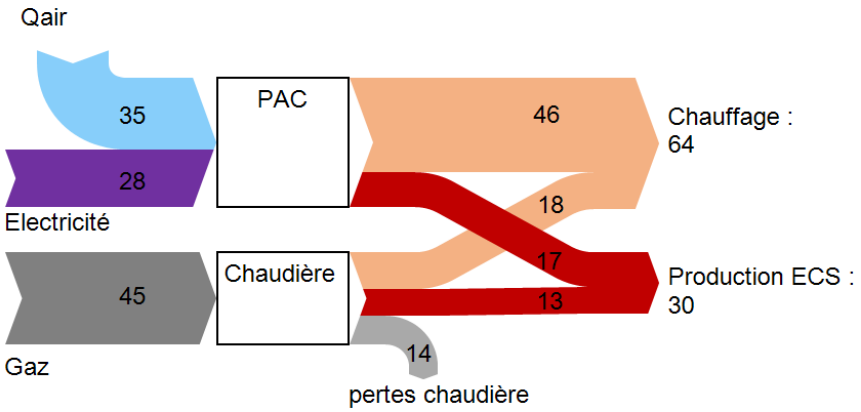


Figure 15 : Diagramme de Sankey du projet « Daru » pour la période du 1er juillet 2018 au 30 juin 2019 (kWh/m²/an).

2.3.4 Régulation de la cascade

La gestion de la cascade est effectuée par le logiciel interne des PAC, avec une régulation de type maître/esclave, dans l'idée de : i) tester la régulation interne des PAC de villa pour gérer une cascade de PAC pour le résidentiel ; ii) éviter de mettre en place un système MCR et ainsi de diminuer l'investissement initial. A noter que, selon le fournisseur, lorsqu'on travaille avec plus de trois machines de ce type, il est préférable d'utiliser un système MCR pour gérer la cascade.

Au total, le système comporte 6 PAC dont 3 PAC destinées uniquement au chauffage, tandis que les 3 autres assurent prioritairement la production d'ECS, tout en ayant la possibilité de fournir de la chaleur pour le chauffage. Chaque PAC comporte 2 compresseurs « scroll » et opère à débit de circulation fixe (5 m³/h).

Pour ce modèle de PAC, une PAC « master » ne peut gérer que 2 PAC « slave ». Comme il y a 6 PAC sur ce site, le système est régulé par 2 PAC « master », indépendantes l'une de l'autre. Chacune contrôle donc 2 PAC esclave comme le montre la Figure 16. Les deux PAC « master » ne communiquent pas entre elles. Par ailleurs la PAC Master 1 est en charge de la chaudière et gère d'autres composants de la chaufferie tels que les vannes de départ chauffage et les circulateurs.

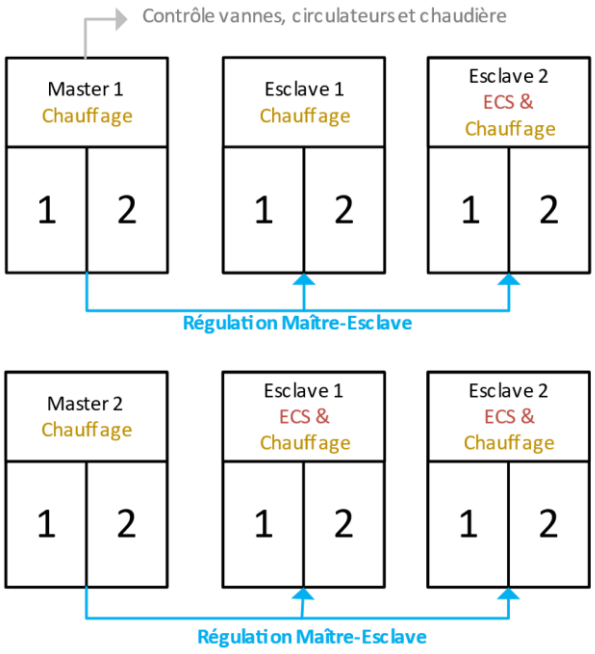


Figure 16 : Diagramme simplifié de la régulation maître/esclave de l'installation « Daru ». Les nombres 1 et 2 font référence aux nombre compresseurs de chaque PAC

Cascade en mode chauffage

La Figure 17 montre la régulation de la cascade en mode chauffage. Pour la production de chaleur pour le chauffage, les PAC sont régulées par une gestion maître-esclave. Chaque PAC « master » a une sonde de température dans le ballon de chauffage. La température de consigne est définie par une courbe de chauffe et une hystérésis.

Les PAC « master » gèrent l'activation de leurs PAC esclaves, y compris les compresseurs de chacune. La gestion de la cascade se fait avec une « temporisation » paramétrable. Tant que la consigne n'a pas été atteinte, les compresseurs sont activés de façon successive, avec un délai d'activation. Les compresseurs appelés en premier sont ceux qui ont les moins d'heures de fonctionnement.

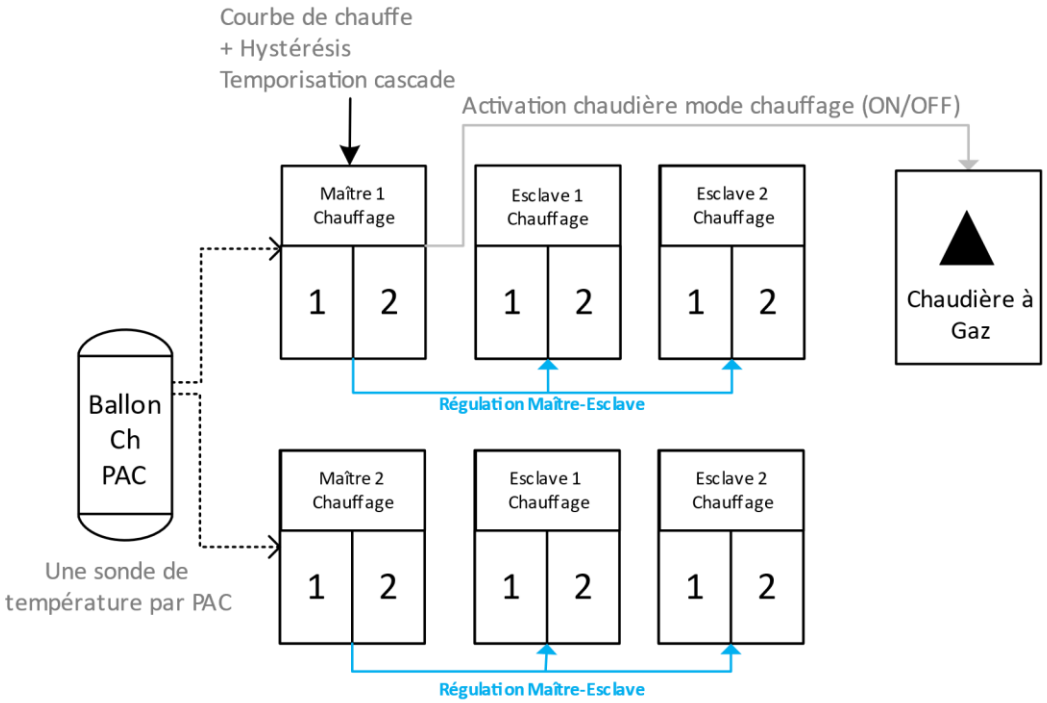


Figure 17 : Diagramme simplifié de la régulation « Master-Slave » en mode chauffage. Les nombres 1 et 2 font référence aux compresseurs de chaque PAC.

Pour rappel, l'avantage de la régulation maître/esclave est que l'algorithme interne équilibre les heures de fonctionnement des PAC, mais aussi des compresseurs. D'autre part, tout changement (temps de dégivrage, consignes) de régulation interne de la PAC « master » se répercute sur les PAC « slave » automatiquement.

Chaudière en mode chauffage

En mode chauffage, la chaudière est pilotée par la PAC Master 1. Le modèle de PAC utilisé pour ce projet ne peut cependant fournir qu'un signal de marche/arrêt à la chaudière, même si la chaudière est modulante. La PAC libère la chaudière, mais la modulation est assurée grâce aux paramètres de la chaudière.

La chaudière s'enclenche en parallèle avec les PAC à condition que :

- la température extérieure soit inférieure à la température de bivalence
- la PAC Master 1 et ses PAC esclaves, avec tous les étages de puissance activés, n'atteignent pas la consigne au bout d'un certain temps. Ce délai est aussi paramétrable.

Le temps d'activation global des cascades entre les masters doit être en accord avec la temporisation de la chaudière. Si le temps d'activation entre chaque PAC est trop long ou que la temporisation de la chaudière est trop courte, la chaudière s'enclenche alors que le système PAC n'a pas atteint sa puissance maximale. En conséquence, la couverture PAC reste faible. Ce phénomène est amplifié par le fait que les PAC master ne communiquent pas entre elles : dès lors il peut arriver que la chaudière s'active, alors que la PAC Master 2 et ses esclaves ne fonctionnent pas encore à pleine puissance.

Cascade en mode ECS

L'activation des PAC en mode ECS n'est pas effectué de la même façon qu'en mode chauffage. Avec le modèle de PAC utilisé il n'existe pas, pour le mode ECS, de communication maître/esclave. Dès lors, chaque PAC ECS fonctionne de façon autonome, avec sa propre sonde de température dans le ballon ECS, comme le montre la Figure 18.

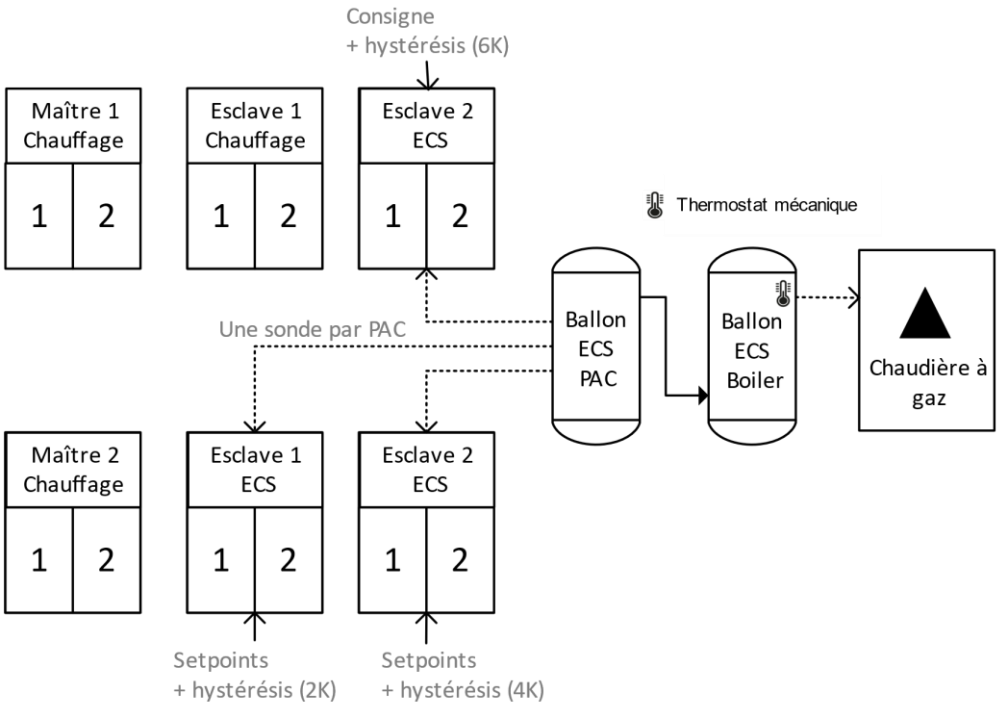


Figure 18 : Diagramme simplifié de la régulation en mode ECS. Les chiffres 1 et 2 représentes le nombre de compresseurs par PAC.

La raison pour laquelle il n'y a pas de gestion maître/esclave en mode ECS, est que ce modèle de PAC est conçu pour des villas, pour lesquelles la demande d'ECS est faible et ne nécessite que rarement plus d'une machine. L'algorithme de gestion de la cascade en mode ECS n'a donc pas été intégré dans ce modèle de PAC.

Pour créer une cascade, il a donc fallu définir manuellement la même consigne dans chaque machine avec des « hystérèses décalées » (ex : 50°C + 1K, 50°C + 2K, etc.). Puisque la machine ayant l'hystérèse la plus faible s'enclenche premier, elle opère plus que celle ayant l'hystérèse la plus élevée. Dès lors, ces hystérèses sont interchangées annuellement, pour équilibrer les heures de fonctionnement des PAC ECS et de leurs compresseurs. Les « hystérèses décalées » servent uniquement à activer chaque PAC, mais l'activation des compresseurs reste gérée par la temporisation interne de chaque machine.

Si on souhaite activer les machines en même temps, il faut avoir la même hystérèse et la même consigne dans chaque machine.

Chaudière en mode ECS

La régulation interne de la PAC ne permet pas de libérer la chaudière en mode ECS. Par conséquent, un thermostat mécanique placé dans le ballon ECS donne le signal d'activation (ON) à la chaudière. Les PAC chauffent le ballon jusqu'à 55°C et la chaudière maintient son ballon au-dessus de la température indiquée dans le thermostat (50 – 60°C, selon les périodes).

2.3.5 Couverture des besoins par les PAC

Cette section présente les problématiques rencontrées et les optimisations effectuées au cours du suivi de ce projet pilote. Le pourcentage de couverture PAC par rapport à la chaudière a été utilisé comme indicateur pour faire le suivi de la gestion de la cascade en mode chauffage et ECS. Lorsque la cascade n'est pas

gérée de manière optimale, les PAC ne fournissent pas la puissance pour laquelle elles ont été dimensionnées, en bivalence avec la chaudière. En conséquence, la chaudière rattrape le manque de puissance des PAC.

Nous allons tout d'abord expliquer l'évolution du pourcentage de couverture des PAC pendant les périodes de chauffage, en relation avec les optimisations et problématiques du mode chauffage. Afin d'observer plus en détail l'influence des optimisations effectuées en mode ECS, elles seront traitées séparément dans la section suivante.

Chauffage

La Figure 19 présente la dynamique de production mensuelle de chaleur par les PAC et la chaudière à gaz, décomposée entre la production pour l'ECS et pour le chauffage de juillet 2018 à juin 2020. Cette même décomposition est présentée sous la forme de pourcentage dans la Figure 19.b. Les lignes en pointillé rouge représentent la part produite par les PAC (ECS et chauffage), en moyenne glissante sur 3 mois. Par ailleurs, le Tableau 5 renseigne la couverture PAC annuelle sur la période de suivi du système.

Tableau 5. Couverture PAC annuelle (juillet à juin) sur la période de suivi du système.

	2017-2018	2018-2019	2019-2020
Couverture PAC annuelle	50%	67%	67%
Estimation sans pannes	-	81%	-

Au cours de ces trois années, la part de couverture PAC mensuelle a augmenté significativement, passant d'environ 40% durant le premier hiver à 75-90% à la fin du dernier hiver. Sur une base annuelle, la couverture PAC passe de 50% la première année de suivi, à 67% les deux années suivantes. Sans les problèmes rencontrés à l'automne 2018 et au printemps 2019 (voir détails ci-dessous), on estime que la couverture PAC aurait été d'environ 80% sur la deuxième année de suivi.

Cette augmentation est due aux optimisations dans le système hydraulique (abordées en détail dans le projet AirBiVal, section 3.4.6, [1]) et à des ajustements dans la régulation de la cascade en mode chauffage. Durant ces périodes, l'ECS représente uniquement 20% de la production mensuelle, si bien que les dysfonctionnements ou optimisations du mode ECS sont moins notables.

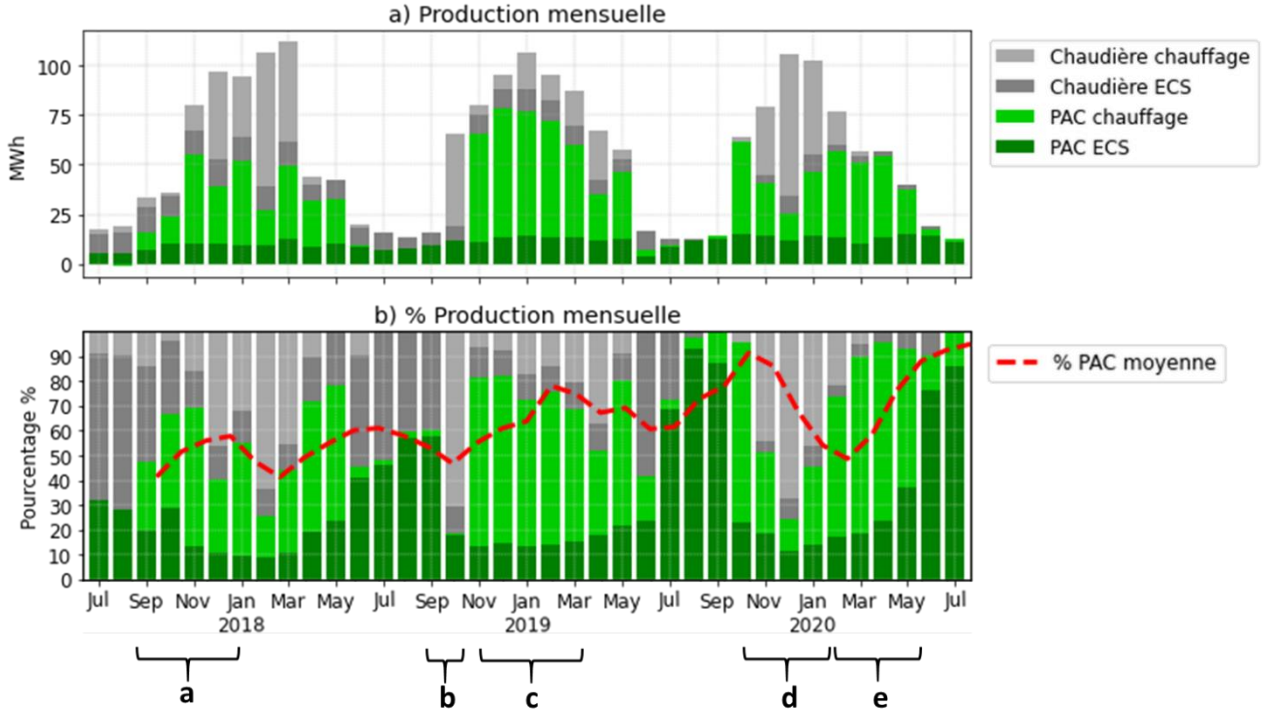


Figure 19 : Evolution de la production mensuelle de chaleur par les PAC et la chaudière à gaz, décomposée entre la production pour l'ECS et pour le chauffage

Les principales optimisations et problématiques en mode chauffage sont présentées dans l'ordre chronologique avec des lettres ci-dessous et sont répertoriés dans la Figure 19.

a) Durant la première saison de chauffe (hiver 2017-2018), la part de couverture PAC a été la plus faible parmi les trois années d'exploitation (40-55% en moyenne mensuelle). Cela est dû à de nombreuses pannes des PAC liées à des températures de retour en chauffage élevées qui ont multiplié les périodes durant lesquelles la chaudière assurait la production de chaleur pour le chauffage. Ce problème a été partiellement résolu par une modification du système hydraulique (pour plus de détails, se référer au rapport du projet AirBiVal [1].

b) Au début de la deuxième saison de chauffe (octobre 2019), les PAC assurent uniquement 20% de la production. Ceci est la conséquence d'une vanne manuelle restée fermée lors de la mise en fonction du chauffage. La vanne en question a ensuite été ouverte fin novembre 2019.

c) Hors période de pannes (novembre 2018 – mars 2019), la PAC couvre en moyenne 70% à 80% des besoins totaux. Entre mars et avril 2019, la demande en chauffage a été assurée par la chaudière suite à des pannes des PAC assurant le chauffage.

d) Après novembre 2019, il y a une diminution marquée de la part PAC, qui varie entre 20 et 40%. L'ancienne chaudière non modulante commençait à dysfonctionner : elle devait opérer à pleine charge pour pouvoir fonctionner. Elle a alors été remplacée par une chaudière modulante en décembre 2019. Cependant, ce remplacement n'a pas eu de bénéfice visible sur la cascade car la nouvelle chaudière fonctionnait à puissance fixe, dû à un câblage inadapté entre la chaudière et son circulateur.

e) À la fin de cette 3ème période de chauffage (février à mars 2020), la PAC assure environ 80-90% de la production. C'est le pourcentage le plus élevé obtenu, si on fait la comparaison avec les mêmes mois des deux années passées. Ceci est la conséquence d'une augmentation du délai pour libérer la chaudière en mode chauffage (de 30 min à 90 min), qui a permis de laisser plus de temps aux PAC pour monter en puissance avant que la chaudière ne s'active. Auparavant, la PAC Master 1, après avoir activé tous les compresseurs de ses esclaves, libérait la chaudière, même si la PAC Master 2 n'avait pas encore activé tous ses étages de puissance. En conséquence, la part de production chaudière était plus élevée. Une autre solution possible consisterait à réduire le temps d'activation des compresseurs, afin d'activer plus rapidement la cascade avant de libérer la chaudière. Cependant, ce paramètre était bridé et seul le fournisseur pouvait le modifier. De plus, un temps d'activation trop court des compresseurs pourrait les endommager.

Par ailleurs, la faible couverture PAC est partiellement due à la programmation des cycles de dégivrage. En effet, la PAC ne sait pas s'il y a du givre ou non sur les évaporateurs. Ainsi, en-dessous d'une certaine température extérieure, les PAC dégivrent de manière automatique à intervalles de temps réguliers. Ceci réduit la puissance disponible pour la production de chaleur, et la chaudière rattrape la puissance manquante. L'impact de ces cycles programmés n'a cependant pas été quantifié dans le cadre de cette étude.

ECS

La Figure 20 présente la dynamique de production de chaleur mensuelle en ECS par les PAC et la chaudière. Les principales optimisations et problématiques en mode ECS sont présentées dans l'ordre chronologique avec des lettres ci-dessous, tels que répertoriés dans la Figure 20.

a) Durant les trois premiers mois du suivi (juillet – novembre 2017), la PAC couvre uniquement 35 à 37% de la production mensuelle. En effet, la cascade de PAC en ECS chauffe le ballon à 40°C, tandis que la chaudière surchauffe son ballon à 68°C. Comme résultat, la part PAC est faible.

b) En octobre 2017, le pourcentage PAC en ECS a augmenté à 50%, car la consigne des PAC a été augmentée à 45°C, et celle de la chaudière diminuée à 62°C.

c) Entre juillet et août 2018, il y a une augmentation soudaine de 50% à 58% de la part PAC mensuelle. La consigne de la PAC a à nouveau été augmentée (à 50°C) et les hystérèses de chaque PAC ECS ont été réduites de façon à répondre plus rapidement à la demande et diminuer la part de la chaudière.

d) En juillet 2019, la couverture PAC en ECS est passé de 60 à 100% en valeur mensuelle. La chaudière a été arrêtée manuellement, afin de tester si les PAC pouvaient répondre seules à la demande sans péjorer le confort en ECS. Comme le résultat était positif puisqu'aucune plainte des usagers n'a pas été émise, les PAC ont fonctionné sans la chaudière jusqu'à la période de chauffage. Par

ailleurs, la même hystérèse et consigne ont été fixées dans chaque machine de telle sorte à activer toutes les PAC ECS en même temps. Comme résultat, les cycles ont commencé à être très courts et plus nombreux.

e) À la fin de la période de chauffage 2020 (mars à mai 2020), le pourcentage de couverture PAC en ECS est autour de 80% mensuel. L'effet de l'activation immédiate des PAC ECS, en combinaison avec la diminution de la consigne de la chaudière à 60°C (voir détails Figure 21), a ainsi permis d'augmenter la production de la PAC et de diminuer la part de la chaudière en ECS.

Il est donc important d'ajuster les niveaux de température entre les PAC et la chaudière, afin d'éviter une surproduction de la chaudière et de favoriser la production de chaleur par les PAC. Notamment, la chaudière ne devrait pas produire à des températures plus élevées que nécessaire.

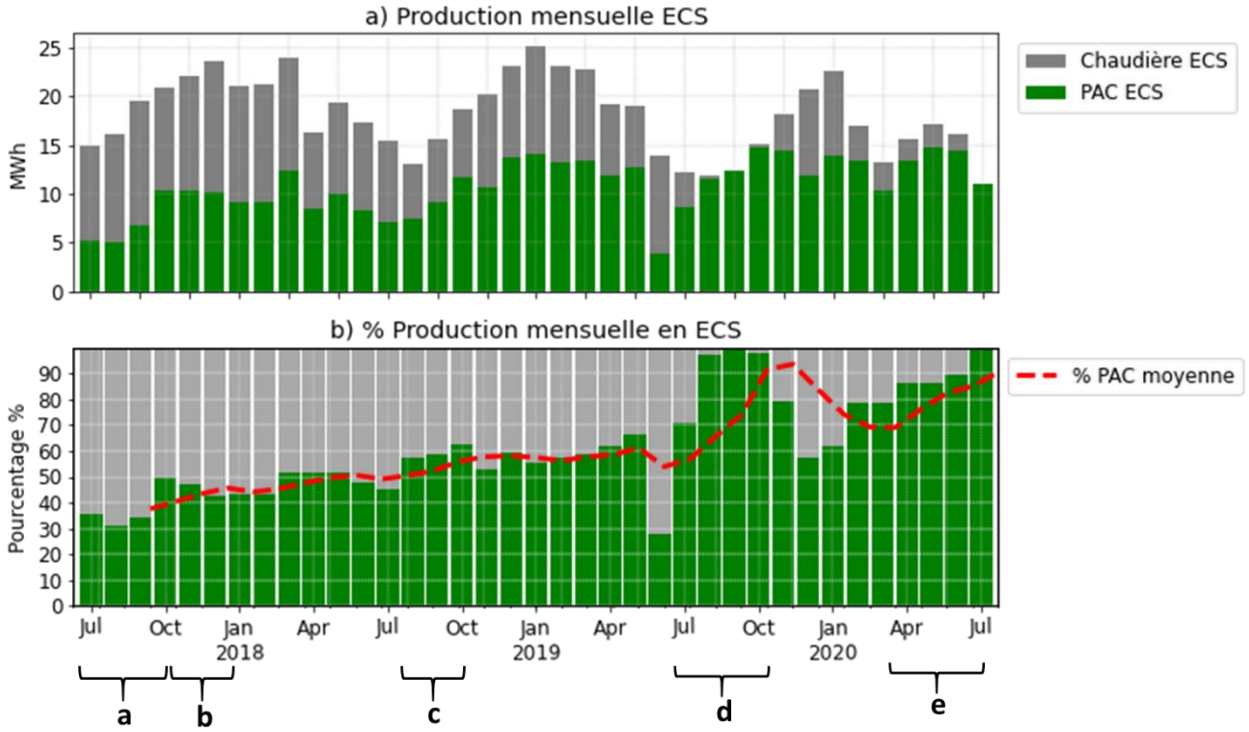


Figure 20 : Evolution de la production mensuelle de chaleur par les PAC et la chaudière à gaz pour l'ECS

2.3.6 Jours typiques en ECS

La Figure 21 compare deux journées représentatives, par tranche de 5 minutes, avec une couverture mensuelle de la PAC en ECS de 45% (juin 2018) et 90% (juin 2020).

La Figure 21.a montre une journée typique du mois de juin 2018. Les PAC maintiennent le ballon entre 40°C et 47°C, avec des hystérèses décalées (7K, 5K, 1K). On observe 11 cycles d'enclenchements des PAC avec une durée moyenne de 1h. La chaudière a une consigne distincte de celle de la PAC : elle surchauffe son ballon de 60 à 68°C, avec 12 activations par jour.

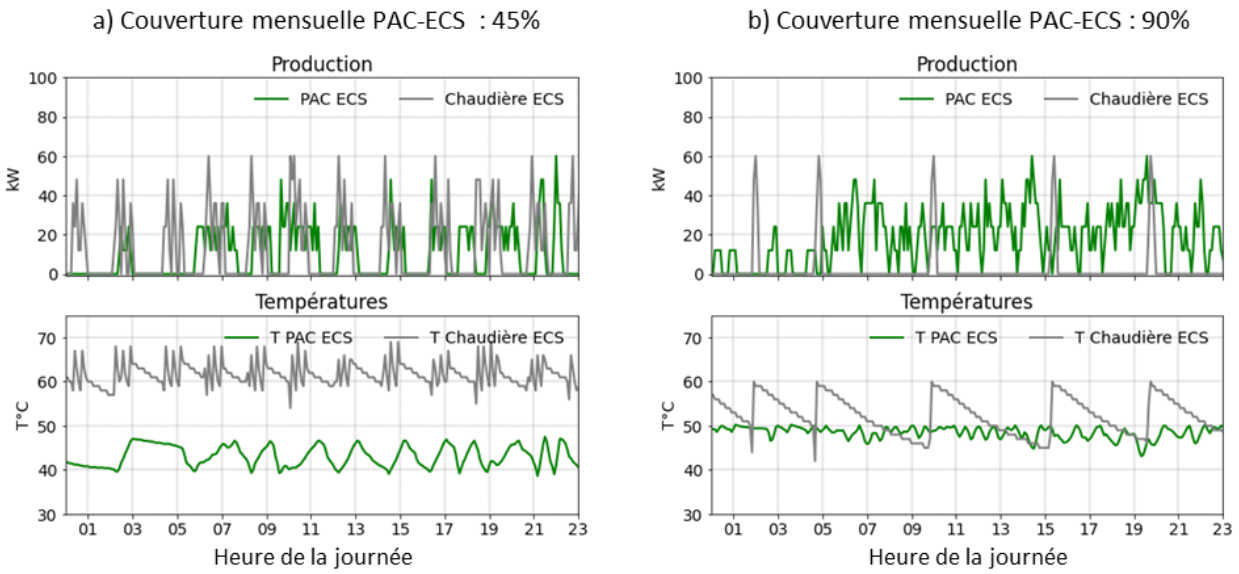


Figure 21 : Journées représentatives du mode ECS, par tranche de 5 minutes, avec une couverture mensuelle de la PAC en ECS de 45% (6 juin 2018) et 90% (6 juin 2020).

La Figure 21.b montre une journée typique de juin 2020. Par rapport à l'été 2018 (Figure 21.a), la consigne des PAC a été augmentée et celle de la chaudière diminuée. Les PAC maintiennent le ballon entre 47°C et 50°C, avec la même hystérèse dans chaque PAC (3K). Toutes les machines sont donc activées en même temps. Par ailleurs, la chaudière maintient son ballon entre 50 et 60°C. À la différence de la journée de la Figure 21.a, la chaudière ne s'active que de façon très ponctuelle, augmentant considérablement la part couverte par les PAC. Par contre, les cycles des PAC sont très courts et plus nombreux, avec le risque de réduire la durée de vie des machines.

2.4 Conclusions des retours d'expérience

Bien que les deux systèmes soient capables de répondre à la totalité de la demande de chaleur de ces bâtiments non rénovés, des problèmes ont été identifiés et divergent selon le projet. Une liste qui résume les problèmes rencontrés sur les sites pilotes se trouve dans l'Annexe I.

St-Julien (système monovalent)

Le système de production est constitué de deux PAC air-eau de type industrielles et chaque PAC comporte 4 compresseurs « scroll ». Du fait que les étages de puissance soient répartis en seulement deux machines, la gestion de la cascade est simplifiée. Les principales conclusions de ce retour d'expérience quant à la gestion de la cascade de PAC sont les suivantes :

- Bien que la régulation maître/esclave soit suffisante pour gérer la cascade de 2 PAC (y.c. leurs compresseurs), il s'est avéré que le fonctionnement 24h/24 de la pompe de circulation de la PAC esclave était nécessaire à la régulation. Cette pompe étant à débit fixe, la consommation d'électricité qui en résultait était élevée et péjorait le COP du système. Cela a amené à utiliser le système MCR pour gérer l'activation des deux PAC, et la régulation interne de chaque PAC pour commander l'enclenchement de leurs compresseurs.
- L'analyse de l'influence de la temporisation de la cascade sur les indicateurs d'activité des PAC mène aux observations suivantes :
  - En été, le délai d'activation des compresseurs n'a pas beaucoup d'influence sur la fréquence des cycles.
  - En hiver, le nombre de cycles par jour et la durée des cycles sont plus sensibles au délai d'activation des compresseurs. Avec un délai d'activation court de la cascade, la consigne est atteinte plus rapidement. En revanche, les cycles deviennent très courts et nombreux, ce qui

risque d'endommager les compresseurs. A l'inverse, avec un délai d'activation long, la consigne est atteinte plus lentement et les cycles deviennent parfois très longs (> 120 min).

- En raison d'un faible volume de ballon en chauffage (lié à un manque d'espace dans la chaufferie) et de PAC surdimensionnées (à cause de l'incertitude sur l'évaluation de la demande), avec des délais d'activation faibles, les cycles ont tendance à être courts et nombreux.

Daru (système bivalent)

Le système de production est constitué de 6 PAC air-eau de type villa en bivalence avec la chaudière existante. Le regroupement de petites PAC conçues pour les villas est un avantage concernant la répartition du poids sur la toiture. En revanche, il en résulte un niveau de complexité élevé en termes de régulation, puisqu'il est nécessaire de combiner le fonctionnement d'un grand nombre d'unités en cascade, avec l'ancienne chaudière existante. Les principales conclusions de ce retour d'expérience quant à la gestion de la cascade de PAC sont les suivantes :

- La régulation maître/esclave de ce modèle de PAC de villa n'est pas suffisante pour gérer la cascade de 6 PAC, et encore moins la bivalence avec une chaudière. Les machines manquent de certaines fonctionnalités adaptées à ce contexte, comme le pilotage de plus de trois PAC en cascade.
- En bivalence, si la cascade n'est pas bien gérée, la couverture PAC reste faible. En particulier, la temporisation de la cascade de PAC (y.c les compresseurs) doit être en adéquation avec l'activation de la chaudière.
- Durant les trois années de suivi, la couverture PAC mensuelle est passée de 40% à 80%, en raison d'ajustements au niveau du système hydraulique (abordés en détail dans le projet AirBiVal, section 3.4.6), ainsi qu'au niveau de la régulation de la cascade. Il s'agit notamment d'ajustement des niveaux de température entre les PAC et la chaudière, ainsi que du réglage de la temporisation avant la libération de la chaudière. Pour y parvenir, un suivi minutieux sur 3 années de fonctionnement a été nécessaire.

Il convient de noter que les deux études sont des cas différents à la fois en termes de configuration du système (monovalent versus bivalent) et de choix des PAC (grandes unités industrielles versus petites unités conçues pour les villas). Cependant, la configuration du système et le type de PAC ne sont pas intrinsèquement liés : en principe, les grandes unités pourraient également être utilisées dans des configurations bivalentes, ou les petites unités en mode monovalent (à condition d'une température de production suffisante pour couvrir l'ECS).

Au final, que l'on utilise des PAC conçues pour le secteur industriel ou pour les villas, certaines fonctionnalités manquent parfois pour gérer efficacement une cascade de PAC dans le contexte des immeubles résidentiels collectifs existants, sans avoir à recourir à une régulation externe. Dans les deux projets, il a finalement été nécessaire d'employer un système MCR pour compléter la régulation interne des PAC. Le développement de modèles de PAC disposant de fonctionnalités adaptées à ce contexte spécifique permettrait de faciliter l'intégration des PAC et de rendre ce type de système plus accessible économiquement.

Au-delà des lacunes de certains modèles de PAC dans ce contexte, les deux sites pilotes ont permis de démontrer l'importance du réglage du délai entre l'activation des étages de puissance de la cascade. Une attention particulière doit être portée à ce paramètre, que ce soit pour éviter les courts-cycles, pour maintenir le confort des usagers ou encore pour atteindre une couverture PAC élevée en cas de bivalence. C'est pourquoi, ce délai d'activation est étudié plus en détails dans le chapitre suivant par le biais de simulations numériques et d'analyses de sensibilité portant sur des conditions fréquemment observées sur le terrain (différents niveaux de demande, sous- ou surdimensionnement de la PAC, volume de ballon limité, etc.).

Chapitre 3
Modélisation des cascades

L'analyse de sites pilotes, présentée au chapitre précédent, a montré que les paramètres d'enclenchement de la cascade de PAC jouent un rôle déterminant dans le fonctionnement du système. Plus particulièrement, le choix du délai entre l'activation des étages de puissances (PAC et compresseurs) influe à la fois sur la durée de vie des PAC et sur le confort des usagers. Un délai d'activation trop rapide risque d'endommager les compresseurs mais permet de respecter le confort des usagers, tandis qu'un délai trop lent préserve les PAC mais péjore le confort.

En pratique, ce délai d'activation est un paramètre fixe pour toute l'année. Cependant, le retour d'expérience du site pilote « St-Julien » a montré que, à cause de la variation de la capacité de la PAC et de la demande de chaleur en fonction de la température extérieure, un délai d'activation peut convenir pour une période de l'année, mais pas nécessairement pour l'année complète et pour les deux modes d'opération (chauffage/ECS).

Ce chapitre s'intéresse à l'impact du choix de ce délai d'activation sur le fonctionnement du système. Pour ce faire, des modèles numériques sont mis en place à l'aide du logiciel TRNSYS. On évalue tout d'abord l'effet du délai sur divers indicateurs, tels que la durée des cycles ou le confort, pour des systèmes monovalents couramment rencontrés. On effectue ensuite une analyse de sensibilité sur la demande de chaleur et les caractéristiques de l'installation (volume du ballon, puissance de la PAC, etc.). Le but est d'identifier les paramètres les plus influents et d'émettre des recommandations quant au réglage du délai d'activation de la cascade et au dimensionnement du système. Comme il n'existe pas de machines à variation de puissance continue dans les gammes de puissance considérées dans ce projet, celles-ci ne sont pas étudiées.

Dans le cadre de cette étude, nous ne nous intéressons pas aux effets de la gestion des cascades (charge partielle, marche/arrêt) sur la consommation d'électricité, qui ne sont pas intégrés dans le modèle de simulation.

3.1 Description du modèle

Le modèle utilisé dans ce projet s'appuie sur celui réalisé dans le cadre du projet AirBiVal [1] à l'aide du logiciel de simulation TRNSYS [5]. Ce modèle a été calibré et validé à partir de mesures in-situ du site pilote « St-Julien » sur une année complète. Il a ensuite été normalisé de sorte à obtenir un cas de référence, sans les spécificités propres au site pilote. Cette normalisation consiste à simuler le système pour : i) une année climatique de référence pour Genève selon la norme SIA 2028 [6]; ii) une demande de chauffage de 101 kWh/m².an, plus représentative du parc immobilier suisse moyen [7] ; iii) une demande d'ECS (35 L/jour.hab), un profil de soutirage horaire et un volume de ballon déterminés selon la norme SIA 385/2 [8] ; iv) un dimensionnement de la PAC et du ballon de chauffage standard selon les règles de l'art, en fonction de la demande de chauffage simulée. Afin d'examiner les aspects du système relatifs à la gestion en cascade des PAC, plusieurs modifications ont été apportées au modèle de référence du projet AirBiVal. Ces modifications concernent la variation de la puissance fournie par les PAC, ainsi que du débit des pompes qui les alimentent.

Dans le cadre du projet AirBiVal, la puissance PAC définie lors du dimensionnement du système est simulée comme une seule PAC de type « inverter » avec puissance et débit variable. La PAC module sa puissance par rapport aux besoins en ECS ou chauffage en maintenant une température de retour de consigne. Dans le cadre de ce projet, la puissance totale installée est divisée en étages de puissance, qui peuvent représenter soit plusieurs PAC à pleine puissance, soit une PAC à plusieurs compresseurs. Le nombre d'étages de puissance est fixé à 4 pour l'ensemble des simulations. Ce choix est basé sur le fait que chaque PAC du projet pilote « St-Julien » disposent de 4 étages de puissance, pour lesquelles des données détaillées sur l'activation de chaque compresseur (durées de cycles, cycle par jour, etc.) sont disponibles avec une

résolution de 5 minutes. Cela permet de comparer les résultats de la simulation aux observations du projet pilote.

La puissance disponible de la PAC est fonction de la température de retour (côté condenseur) et de la température extérieure. Elle est évaluée selon les données du fabricant du modèle de PAC utilisé sur le site pilote « St-Julien ». Étant donné que la puissance du fabricant est renseignée pour un fonctionnement à pleine charge, la puissance instantanée fournie (Q_{PAC}) pour n étages activés est la puissance du fabricant multipliée par le ratio entre le nombre d'étages activés (n) et le nombre maximal d'étages (n_{max}), comme le montre l'équation suivante :

$$Q_{PAC} = Q_{max} * \left(\frac{n}{n_{max}}\right) \quad (1)$$

où :

- Q_{max} représente la puissance de la PAC air-eau du fabricant (en kW) à pleine charge, pour une température de retour (côté condenseur) et une température extérieure donnés.
- n est le nombre d'étages de puissance activés.
- n_{max} est le nombre d'étages maximal (nombre de compresseurs ou nombre de PAC).

De même, la pompe de circulation varie son débit par paliers en fonction du nombre d'étages de puissance activés, tel que :

$$V_{PAC} = V_{max} * \left(\frac{n}{n_{max}}\right) \quad (2)$$

où V_{max} est le débit requis à pleine puissance, c'est-à-dire pour $n = n_{max}$.

Cette méthode de modélisation de la PAC est résumée dans la Figure 22.

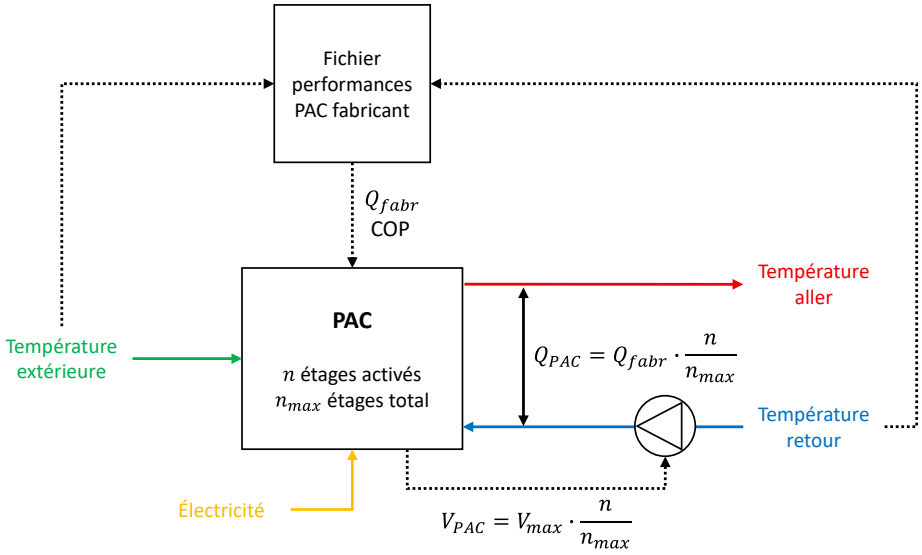


Figure 22 : Schéma résumé de la modélisation de la PAC

Comme observé dans le cas des projets pilotes de St-Julien et de Daru (en mode chauffage), la gestion de la cascade entre les machines (y.c. les compresseurs) se fait avec une temporisation (Δt) entre l'activation des différents étages de puissance. Cette même gestion en cascade a été reproduite dans la simulation pour activer successivement les 4 étages de puissance. Les étages sont enclenchés de façon successive après un délai d'activation, tant que la température dans le ballon (chauffage ou ECS) est inférieure à la consigne. Plus le temps d'activation est court, plus rapidement la consigne est atteinte. Dans ce chapitre, le temps d'activation fait aussi bien référence au temps d'activation des compresseurs que des PAC, puisque l'on se réfère à la puissance totale installée. Un système disposant de 4 étages de puissance peut donc tout aussi bien représenter un système comportant 4 PAC avec un étage de puissance chacune, ou une PAC avec 4 étages de puissance.

La Figure 23 montre deux exemples avec un temps d'activation de 0 min et 6 min. Dans les deux cas, il s'agit de la réponse à la demande d'ECS pour le même jour et heure. Dans le premier cas, tous les étages de puissance s'activent en même temps, car il n'existe pas de délai d'activation (0 min). Dans le deuxième cas, chaque étage est activé après 6 min, le cycle est donc plus long.

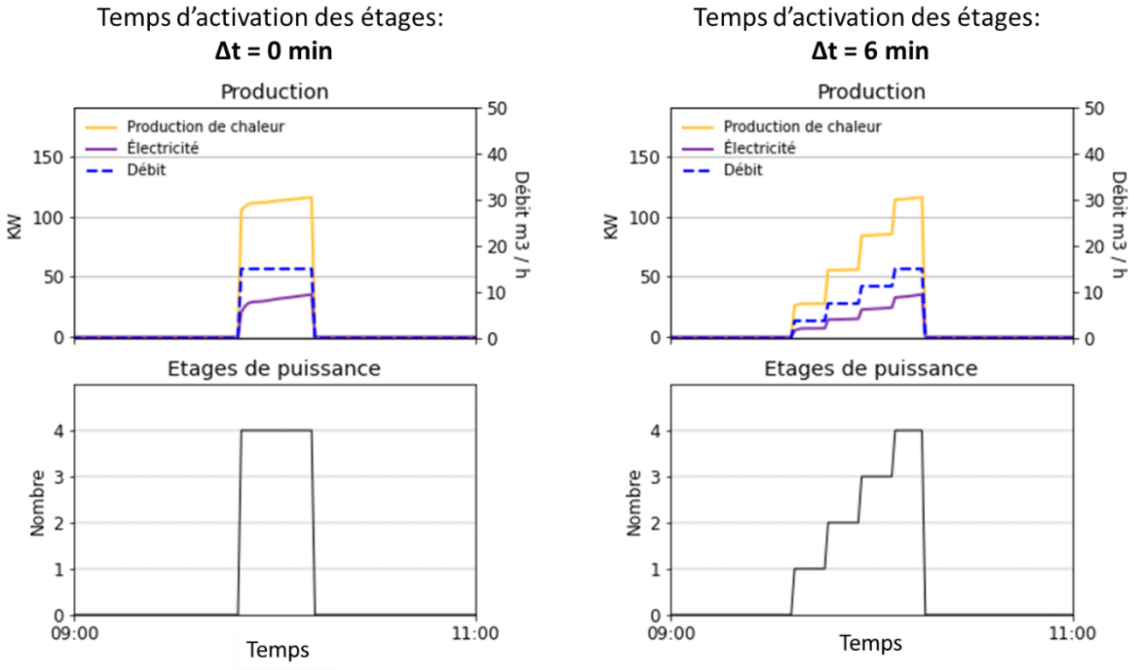


Figure 23 : Exemple de fonctionnement de cascade pour un délai d'activation de 0 min (à gauche) et 6 min (à droite). Dans les deux cas, la PAC a pour consigne de chauffer le ballon de 50 à 60°C (soit une hystérèse de 10°C).

La simulation de la cascade tient compte uniquement de la temporisation pour l'activation des étages de puissance. D'autres temporisations n'ont pas été inclues, comme la désactivation successive des compresseurs/PAC ou l'attente à la fin d'un cycle avant d'en commencer un autre. De même, la péjoration/amélioration de la performance liée à l'opération à charge partielle n'a pas été prise en considération. En revanche, le mode dégivrage est inclus sous la forme d'une dégradation de la puissance disponible à partir d'une température extérieure inférieure à 7°C (déjà prise en compte dans les données de performance du fabricant, voir courbe de performance dans l'Annexe B).

3.2 Indicateurs

Afin d'analyser les résultats des différents systèmes simulés et de les comparer, plusieurs indicateurs sont employés. Le but est d'évaluer l'influence des paramètres du système, tels que le temps d'activation de la cascade ou le dimensionnement, sur les cycles et le confort des usagers. Les trois premiers indicateurs décrits ci-dessous permettent principalement d'assurer la durée de vie de la PAC, et les deux derniers garantissent le respect des consignes de distribution en chauffage et ECS.

- **Nombre d'heures de fonctionnement :** Le nombre total d'heures durant lesquelles la PAC a fonctionné au cours de l'année, c'est-à-dire le nombre d'heures où au moins un étage de puissance est activé parmi les 4 étages de puissance du système.
- **Durée moyenne des cycles :** Il s'agit de la durée moyenne des cycles durant l'année. Cet indicateur permet d'identifier les simulations avec des cycles courts ou longs à cause du temps d'activation de la cascade en combinaison avec le dimensionnement des composants (ballons, puissance de la PAC, etc.). La durée minimale recommandée pour un cycle est de 20 minutes [2]. Cet indicateur est calculé selon l'équation suivante :

(3)

$$Durée\ moyenne = \frac{\sum_{i=1}^{Nb\ cycles\ annuel} Dr_{cycle_i}}{Nb\ cycles\ annuel} = \frac{Dr_{cycle_1} + Dr_{cycle_2} + .. + Dr_{cycle_n}}{Nb\ cycles\ annuel}$$

- **Nombre de cycles par jour moyen :** Il s'agit de la moyenne du nombre de cycles journalier au cours de l'année, tel que décrit dans l'équation (4). Cet indicateur permet d'identifier les cas où la PAC effectue des marches/arrêts fréquents avec le risque d'endommager la machine/compresseur. La durée minimale recommandée pour un cycle est de 20 minutes, soit au maximum 3 démarrages par heure [2]. Si l'on tient compte d'un temps d'arrêt entre deux cycles, on peut donc fixer une limite raisonnable de 2 cycles par heure, soit 48 cycles par jour. C'est aussi une limite exigée par le distributeur d'électricité pour pas trop perturber le réseau électrique avec des démarrages fréquents.

$$Nb_{cycles_jmoyen} = \frac{\sum_{i=1}^{365} Nb_cycles_j_i}{365\ jours} = \frac{Nb_cycles_j_1 + Nb_cycles_j_2 + .. + Nb_cycles_j_n}{365\ jours} \quad (4)$$

  où $Nb_cycles_j_i$ correspond au nombre de cycles du jour i.

- **Confort ECS :** Le confort en mode ECS est défini comme le nombre d'heures de soutirage avec une température de départ supérieure à 50°C (haut du ballon). Celui-ci est divisé par le nombre d'heures de soutirage total pour obtenir un pourcentage annuel. Le choix de 50°C correspond à la consigne pour maintenir le ballon entre 50 et 60°C.

$$\%\ Confort\ ECS = \frac{Nb\ heures\ avec\ départ\ ballon > 50°C\ (avec\ soutirage)}{Nb\ heures\ de\ soutirage} \times 100 \quad (5)$$

- **Confort chauffage :** Le confort en mode chauffage est défini comme le nombre d'heures avec une température de départ supérieure à la courbe de chauffe moins 5K, divisé par le nombre d'heures total de chauffage (input de la simulation) pour obtenir un pourcentage annuel. La marge de 5K en-dessous de la consigne est basée sur l'hypothèse qu'une telle réduction n'affectera pas immédiatement le confort des usagers en raison de l'inertie du bâtiment.

$$\%\ Confort\ chauff. = \frac{Nb\ heures\ avec\ départ\ ballon > Tconsigne\ ballon - 5°C}{Nb\ heures\ avec\ demande} \times 100 \quad (6)$$

Dans le but d'analyser les effets saisonniers, l'écart type des indicateurs est également calculé. Cela permet d'observer la dispersion de ces indicateurs au cours de l'année.

3.3 Systèmes de référence

Pour les deux installations pilotes et les modélisations du projet AirBiVal, les PAC fournissent de la chaleur pour le chauffage et l'ECS alternativement (PAC combinée chauffage & ECS), avec la priorité donnée à la préparation d'ECS. Dans ce projet, la fourniture de ces services est séparée, en simulant une PAC dédiée pour la production d'ECS (PAC-ECS) et une PAC dédiée pour le chauffage (PAC-chauffage).

Le choix de simuler des PAC dédiées permet principalement d'observer le comportement du système indépendamment pour chaque mode et d'en dégager des spécificités qui seraient plus difficilement identifiables avec l'alternance des deux modes. Cependant, pour autant que la place ne soit pas un problème, ce type de système présente également l'avantage de pouvoir : i) adapter la puissance aux demandes respectives ; ii) utiliser des réfrigérants adaptés au niveau de température de chaque mode de fonctionnement, afin d'obtenir des COP plus élevés. La production de chaleur pour le chauffage et pour l'ECS étant alors indépendantes l'une de l'autre, la régulation et l'hydraulique du système est moins complexe que dans le cas où les PAC alternent entre les deux modes de fonctionnement.

En complément, nous étudions également un système où la PAC alterne entre la production d'ECS et de chauffage (PAC combinée chauffage & ECS). Par soucis de simplification (manque de temps pour développer une simulation intégrée des deux modes), la configuration PAC combinée chauffage & ECS est simulée via deux simulations séparées pour PAC-ECS et PAC-chauffage dédiées, avec cependant une puissance de PAC identique pour les deux systèmes (voir explication détaillée à la section 3.3.3).

Le résumé des principaux paramètres des systèmes de référence retenus pour les simulations de la cascade est présenté dans le Tableau 6 et expliqué en détails dans les sous-sections suivantes. Dans tous les cas, le dimensionnement de la PAC et du ballon sont basés sur la méthode utilisée dans le projet AirBiVal, section 5 [1], en considérant une PAC avec 4 étages de puissance. Les demandes des systèmes de référence sont aussi détaillées dans le projet AirBiVal, sections 6.3.1 (Données climatiques et demande de chauffage) et 6.3.2 (Demande d'ECS).

Tableau 6. Résumé des principaux paramètres des systèmes de référence retenus.

Système	PAC-chauffage	PAC-ECS	PAC combinée chauffage & ECS
Demande de chauffage [kWh/m².an]	101	-	101
Demande d'ECS [kWh/m².an]*	-	30	30
Débit soutirage [L/hab.jour]		35	35
Puissance PAC (@ 7°C/45°C) [kW]	208	88	274
Etages de puissance	4	4	4
Débit PAC max. pour 4 étages [m³/h]	35	15	47
Volume du ballon de chauffage [m³]	3.3	-	4.4
Volume du ballon d'ECS [m³]	-	1.9	1.9
Volume ballon/Puissance PAC [L/kW]	16	22	Chauffage : 16 ECS : 7
Température de consigne ballon	Courbe de chauffe + 1°C + 5°C (hystérèse)	50°C + 10°C (hystérèse)	Chauffage : Courbe + 1°C + 5°C (hystérèse) ECS : 50°C + 10°C (hystérèse)
ECS : recirculation	-	0.8 m³/h 12h/jour entre 6h et 23h	0.8 m³/h 12h/jour entre 6h et 23h

* Energie pour la préparation d'ECS. Estimations basées sur une élévation de température de 50 K (10°C → 60°C) et des pertes de stockage et de distribution de 30%.

3.3.1 PAC dédiée ECS

La Figure 24 illustre le schéma hydraulique du système PAC-ECS tel que modélisé. La PAC et le ballon sont dimensionnés selon la norme SIA 385/2, avec pour hypothèses un débit de soutirage de 45 L/hab.jour, des pertes de stockage et distribution de 30%, et 6 cycles de charge par jour d'une durée de 1 h chacun. La PAC est dimensionnée de façon à pouvoir combler cette demande à une température extérieure de -7°C et une température de production de 65°C. Il en résulte une puissance de PAC de 88 kW (en condition de production standard 7°C/45°C) et un ballon de stockage de 1.9 m³.

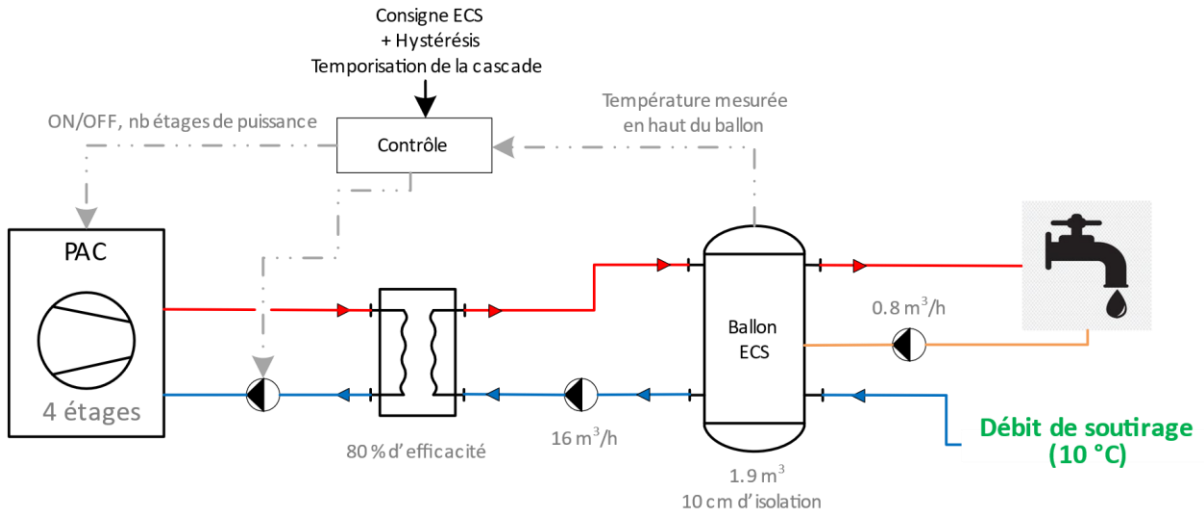


Figure 24 : Schéma du système PAC dédiée ECS simplifié tel que modélisé. L'assemblage TRNSYS se trouve dans l'Annexe D.

La PAC a pour consigne de maintenir le ballon entre 50 et 60°C (soit une hystérèse de 10 K). La demande d'ECS est introduite dans la simulation sous la forme d'un débit de soutirage (valeur horaire) en bas du ballon à une température de 10°C. Elle est fixée à partir du débit de soutirage journalier de la SIA 385/2 pour le résidentiel collectif, soit 35 L/hab.jour, à laquelle sont appliqués les profils intra-journaliers issus de cette même norme. Afin d'obtenir le débit de soutirage total, on considère une SRE de 4'000 m² et une densité de 35 m²/hab, ce qui correspond à un volume de soutirage d'environ 4 m³/jour pour 114 habitants. En considérant que l'ECS est chauffée de 10°C à 60°C (élévation de température de 50 K) et des pertes de stockage et distribution de 30%, la demande s'élève à 30 kWh/m².an. Cette demande correspond à une consommation moyenne du secteur résidentiel collectif [9].

Note : Le système PAC-ECS de référence correspond au système de référence bivalent parallèle du projet AirBiVal en termes de dimensionnement et de demande de chaleur. Dans ce cas, la puissance PAC installée correspond à la puissance requise pour l'ECS, plus élevée que celle requise pour le chauffage.

3.3.2 PAC dédiée chauffage

La Figure 25 illustre le schéma hydraulique tel que modélisé du système PAC-chauffage. La puissance de la PAC est définie de sorte à fournir l'intégralité de la demande journalière maximale en 24 h, avec une température de distribution de 55°C et une température extérieure de -7°C. Il en résulte une puissance de PAC de 208 kW (en condition de production standard 7°C/45°C).

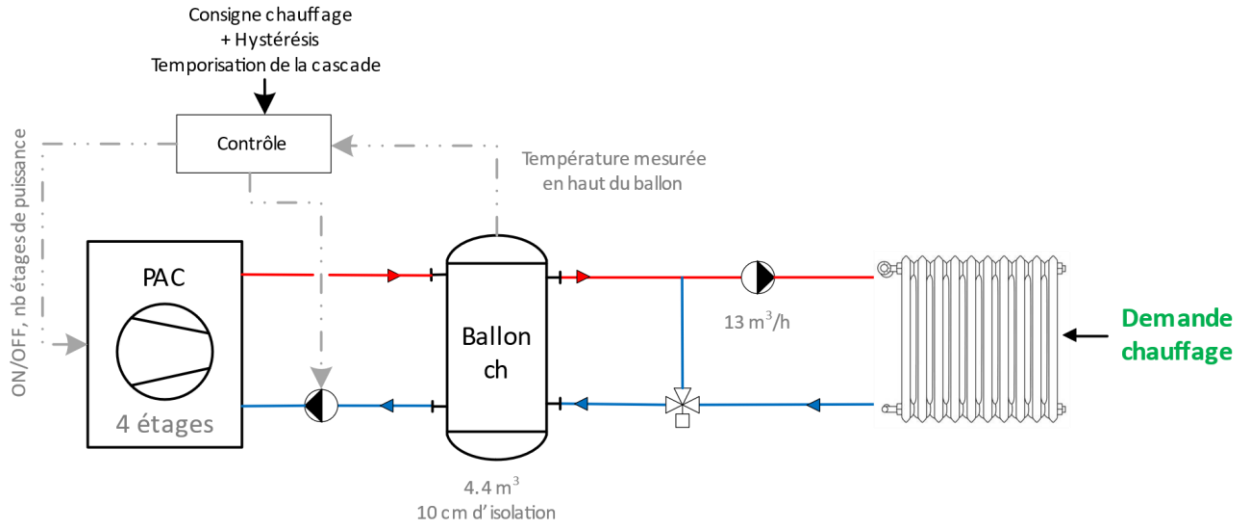


Figure 25 : Schéma du système PAC dédiée chauffage simplifié tel que modélisé. L'assemblage TRNSYS se trouve dans l'Annexe D.

Le ballon est dimensionné de sorte à garantir un temps de fonctionnement de la PAC d'au moins 20 minutes sur sa plus petite puissance, c'est-à-dire pour un seul étage de puissance activé. Le but est d'éviter des enclenchements trop fréquents de la PAC et des cycles trop courts. Le cas critique (faible demande, puissance de PAC élevée) correspond à l'activation de la PAC lorsque la température extérieure est proche de la température de non-chauffage (15°C, par hypothèse). Il en résulte une capacité de 3.3 m³.

La demande de chauffage provient de la signature énergétique mesurée pour le site pilote « St-Julien » en valeur horaire. Celle-ci a été ramenée à une année climatique de référence de la SIA 2028 [6]. Afin de simuler un bâtiment plus représentatif du parc immobilier suisse moyen, les besoins corrigés climatiquement sont ajustés de sorte à atteindre une demande annuelle de 101 kWh/m².an (363 MJ/m².an). Cette demande correspond à la médiane du parc résidentiel collectif « après-guerre » (1948-1980) ou au 9ème décile du parc « fin de siècle » (1980-2010).

La consigne de chauffage est définie à partir d'une courbe de chauffe de jour (5h à 22h) et de nuit (23h à 4h). Ces courbes sont issues des mesures in situ du projet pilote de St-Julien disponibles dans l'Annexe C. La température de coupure est fixée à 16°C (en moyenne journalière) et la distribution de chauffage est entièrement arrêtée entre le 1er juin et le 1er septembre, ce quelle que soit la température extérieure.

3.3.3 PAC combinée chauffage & ECS

Par soucis de simplification (manque de temps pour développer une simulation intégrée des deux modes), la configuration PAC combinée chauffage & ECS est simulée via deux simulations séparées pour PAC-ECS et PAC-chauffage dédiées, avec cependant une puissance de PAC identique pour les deux systèmes (voir dimensionnement ci-dessous).

Dans ce cas, la PAC étant théoriquement réservée pendant 6h à la production d'ECS, la puissance nécessaire au chauffage est calculée pour une production sur 18h, résultant en une puissance de 274 kW et un ballon de chauffage 4.4 m³ (au lieu d'une production sur 24h en mode dédié, résultant en une PAC de 208 kW et un ballon de 3.3 m³, cf. Tableau 6).

Finalement, les deux systèmes dédiés sont simulés avec cette puissance de 274 kW, qui correspond au maximum entre les puissances théoriques pour le chauffage (274 kW) et l'ECS (88 kW). Cela représente un surdimensionnement de 211% par rapport à la puissance du système PAC-ECS de référence.

Malgré cette augmentation de puissance, le volume du ballon ECS reste le même que pour le système de référence (1.9 m³). En effet, selon la méthode de dimensionnement de la SIA 385/2, le ballon est dimensionné par rapport à la demande (45 L/hab.jour) et non pas par rapport à la puissance de la PAC.

Si cette façon de procéder reproduit à priori correctement les effets liés au dimensionnement combiné chauffage & ECS, il ne garantit pas l'alternance temporelle entre les deux modes (la PAC pouvant de fait être disponible simultanément pour l'un et l'autre). Contrairement au cas réel, la simulation ne reproduira par contre pas les effets liés à l'indisponibilité de la PAC pour le chauffage lorsqu'elle produit de l'ECS, ce qui aura pour tendance de : i) sous-estimer la durée des cycles de chauffage : ii) sous-estimer la durée pendant laquelle la consigne du ballon de chauffage n'est pas atteinte.

3.4 Résultats des systèmes de référence

3.4.1 PAC dédiées

Résultats globaux

La Figure 26 montre les résultats des systèmes de référence PAC-ECS (à gauche) et PAC-chauffage (à droite). Pour chaque système de référence, des simulations sont effectuées en faisant varier le temps d'activation (Δt) de chaque étage de puissance de 0 min (activation instantanée de tous les étages) à 18 min, par intervalle de 3 minutes (0 min, 3 min, 6 min, …,18 min). En plus des moyennes annuelles, l'écart-type est calculé pour le nombre de cycles journaliers et la durée des cycles, afin de montrer la dispersion au cours de l'année.

En général, on observe que l'augmentation du temps d'activation de la cascade engendre une augmentation de la durée des cycles et donc du nombre d'heures de fonctionnement annuel. Plus le délai pour activer chaque étage de puissance est élevé, plus la consigne est atteinte lentement. En conséquence, le confort diminue quand le temps d'activation augmente, car la charge du ballon est parfois trop lente pour maintenir le ballon au-dessus de la consigne. Il convient de noter qu'avec une temporisation plus courte, le confort est plus élevé. Cependant, le démarrage rapide de la cascade induit des cycles courts (< 20 min) et plus nombreux, comme c'est le cas du système PAC-chauffage avec une temporisation de 0 à 6 minutes.

A temps d'activation égal, la durée des cycles est généralement plus longue en ECS qu'en chauffage, comme le montre la Figure 26.b. La moyenne s'étend de 36 à 64 minutes pour l'ECS et de 20 à 60 minutes pour le chauffage. Cela vient du fait que pour l'ECS, la PAC doit élever la température de l'eau de 50 K (10°C à 60°C) côté demande, avec une hystérèse de 10 K (50 à 60°C), tandis qu'en chauffage la PAC maintient simplement le ballon à sa consigne, avec une hystérèse plus faible qu'en ECS (5 K). De plus, le rapport entre le volume du ballon et la puissance PAC installée est plus faible en chauffage qu'en ECS (16 L/kW en chauffage contre 22 L/kW pour l'ECS). La charge du ballon de chauffage est donc plus rapide.

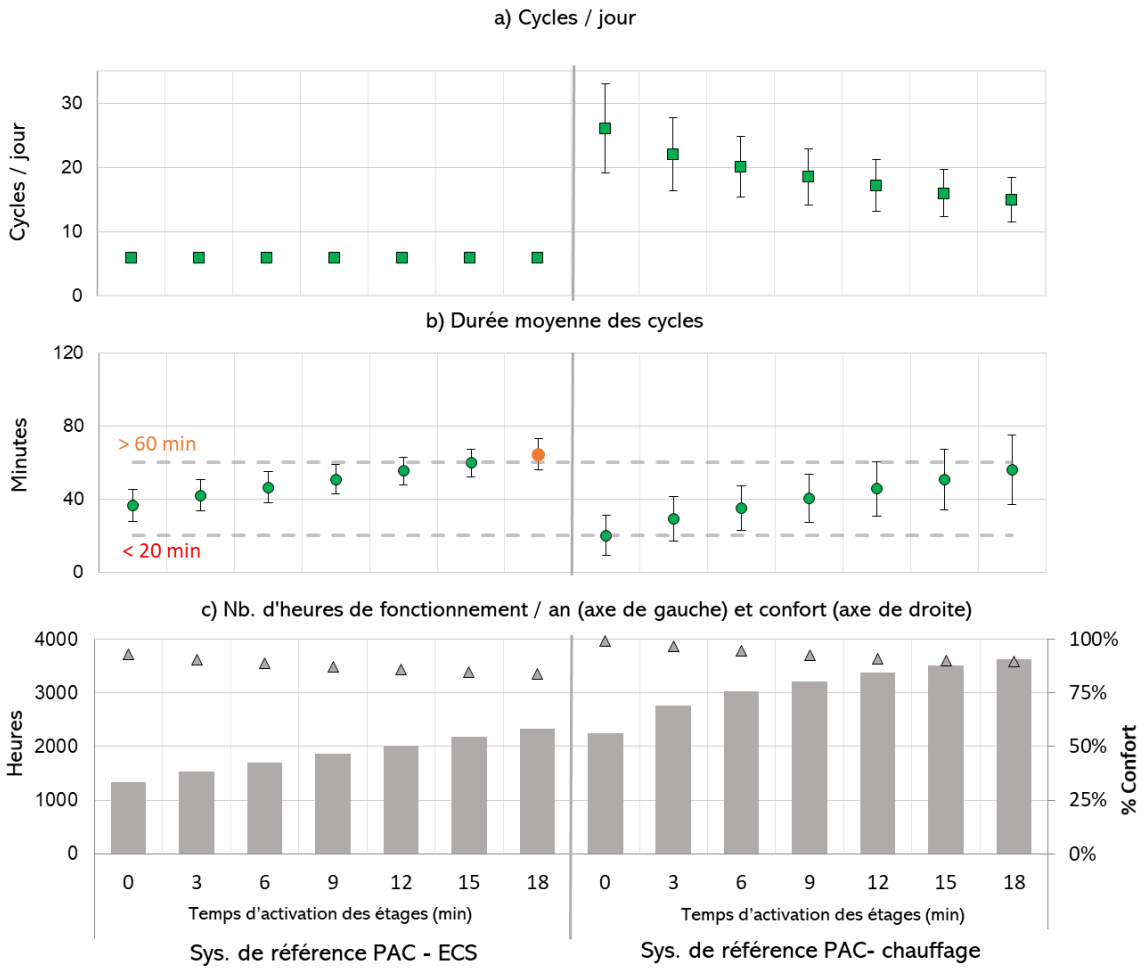


Figure 26 : Résultats des systèmes de référence PAC-ECS (à gauche) et PAC-chauffage (à droite). Pour chaque système le temps d'activation de chaque étage de puissance est varié de 0 à 18 minutes. (a) Le nombre de cycles/jour et (b) la durée des cycles sont des valeurs moyennes au cours de l'année. Chaque valeur moyenne est accompagnée de son écart-type qui montre la dispersion des cycles au cours de l'année.

PAC dédiée chauffage

Pour le système PAC-chauffage, le nombre d'heures de fonctionnement est plus élevé (1'679 – 3'095 heures) qu'en ECS (entre 2'253 – 3'631 heures). En revanche, la PAC travaille la plupart du temps à charge partielle car, durant la majeure partie de la saison de chauffe, la demande est plus faible que la puissance maximale de la PAC (dimensionnée pour les jours les plus froids de l'année). Ceci impacte favorablement le niveau d'émission sonore de la machine en fonctionnement.

Le nombre de cycles par jour et la durée des cycles sont très sensibles au changement du temps d'activation. Ils diminuent et augmentent respectivement au fur et à mesure que le temps d'activation augmente.

Si on se focalise sur les écarts types de la durée de cycle et du nombre de cycles par jour, le système PAC-chauffage montre une dispersion plus marquée que le système PAC-ECS. Cette dispersion varie selon la temporisation de la cascade et elles sont principalement liées à des effets saisonniers qui sont expliqués dans la section suivante.

PAC dédiée ECS

Dans le cas du système PAC-ECS, le nombre de cycles par jour n'est pas sensible au changement du temps d'activation, même si la durée des cycles augmente. Quel que soit le temps d'activation, le nombre de cycles reste proche de 6 cycles/jour. Chaque fois que le temps d'activation augmente de 3 min, la durée moyenne des cycles semble augmenter de 5 min de manière linéaire. De même, le nombre d'heures de fonctionnement augmente d'environ 10% par rapport au temps d'activation précédent (soit 165 heures).

Contrairement au système PAC-chauffage, le nombre de cycles par jour n'a pas de dispersion saisonnière, même en changeant le temps d'activation.

Variations saisonnières

Dans le but d'analyser plus en détail les effets saisonniers selon le délai d'activation de la cascade, la Figure 27 montre la durée moyenne des cycles et le nombre de cycles par jour en fonction de la température extérieure, en valeurs journalières, pour les deux modes d'opération (chauffage/ECS).

PAC dédiée ECS

Comme le montre la Figure 27.a, la durée des cycles augmente lorsque la température extérieure diminue. Cela provient d'une dégradation de la puissance de la PAC avec l'augmentation du ΔT entre la demande et la ressource. Cet effet s'accentue en-dessous de 5°C, à cause de la dégradation du COP en lien avec les cycles de dégivrages. A -5°C et sans temporisation (Δt = 0 min), la durée des cycles est d'environ 52 minutes. Etant donné un soutirage effectif de 35 L/hab.jour, ceci est conforme aux paramètres de dimensionnement (cycles de 60 minutes à -7°C, pour un soutirage par habitant de 45 L/jour). De façon évidente, cette durée augmente avec la temporisation.

Quelle que soit la temporisation, au fur et à mesure que la durée des cycles augmente, le confort diminue (Figure 27.c). Tout comme la durée des cycles, l'effet s'accentue en-dessous de 5°C. À cause de cet effet saisonnier, il faut donc être vigilant dans le choix de la temporisation pour assurer le confort tout au long de l'année.

Le nombre de cycles journaliers s'élève à 6, conformément aux paramètres de dimensionnement (Figure 27.b). La demande d'ECS étant constante, ce nombre n'est pas sensible à la variation de température extérieure. Il n'est pas non plus sensible à la temporisation. En effet, la demande horaire étant identique pour chaque jour, les cycles surviennent au même moment et s'allongent, plutôt que de se démultiplier. L'Annexe E montre ce phénomène avec des jours typiques pour différentes températures extérieures journalières et temps d'activation.

PAC dédiée chauffage

Comme pour l'ECS, la durée des cycles augmente lorsque la température extérieure diminue (Figure 27.d). Cette augmentation est cependant plus marquée, car la dégradation de la puissance de la PAC s'accompagne également d'une augmentation de la demande de chauffage.

Contrairement à l'ECS, le nombre de cycles varie fortement avec la température, sous la forme d'une « courbe en cloche ». En effet, lorsque la température extérieure diminue, la demande de chaleur augmente et la capacité de la PAC diminue. A chaque enclenchement de la PAC, il faut donc plus longtemps pour atteindre la consigne, c'est-à-dire que les cycles sont plus longs (Figure 27.d). Comme la demande augmente, le ballon se décharge plus rapidement. Il est donc nécessaire d'enclencher la PAC plus fréquemment, d'où l'augmentation du nombre de cycles (Figure 27.e). A partir d'une certaine température extérieure (ici environ 5-7°C), on arrive finalement à un point où, comme les cycles sont plus longs et plus fréquents, certains fusionnent en un seul long cycle. Cela fait finalement baisser le nombre de cycle journalier, mais continue à faire augmenter la durée moyenne des cycles. Ce phénomène est montré plus en détail dans l'Annexe E avec des jours typiques pour différentes températures extérieures journalières et temps d'activation.

Il est intéressant de noter que la même évolution du nombre et de la durée des cycles est observée dans les résultats du site pilote « St-Julien » (section 2.2.5). Cette simulation permet donc de reproduire et d'expliquer ce phénomène.

Par ailleurs, on remarque qu'au point critique de 15°C extérieur, la durée des cycles de 20 min est conforme au critère de dimensionnement, sous condition d'une temporisation suffisante pour garantir un fonctionnement à un seul étage de puissance. En fait, une temporisation de 9 min permet déjà de garantir des cycles d'au moins 20 min jusqu'à 13°C extérieur. En revanche, ces temps d'activation longs mènent à des cycles de plus de 60 min en hiver, qui empêchent le maintien de la consigne et péjorent ainsi le confort (Figure 27.f).

Il faut donc porter une attention particulière au réglage de cette temporisation afin d'éviter les courts-cycles et garantir le confort des usagers. De plus, cet exemple montre que, à cause des effets saisonniers, il n'existe pas toujours de temporisation adaptée à l'intégralité de la saison de chauffe. Il serait donc préférable de paramétrer une temporisation différente entre la mi-saison (par ex. 12 min dans ce cas) et les mois les plus froids (par ex. 6 min). Cette remarque est également valable pour le système PAC dédiée ECS, pour lequel on pourrait utiliser une temporisation plus courte en hiver qu'en été, afin d'éviter la péjoration du confort.

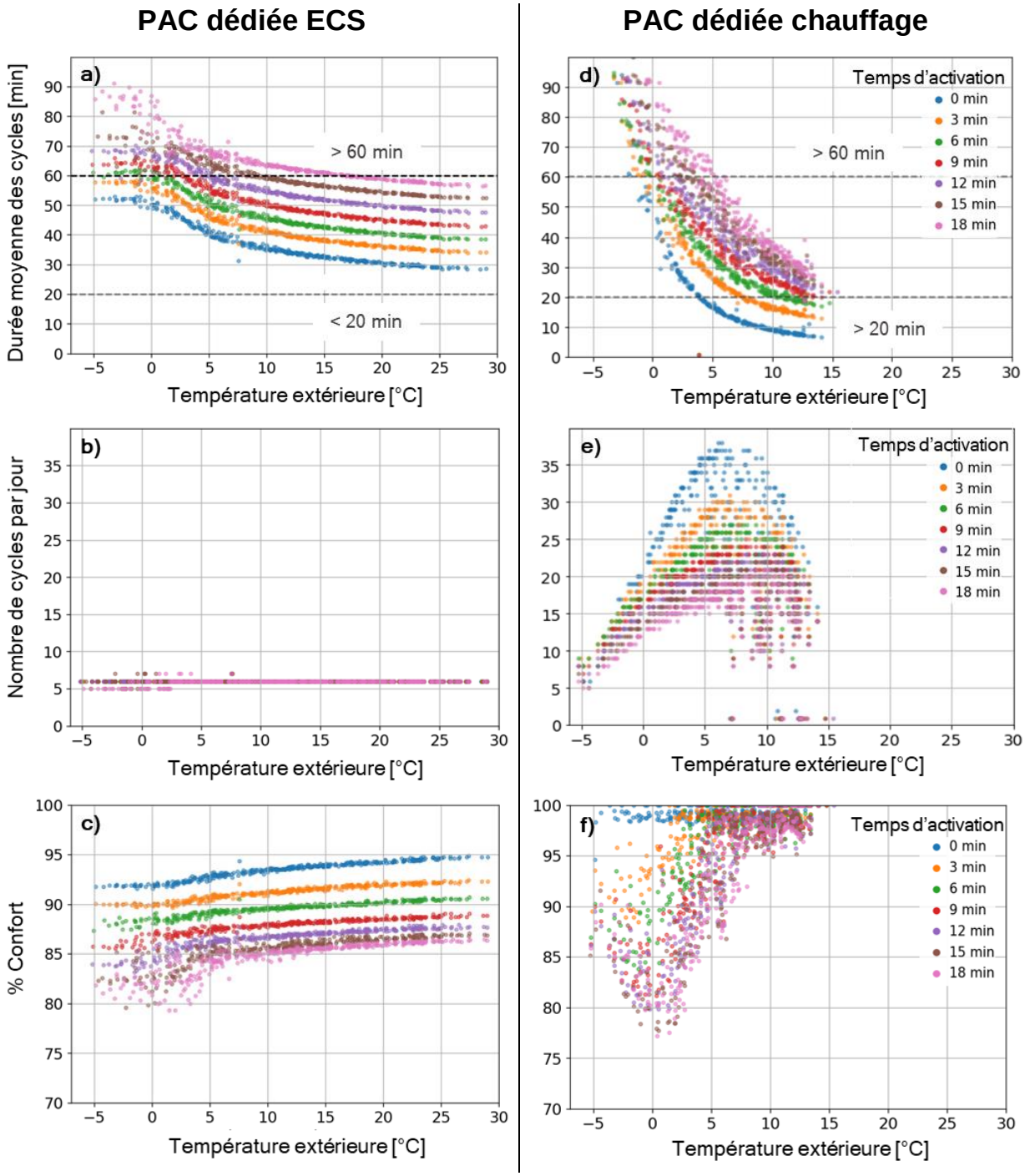


Figure 27 : Variations saisonnières des systèmes de référence PAC – ECS (à gauche) et PAC – chauffage (à droite) : durée moyenne des cycles, nombre de cycles par jour et confort en fonction de la température extérieure pour différents temps d'activation des étages de puissance (valeurs journalières).

3.4.2 PAC combinée chauffage & ECS

Résultats globaux

La Figure 28 montre les résultats de 3 indicateurs pour le système de référence PAC combinée chauffage & ECS. Comme expliqué précédemment, il s'agit en fait de la superposition des résultats de simulations indépendantes des systèmes PAC-chauffage et PAC-ECS dédiées, qui ne tient donc pas compte des instants avec une demande simultanée d'ECS et de chauffage. En pratique, si une même machine assure la production de chauffage et d'ECS, une priorité est donnée à l'un des deux, généralement l'ECS. Une fois la consigne d'ECS atteinte, la PAC enchaine sur la production de chauffage, sans interruption de cycle et sans arrêter les étages de puissance déjà actifs. Il en résulte un nombre de cycles et un nombre d'heures de fonctionnement plus faibles que ce qui est donné par la simulation. Nonobstant l'imprécision qui en résulte, cette approche permet de mettre en évidence les points suivants.

Au total, le nombre d'heures de fonctionnement passe de 2'091 heures pour un temps d'activation de 0 min à 4'260 heures pour 18 min. A noter que ces valeurs sont proches de celles observées sur le site pilote de St-Julien (4'145 et 3'242 heures pour la première et deuxième année de mesure).

Dû au surdimensionnement de la PAC de 211%, les cycles en ECS chutent en dessous de 20 min pour une temporisation inférieure à 9 min, alors qu'en mode chauffage il est possible de réduire la temporisation jusqu'à 3 min. Cependant, il s'agit ici de valeurs moyennes annuelles. Comme montré précédemment, la durée des cycles varie au cours de l'année en fonction de la demande et de la température extérieure. Une compatibilité du temps d'activation entre les deux modes (chauffage/ECS) en moyenne annuelle ne signifie donc pas nécessairement une compatibilité durant toute l'année.

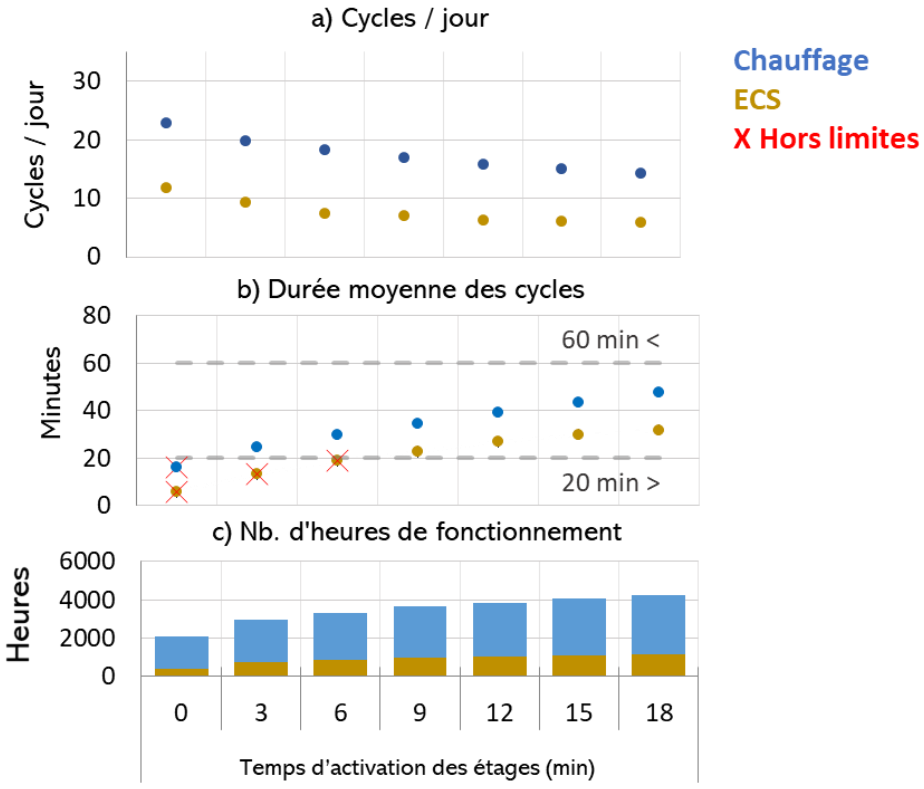


Figure 28 : Résultats des systèmes de référence PAC ECS & chauffage avec différents temps d'activation des étages de puissance. Il s'agit de la superposition des résultats entre les systèmes de référence PAC – chauffage (bleu) et PAC-ECS (dorée) avec la même puissance PAC installée. (a) Le nombre de cycles/jour et (b) la durée des cycles sont des valeurs moyennes annuelles. Les valeurs en dehors des limites recommandées sont marquées avec une croix (rouge).

Afin de respecter la durée minimale d'opération de la PAC dans les deux modes (chauffage/ECS), les solutions possibles seraient les suivantes :

- Paramétrer une temporisation suffisamment élevée pour l'enclenchement de la cascade (par exemple, dans le cas de la Figure 28, supérieur à 9 min), en prenant garde de respecter les conditions de confort des usagers.
- Brider la puissance de la PAC en mode ECS, par exemple en n'utilisant que 2 étages de puissance parmi les 4, afin d'avoir une puissance compatible avec la demande et ainsi augmenter la durée des cycles d'ECS.
- Si la place et le budget le permettent, augmenter le volume du ballon d'ECS, car son dimensionnement est effectué par rapport à la demande et non par rapport à la puissance PAC installée. En effet, si l'on dimensionnait le ballon d'ECS en suivant la même méthode que pour le ballon de chauffage (cf. AirBiVal, section 5), c'est-à-dire pour que la PAC puisse opérer durant 20 minutes au minimum sur sa plus petite puissance, alors le volume du ballon passerait de 1.9 m³ à 2.8 m³ dans le cas étudié.

Variations saisonnières

Les résultats journaliers de ce système en fonction de la température extérieure, et par mode d'opération (chauffage/ECS), se trouvent dans l'Annexe F. Les variations saisonnières observées sont similaires à celles des systèmes de référence avec PAC dédiées présentés précédemment dans la Figure 27. La durée des cycles d'ECS est relativement peu affectée par la diminution de température extérieure, tandis que celle des cycles de chauffage augmente rapidement lorsque la température extérieure diminue. La principale différence réside dans la durée des cycles d'ECS, nettement plus courts dans le cas du système combiné (5 à 40 min selon la temporisation) qu'avec des PAC dédiée (30 à 90 min).

À cause du surdimensionnement de la PAC pour l'ECS, seuls des délais d'activation longs ($\Delta t > 9$ min) permettent d'éviter les cycles de moins de 20 min en ECS durant toute l'année. Bien qu'un tel délai puisse convenir en mode chauffage en mi-saison (> 5°C), il pourrait poser des problèmes de confort lorsque la température extérieure est faible (< 5°C), comme c'est le cas pour le système avec PAC dédiée pour le chauffage (Figure 27). De plus, ce phénomène serait amplifié par le fait que dans le système avec PAC combinée, la PAC alterne entre les deux modes de fonctionnement, en donnant la priorité à l'ECS.

L'indicateur de confort n'a toutefois pas été calculé pour ce système, car la simulation est effectuée séparément pour les deux modes. Contrairement au cas réel, la simulation ne reproduit donc pas les effets liés à l'indisponibilité de la PAC pour le chauffage lorsqu'elle produit de l'ECS, ce qui aura pour tendance de : i) sous-estimer la durée des cycles de chauffage : ii) sous-estimer la durée pendant laquelle la consigne du ballon de chauffage n'est pas atteinte.

3.5 Etude de sensibilité

Ce chapitre présente une étude de sensibilité sur les trois systèmes PAC-ECS, PAC-chauffage et PAC combinée chauffage & ECS. Le but est de déterminer si les tendances observées pour les systèmes de référence (section 3.4) changent dans d'autres conditions, en particulier en fonction de :

- La demande de chaleur
- La puissance de la PAC
- Le volume du ballon
- La fréquence de la boucle de recirculation d'ECS

Ces paramètres de sensibilité ont été sélectionnés sur la base d'échanges avec divers acteurs (exploitants, ingénieurs de projet, installateurs et chauffagistes) ayant été confrontés à la gestion de la cascade de PAC, ainsi que des retours d'expérience sur installations pilotes réalisés à Genève par SIG.

Cette étude de sensibilité permet notamment d'identifier les scénarios qui peuvent péjorer la durée de vie des machines et/ou le confort des usagers. Ces résultats sont ensuite utilisés pour formuler des recommandations à l'intention des ingénieurs et établir des points de vigilance sur les cas auxquels il convient de prêter attention.

3.5.1 PAC dédiée ECS

Variantes étudiées

L'ensemble des cas étudiés pour le système PAC-ECS sont décrits dans le Tableau 7. Au total, 6 variantes sont analysées, en plus du cas de référence. Chaque variante est simulée avec un temps d'activation des étages de puissance (Δt) allant de 0 min à 18 min par intervalle de 3 minutes (0, 3, 6…, 18 min), soit un total de 42 simulations.

Tableau 7 : Résumé des variantes étudiées pour le système PAC-ECS. Les valeurs en bleu correspondent aux variations par rapport au cas de référence.

Type de sensibilité	Variante	Demande d'ECS		Puissance PAC (@7°C/45°C) [kW]	Volume ballon [m³]	Volume/Puissance PAC [L/kW]
		[L/hab.jour]	[kWh/m².an]*			
	Référence	35	30	88	1.9	22
Demande	**Demande faible**	25	*22 (-27%)*	88	1.9	22
	Demande très élevée	50	*43 (+43%)*	88	1.9	22
Ballon	**Petit ballon**	35	30	88	1	11
	Grand ballon	35	30	88	6	68
	Très grand ballon	35	30	88	9	102
Recirculation	**Recirculation 24h/24**	35	30	88	1.9	22

* Energie pour la préparation d'ECS. Estimations basées sur une élévation de température de 50 K (10°C → 60°C) et des pertes de stockage et de distribution de 30%.

Les variations de la demande d'ECS correspondent à des systèmes pour lesquels la demande réelle est inférieure ou supérieure à la demande estimée au moment du dimensionnement du système. La puissance de la PAC (88 kW) et le volume du ballon (1.9 m³) restent donc inchangés. Les demandes étudiées suivent les mêmes scénarios que pour le projet AirBiVal (voir rapport section 6.3.2), fondé sur l'étude de Quiquerez [9]. Il s'agit d'un débit de soutirage de 25, 35 et 50 L/hab.jour, la demande de référence étant de 35 L/hab.jour. Pour rappel, le dimensionnement du cas de référence est effectué sur la base d'une demande de 45 L/hab.jour (se référer au chapitre 5 du rapport final d'AirBiVal pour plus de détails sur la méthode de dimensionnement).

Les variations concernant le volume du ballon correspondent à des cas extrêmes allant d'un volume très faible de 1 m³ (lorsque très peu de place est disponible en chaufferie) à un volume très élevé de 9 m³ (favorable au stockage journalier). Il est à noter qu'un volume de 9 m³ ne pourrait pas être installé dans la majorité des cas à cause du manque d'espace, mais serait éventuellement possible dans le cas d'un remplacement d'une chaudière à mazout grâce à l'emplacement du réservoir de mazout.

Dans la dernière variante étudiée, « Recirculation 24h/24 », la pompe de la boucle de recirculation d'ECS fonctionne en permanence, contrairement au cas de référence dans lequel elle est activée par intermittence entre 6h et 23h pour un total de 12h par jour (voir Tableau 6).

Résultats

La Figure 29 montre les résultats de l'analyse de sensibilité, regroupés par indicateur. Chaque variante est représentée par un boxplot qui comporte :

- Pour les figures a) et b) : les valeurs annuelles pour les 7 Δt, soit 7 valeurs par variante. La largeur de l'intervalle est alors uniquement liée au changement du temps d'activation.
- Pour les figures c) et d) : les valeurs journalières pour chaque temps d'activation, soit 365 jours x 7 Δt = 2'555 valeurs. La largeur de l'intervalle est alors non seulement liée au changement du temps d'activation, mais aussi aux effets saisonniers (comme vu précédemment à la section 3.4.1).

Les variantes sont classées par valeur moyenne croissante. Pour mieux identifier la position de chaque variante, elles conservent la même couleur d'un indicateur à l'autre. Dans la Figure 29.c, les lignes pointillées indiquent les valeurs limites, à savoir des cycles très courts (< 20 min) ou longs (> 60 min).

Les résultats détaillés pour chaque variante se trouve à l'Annexe G.

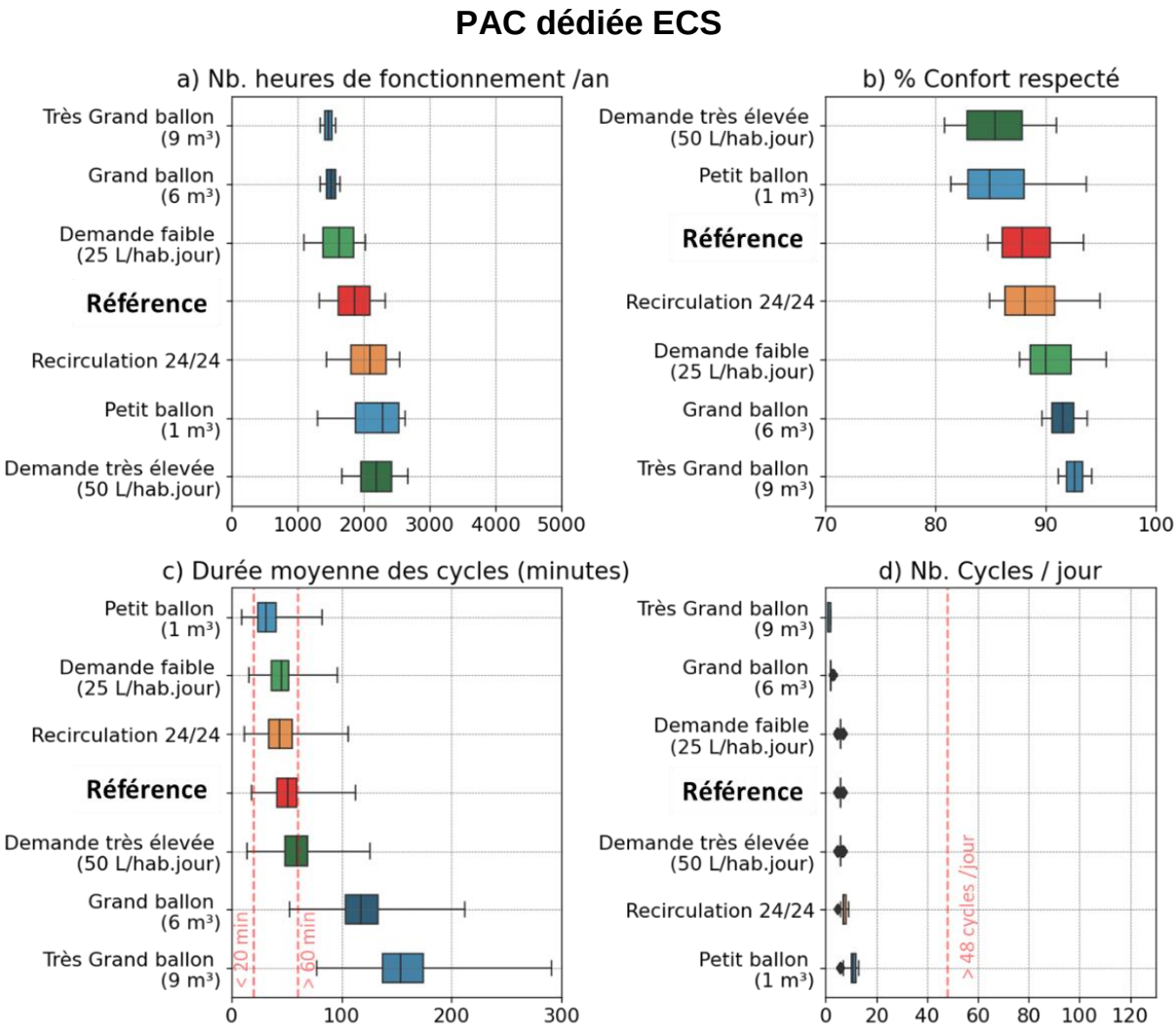


Figure 29 : Résultat de l'analyse de sensibilité du système PAC-ECS. Chaque variante est représentée par un boxplot qui comporte : (a et b) les valeurs annuelles pour chaque temps d'activation, soit 7 valeurs et (c et d) les valeurs journalières pour chaque temps d'activation, soit 2'555 valeurs. Les variantes sont classées par ordre croissant de celle qui induit la diminution plus importante (en haut), à l'augmentation la plus importante (en bas). Pour mieux identifier la position de chaque variante dans tous les graphiques, elles conservent la même couleur d'un graphique à l'autre.

Demande

L'augmentation (« Demande élevée ») et la diminution (« Demande faible ») de la demande engendre des changements par rapport au système de référence en termes de nombre d'heures de fonctionnement, de durée des cycles et de confort. Cela vient du fait que, quelle que soit la demande simulée, la PAC et le ballon sont dimensionnés sur la base d'une demande de 45 L/hab.jour. Cela implique que les bâtiments dont la demande est supérieure à 45 L/hab.jour disposent d'une PAC légèrement sous-dimensionnée (avec une péjoration du confort) et ceux avec une demande inférieure auront une PAC surdimensionnée (avec une amélioration du confort). Puisqu'une sous-estimation de la demande réelle par rapport à la demande théorique (« Demande élevée ») a un effet non négligeable sur le respect du confort, il serait intéressant de mesurer la demande avant de dimensionner le système. Cela est d'autant plus vrai que, dans le cas de l'ECS, les températures de distributions atteintes impactent non seulement le confort, mais aussi le développement des légionnelles.

En revanche, le nombre de cycles est le même (6 cycles/jour) quelle que soit la demande ou le temps d'activation

Ballon

La variante « Petit ballon » péjore significativement le confort par rapport au cas de référence. Par ailleurs, elle réduit la durée des cycles, avec davantage de cycles proches ou inférieurs à la durée limite de 20 minutes. Ainsi, si la place manque en chaufferie pour installer un ballon plus grand que 1 m³, il faut porter une attention particulière au réglage du temps d'activation pour respecter le confort et ne pas endommager les machines, quelle que soit la période de l'année.

A l'opposé, les variantes avec des volumes de ballon importants (« Grand ballon » et « Très grand ballon ») permettent de maintenir un confort plus élevé que pour le cas de référence, avec une sensibilité plus faible au temps d'activation et/ou aux effets saisonniers. En effet, les valeurs sont comprises entre environ 90 et 94% avec de grands ballons, alors qu'elles s'étendent de 85 à 94% dans le cas de référence. Par ailleurs, le nombre d'heures de fonctionnement est plus faible (de l'ordre de 1'500 heures) et les cycles sont nettement plus longs (de 100 à 180 minutes la majorité du temps, contre environ 50 minutes dans la référence). De plus, il n'y a besoin que d'un ou deux cycles par jour, ce qui pourrait s'avérer intéressant pour optimiser le rendement de la PAC en positionnant ce cycle à un moment où la température extérieure est élevée, ou bien pour maximiser l'autoconsommation d'une production photovoltaïque.

Il est intéressant d'observer qu'entre les cas « Grand ballon » (6 m³) et « Très grand ballon » (9 m³), la seule différence significative est la durée des cycles, plus longs dans le cas « Très grand ballon ». L'effet sur les autres indicateurs est très similaire.

Recirculation

Le fonctionnement en continu de la boucle de recirculation d'ECS (« Recirculation 24h/24 ») a globalement peu d'impact sur les indicateurs. Il augmente le nombre d'heures de fonctionnement de 11% (à cause de l'augmentation des pertes de chaleur) et raccourcit légèrement la durée des cycles. De plus, le nombre de cycles passe de 6 à 7 cycles par jour. Par ailleurs, le confort est quasiment identique. La boucle de recirculation ne constitue donc pas un point critique vis-à-vis de la gestion de la cascade de PAC.

3.5.2 PAC dédiée chauffage

Variantes étudiées

L'ensemble des cas étudiés pour le système PAC-Chauffage sont décrits dans le Tableau 8. Au total, 7 variantes sont analysées, en plus du cas de référence. Chaque variante est simulée avec un temps d'activation des étages de puissance (Δt) allant de 0 min à 18 min par intervalle de 3 minutes (0, 3, 6…, 18 min), soit un total de 49 simulations.

Tableau 8 : Résumé des variantes étudiées pour le système PAC-ECS. Les valeurs en bleu correspondent aux variations par rapport au cas de référence.

Type de sensibilité	Variante	Demande de chauffage [kWh/m².an]	Puissance PAC (@7°C/45°C) [kW]	Volume ballon [m³]	Volume/Puissance PAC [L/kW]
	Référence	101	208	3.3*	16
Demande	**Demande faible**	78	156	2.5*	16
	Demande très élevée	130	274	4.4*	16
Ballon	**Petit ballon**	101	208	1	5
	Grand ballon	101	208	6	29
	Très grand ballon	101	208	9	43
Capacité	**Puissance élevée**	101	236 *(+ 15%)*	3.8*	16
	Puissance faible	101	175 *(- 15%)*	2.8*	16

* Ballon dimensionné pour que la PAC opère au minimum 20 min sur sa plus petite puissance (1er étage de puissance).

Les variations de la demande de chauffage sont déterminées à partir de l'étude de Khoury [7], qui présente la demande de chauffage du parc résidentiel collectif genevois par époque de construction. Les scénarios analysés sont les mêmes que dans le projet AirBiVal, sections 6.3.1 (Données climatiques et demande de

chauffage), à savoir une demande faible de 78 kWh/m².an et une demande élevée de 130 kWh/m².an. Les différentes variantes correspondent donc à des bâtiments d'époques de constructions différentes et/ou dont l'enveloppe a été rénovée.

Les variations du volume du ballon sont les mêmes que celle étudiées pour le système PAC-ECS, c'est-à-dire des cas extrêmes allant de 1 m³ à 9 m³.

On étudie également deux variantes sur la puissance de la PAC : l'une est surdimensionnée de 15% par rapport au cas de référence, tandis que l'autre est sous-dimensionnée de 15%.

Dans toutes les variantes, à l'exception de celles concernant le ballon, le volume du ballon est adapté à la puissance de la PAC, de sorte à garantir un fonctionnement de la PAC d'au moins 20 minutes sur sa plus petite puissance.

Résultats

La Figure 30 montre les résultats de l'analyse de sensibilité sur le système PAC-chauffage, sous la même forme que la Figure 29. Les résultats détaillés pour chaque variante se trouve à l'Annexe G.

Demande

Les variantes « Demande faible » et « Demande très élevée » produisent des résultats très similaires au cas de référence, pour tous les indicateurs. Cela vient du fait que, dans chaque variante, la puissance de la PAC et le ballon sont dimensionnés en accord avec la demande. Cela montre que la méthode de dimensionnement utilisée est adaptée, pour autant que la demande soit correctement estimée.

Ballon

Tout comme pour le système PAC-ECS, comme le montre la Figure 30.b, des ballons de grand volume (« Grand ballon » et « Très grand ballon ») permettent de maintenir un meilleur confort que le cas de référence. De plus, le nombre de cycles diminue nettement (environ 10 cycles/jour au lieu de 20 cycles/jour dans la référence). La durée des cycles augmente, avec un plus grand nombre de cycles de plus de 60 min, sans toutefois éliminer les cycles très courts (< 20 min). Cependant, les variations sont moins marquées que pour l'ECS, notamment parce que la différence de volume entre le cas de référence (3.3 m³) est moins importante. A nouveau, le passage de 6 m³ à 9 m³ de stockage n'apporte pas de différence notable.

Le « Petit ballon » péjore significativement le confort (inférieur à 90% la plupart du temps) et augmente le nombre d'heures de fonctionnement (environ 4'000h au lieu de 3'200h pour la référence). La différence par rapport à cette variante en mode ECS est qu'en chauffage, un ballon de faible volume avec une activation rapide de la cascade induit la plupart du temps des cycles très courts (inférieurs à 20 minutes) et très nombreux (plus que la limite de 48 cycles/jour). Même en augmentant le délai d'activation, les courts cycles persistent en mi-saison. Cette configuration est la moins recommandée car il y a un fort risque d'endommager les machines.

Capacité

Le sous- ou surdimensionnement de la PAC a peu d'influence sur le confort, la durée des cycles et le nombre de cycles. Cependant, le sous-dimensionnement de la PAC présente l'avantage de rallonger légèrement les cycles, ce qui réduit le nombre de cycles très courts (< 20 min).

Malgré le faible impact du sous- ou surdimensionnement sur la durée et le nombre de cycles, au niveau annuel, ces légères variations entraînent une augmentation/diminution du nombre d'heures de fonctionnement. La valeur médiane se trouve à environ 2'900 heures pour un surdimensionnement et 3'500 pour un sous-dimensionnent, contre environ 3'200 heures pour le cas de référence (soit une variation de + ou – 10%).

Une erreur de dimensionnement de l'ordre de 15% n'a donc pas d'impact significatif sur la gestion de la cascade. A cause du plus grand nombre de courts-cycles constatés dans le cas d'un surdimensionnement, il serait a priori préférable de légèrement sous-dimensionner la PAC plutôt que l'inverse. Il est important de

pouvoir mesurer la demande de chaleur avant la mise en place de la PAC afin d'éviter les surdimensionnements, qui entraînent des surinvestissements et présentent davantage de risques de courts-cycles néfastes pour les machines.

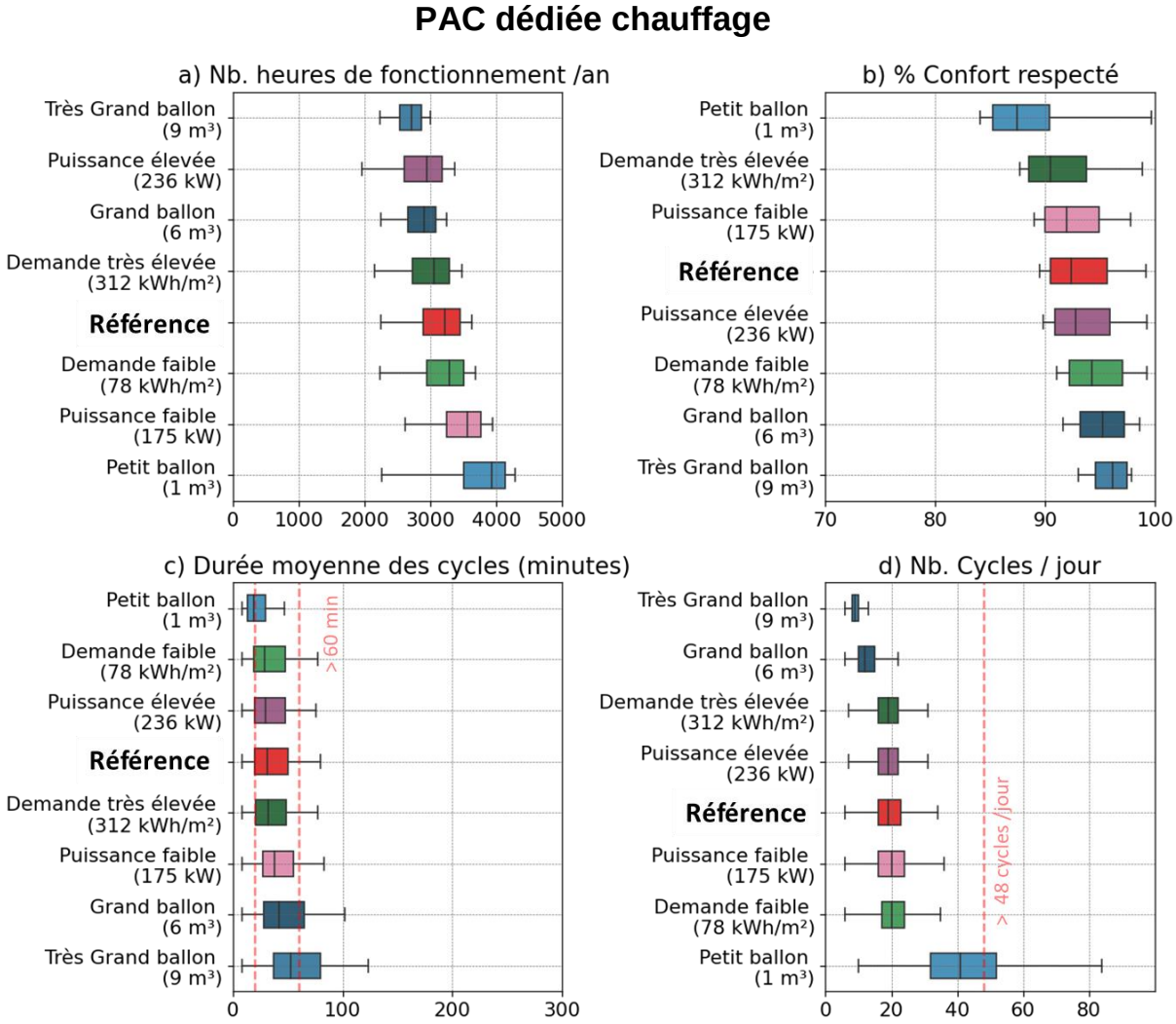


Figure 30 : Résultat de l'analyse de sensibilité du système PAC-chauffage. Chaque variante est représentée par un boxplot qui comporte : (a et b) les valeurs annuelles pour chaque temps d'activation, soit 7 valeurs et (c et d) les valeurs journalières pour chaque temps d'activation, soit 2'555 valeurs. Les variantes sont classées par ordre croissant de celle qui induit la diminution plus importante (en haut), à l'augmentation la plus importante (en bas). Pour mieux identifier la position de chaque variante dans tous les graphiques, elles conservent la même couleur d'un graphique à l'autre.

Durée des cycles

De manière générale, contrairement à l'ECS, on observe des cycles inférieurs à 20 min et jusqu'à plus de 60 min pour toutes les variantes (Figure 30.c). Comme montré précédemment à la section 3.4, cela s'explique par le choix du temps d'activation, mais aussi par les effets saisonniers liés à la dégradation de la capacité de la PAC et l'augmentation de la demande de chauffage avec la diminution de la température extérieure. Pour toutes les variantes simulées, les cycles longs (> 60 min) sont principalement présents au milieu de l'hiver et les cycles les plus courts surviennent à la mi-saison. Pour plus d'informations, les résultats détaillés sont disponibles à l'Annexe G.

3.5.3 PAC combinée chauffage & ECS

Variantes étudiées

Comme expliqué précédemment, le système PAC combinée chauffage & ECS correspond à la superposition des résultats de deux simulations séparées pour PAC-ECS et PAC-chauffage dédiées, avec cependant

une puissance de PAC identique pour les deux systèmes. Puisqu'il s'agit d'un système monovalent, pour les demandes de chaleur étudiées, la puissance PAC requise pour répondre à la demande de chauffage est toujours plus élevée que celle requise pour l'ECS. Par conséquent, dans toutes les variantes, la puissance PAC installée est surdimensionnée pour l'ECS.

L'analyse de sensibilité se concentre uniquement sur la variation de la demande de chaleur et du volume des ballons. Dans le cas de la demande, il s'agit de modifier la demande de chauffage pour une demande faible ou très élevée tout en conservant une demande d'ECS moyenne, et inversement (4 variantes). Concernant le volume du ballon, 6 combinaisons sont retenues entre petit et grand ballon pour le chauffage et l'ECS, en conservant les demandes et puissances de PAC de référence. Chacun des systèmes est simulé en appliquant les modifications indiquées dans le Tableau 9 (en bleu), toutes choses égales par ailleurs.

Tableau 9 : Résumé des variantes étudiées pour le système PAC combinée chauffage & ECS. Les valeurs en bleu correspondent aux variations par rapport au cas de référence.

			Chauffage		ECS			
Type de sensibilité	**Cas**	**Puissance PAC [kW]**	**Demande [kWh/m².an]**	**Volume ballon [m³]**	**Demande [L/hab.jour]**	**Demande** [kWh/m².an]**	**Volume ballon [m³]**	**Volume/Puissance PAC (Ch. et ECS) [L/kW]**
	Référence	274	101	4.4*	35	30	1.9	16 et 7
Demande	**ECS faible**	274	101	4.4*	25	22	1.9	16 et 7
	ECS très élevé	274	101	4.4*	50	43	1.9	16 et 7
	Chauffage faible	207	78	3.3*	35	30	1.9	16 et 9
	Ch. très élevé	349	130	5.6*	35	30	1.9	16 et 5
Ballon	**ECS petit ballon**	274	101	4.4*	35	30	1	16 et 4
	ECS très grand ballon	274	101	4.4*	35	30	9	16 et 33
	Ch. petit ballon	274	101	1	35	30	1.9	4 et 7
	Ch. très grand ballon	274	101	9	35	30	1.9	33 et 7
	ECS et ch. petits	274	101	1	35	30	1	4 et 4
	ECS et ch. très grands	274	101	9	35	30	9	33 et 33

* Ballon dimensionné pour que la PAC opère au minimum 20 min sur sa plus petite puissance (1er étage de puissance).

** Energie pour la préparation d'ECS. Estimations basées sur une élévation de température de 50 K (10°C → 60°C) et des pertes de stockage et de distribution de 30%.

Résultats

La Figure 31 et la Figure 32 montrent les résultats de l'analyse de sensibilité sur le système PAC combinée chauffage & ECS, sous la même forme que la Figure 29, sauf que les variantes ne sont pas classées par valeur moyenne croissante. Les résultats détaillés pour chaque variante se trouve à l'Annexe H.

Demande

Sur tel système, puisque la puissance est surdimensionnée en ECS, une variation de la demande d'ECS (-15% et +30%) n'a pas d'influence significative sur les indicateurs (Figure 31). De manière logique, il y a une légère augmentation du nombre d'heures de fonctionnement et de la durée des cycles pour une demande d'ECS élevée, et c'est l'inverse qui se produit pour une demande d'ECS faible.

Lorsque la demande de chauffage est faible, la puissance PAC installée est réduite, mais reste surdimensionnée en ECS (environ 2.3 fois plus que la puissance requise, contre 3.1 fois dans le cas de référence).

Cette réduction permet d'obtenir des cycles de plus longue durée en ECS, avec moins de cycles très courts (< 20 min), tandis que les cycles de chauffage ne sont pas affectés. Cela signifie qu'il y a alors davantage de temps d'activation compatibles avec les deux modes d'opération.

Au contraire, une demande de chauffage élevée implique un surdimensionnement encore plus important en ECS (environ 4 fois la puissance requise dans ce cas). En conséquence, la durée des cycles d'ECS est encore plus courte, avec la majeure partie des cycles inférieurs à 20 min, et seuls des temps d'activation élevés (> 12 min) sont compatibles avec les deux modes. Dans ce cas, l'utilisation de temps d'activation élevés peut toutefois poser des problèmes en termes de confort, non quantifiés ici car la simulation est effectuée séparément pour les deux modes. Ainsi, lorsque la demande de chauffage est très élevée par rapport à l'ECS, il est conseillé de restreindre les étages de puissance utilisables en mode ECS. Cela permet de brider la puissance fournie dans ce mode et ainsi de : i) éviter les courts-cycles et ii) offrir plus de liberté quant au choix du temps d'activation.

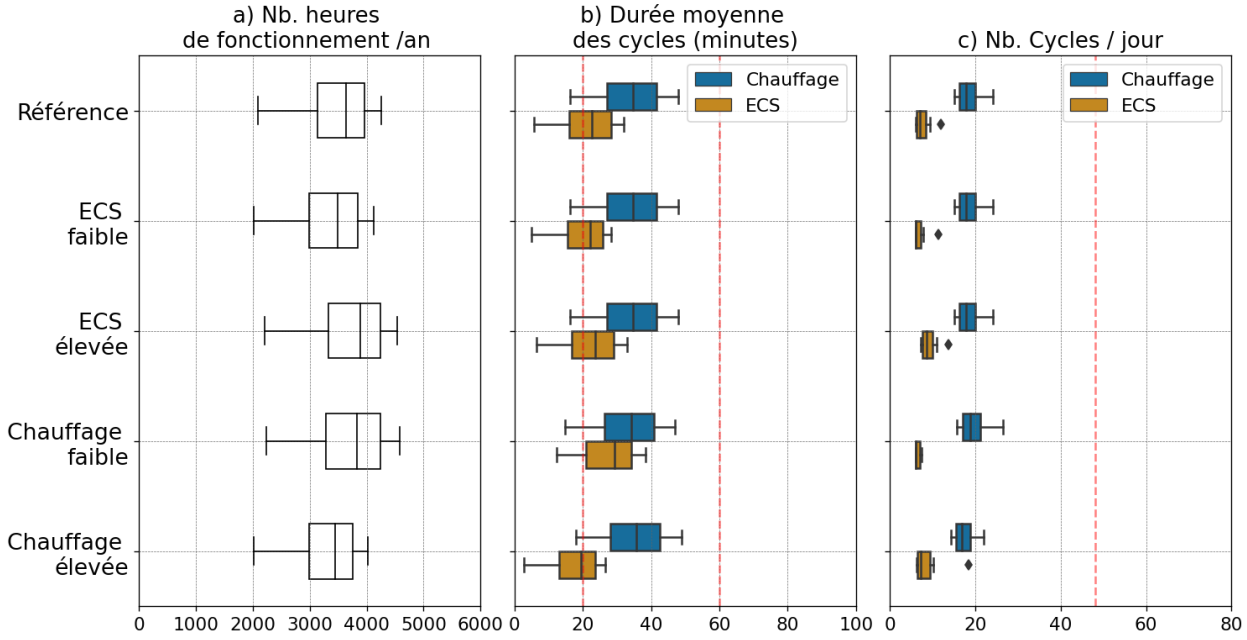


Figure 31 : Résultat de l'analyse de sensibilité sur la demande pour le système PAC combinée chauffage & ECS. Chaque variante est représentée par un boxplot qui comporte : (a) les valeurs annuelles pour chaque temps d'activation, soit 7 valeurs et (b et c) les valeurs journalières pour chaque temps d'activation, soit 2'555 valeurs.

Ballon

D'après la Figure 32, l'usage d'un petit ballon d'ECS mène à des cycles très courts (< 20 min), même avec les temps d'activation les plus longs simulés. De plus, de par le faible volume de stockage, le nombre de cycles augmente, passant de 6 à 11 cycles. Si le volume du ballon de chauffage est faible, les cycles de chauffage sont en moyenne aussi courts que ceux de l'ECS. De plus, un grand nombre de cycles est nécessaire pour combler la demande de chauffage (40 à 60 cycles environ), ce qui excède la limite de 48 cycles par jour, soit plus de 2 démarrages par heure. Le nombre d'heures de fonctionnement est également très élevé, allant jusqu'à plus de 5'000 heures au total (chauffage + ECS) sur l'année. Cette configuration est la moins recommandée car il y a un fort risque d'endommager les machines et de ne pas respecter les contraintes du réseau électrique.

A l'opposé, lorsque l'on utilise un grand ballon pour l'ECS, les cycles sont nettement plus longs (20 à 60 min environ) et du même ordre de grandeur que ceux en chauffage. Il y a alors plus de temps d'activation compatibles aux deux modes de fonctionnement. Lorsque le volume des ballons est grand pour les deux services, les cycles sont longs et peu nombreux, mais il y a à nouveau un décalage entre les deux modes en termes de durée des cycles. Cela signifie que le choix du temps d'activation sera à nouveau limité pour éviter à la fois les courts-cycles en ECS et les cycles très longs en chauffage. Il faut également faire attention aux longues charges en ECS (normalement réalisées en priorité sur le chauffage) qui pourraient péjorer le confort en chauffage.

Par ailleurs, comme montré précédemment à la section 3.4, la durée des cycles varie au cours de l'année en fonction de la température extérieure. Une compatibilité de temps d'activation entre les deux modes (chauffage/ECS) en moyenne ne signifie pas nécessairement une compatibilité durant toute l'année. Une attention particulière doit donc être portée aux effets saisonniers.

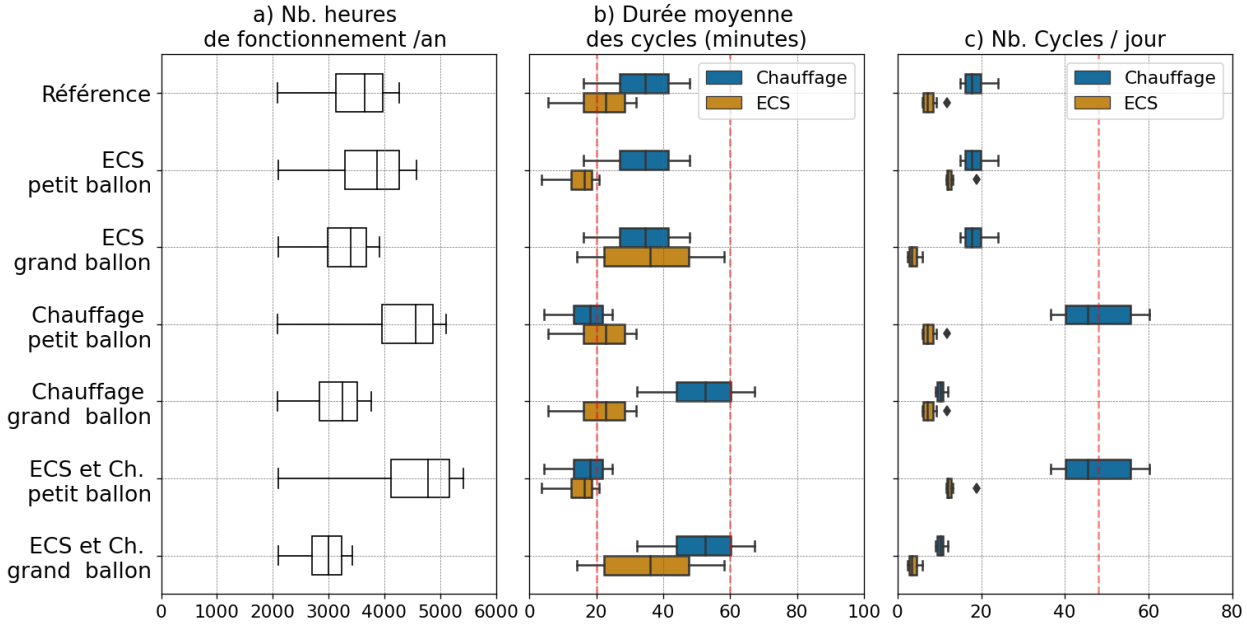


Figure 32 : Résultat de l'analyse de sensibilité sur le volume des ballons pour le système PAC combinée chauffage & ECS. Chaque variante est représentée par un boxplot qui comporte : (a) les valeurs annuelles pour chaque temps d'activation, soit 7 valeurs et (b et c) les valeurs journalières pour chaque temps d'activation, soit 2'555 valeurs.

3.6 Conclusions de la modélisation

L'analyse de sites pilotes, présentée au Chapitre 2, a montré que les paramètres d'enclenchement de la cascade de PAC jouent un rôle déterminant dans le fonctionnement du système. Plus particulièrement, le choix du délai entre l'activation des étages de puissances (PAC et compresseurs) influe à la fois sur la durée de vie des PAC et sur le confort des usagers. En pratique, ce délai d'activation est un paramètre fixe pour toute l'année. Cependant, le retour d'expérience du site pilote « St-Julien » a montré que, à cause de la variation de la capacité de la PAC et de la demande de chaleur en fonction de la température extérieure, un délai d'activation peut convenir pour une période de l'année, mais pas nécessairement pour l'année complète et pour les deux modes d'opération (chauffage/ECS).

Afin d'évaluer plus précisément l'impact du délai d'activation de la cascade et d'émettre des recommandations, des modèles numériques ont été mis en place à l'aide du logiciel TRNSYS. Ces modèles s'appuient sur celui réalisé dans le cadre du projet AirBiVal, qui a été calibré et validé à partir de mesures in-situ. La gestion en cascade des PAC a été reproduite pour activer successivement les étages de puissance avec une temporisation.

La gestion en cascade a été étudiée sur trois systèmes monovalents couramment installés lors du changement d'agent énergétique : i) PAC dédiée pour l'ECS, ii) PAC dédiée pour le chauffage et iii) PAC qui alterne entre la production d'ECS et de chauffage. Pour chaque système, le délai entre l'activation de chaque étage de puissance a été varié de 0 min (activation instantanée de tous les étages) à 18 min, par intervalle de 3 minutes (0 min, 3 min, 6 min, …, 18 min).

Les principaux constats tirés des simulations sur ces systèmes sont les suivants :

- Quelle que soit la configuration du système, les cycles et le confort varient de façon saisonnière, en raison de la dégradation de la capacité de la PAC et des variations de la demande par rapport à la température extérieure. De longs cycles accompagnés d'une diminution du confort sont présents au milieu de l'hiver en ECS et en chauffage. Ainsi, comme observé sur les retours d'expérience, le délai d'activation de la cascade devrait être adapté en fonction de la période de l'année

et du mode d'opération (chauffage/ECS), afin de maintenir le confort des usagers sans péjorer la durée de vie des PAC.

- Le système avec PAC dédiée pour le chauffage est plus sensible aux variations de la température extérieure et du délai d'activation. Les courts cycles (inférieurs à 20 minutes) sont présents au début et à la fin de la saison de chauffe, en raison de la faible demande de chaleur et de la plus grande capacité des PAC.
- En ECS, les cycles sont plus longs et peuvent dépasser les 60 min lorsque la température extérieure est faible. Les cycles inférieurs à 20 min sont plus rares, mais possibles avec un temps d'activation rapide de la cascade et un ballon de faible volume. Le nombre de cycles est peu sensible au temps d'activation et à la variation de la température extérieure, en conséquence, il est presque constant toute l'année.
- Dans un bâtiment non-rénové et pour un système monovalent, si la PAC fournit les deux services (ECS + chauffage), la puissance PAC requise pour le chauffage est plus élevée que pour l'ECS, si bien que la puissance pour l'ECS sera largement surdimensionnée. À cause de ce surdimensionnement, il est plus difficile de trouver un délai d'activation adapté durant toute l'année aux deux modes de fonctionnement.

Dans une deuxième partie, des analyses de sensibilité ont été effectuées sur chaque système, portant sur des conditions fréquemment observées sur le terrain : i) des bâtiments avec des niveaux de demande différents, ii) un sous- ou surdimensionnement de la PAC, iii) un volume des ballons plus ou moins grand, et iv) un fonctionnement 24h/24 ou non de la boucle de recirculation d'ECS. Cette étude de sensibilité a montré les résultats suivants :

- Pour les PAC dédiées à l'ECS, l'augmentation et la diminution de la demande affecte la durée des cycles, le nombre d'heures de fonctionnement et le confort. Ce résultat est lié à la méthode de dimensionnement proposée, pour laquelle la PAC et le ballon sont dimensionnés par rapport à une demande de 45 L/hab.jour (car la demande réelle n'est pas toujours connue), quelle que soit la demande simulée.
- Pour les PAC dédiées au chauffage, pour autant que la demande soit correctement estimée, la variation de la demande ou un surdimensionnement de la PAC n'ont pas d'impact significatif sur les indicateurs de la cascade. Cela vient du fait que la PAC est dimensionnée selon la demande, et le ballon selon la puissance PAC.
- Il est important de pouvoir mesurer la demande de chaleur avant la mise en place de la PAC afin d'éviter : i) les surdimensionnements en chauffage, qui entraînent des surinvestissements et présentent davantage de risques de courts-cycles néfastes pour les machines ; ii) les sous-dimensionnements de PAC dédiée à l'ECS, qui rendent plus difficile le respect du confort et des normes anti-légionnelles.
- Que ce soit en chauffage ou en ECS, le volume du ballon a une influence importante pour éviter les courts-cycles de la PAC, limiter le nombre d'heures de fonctionnement et assurer le confort des usagers, en particulier en mode chauffage. Une taille de stockage suffisante procure également une certaine flexibilité sur le choix du délai d'activation de la cascade. Par ailleurs, à partir d'un certain volume (6 à 9 m^3 pour 4'000 m^2 de SRE), le nombre d'heures de fonctionnement, le nombre de cycles et le confort ne présentent plus de différences significatives.
- Le fonctionnement en continu de la boucle de recirculation d'ECS a peu d'impact sur les indicateurs, à part l'augmentation du nombre d'heures de fonctionnement de la PAC. La boucle de recirculation ne constitue donc pas un point critique vis-à-vis de la gestion de la cascade de PAC.
- Pour une PAC combinée chauffage & ECS, une attention particulière doit être portée au dimensionnement des ballons et au délai d'activation de la cascade. En effet, à cause du surdimensionnement de la PAC en ECS, les cycles d'ECS sont parfois très courts. Selon le volume des ballons et le ratio entre la demande d'ECS et de chauffage, il peut être difficile de trouver un délai d'activation qui convienne toute l'année aux deux modes de fonctionnement.

Chapitre 4
Recommandations

Ce chapitre établit une liste de recommandations relatives à la gestion des cascades, sur la base des retours d'expériences sur installations pilotes, des simulations numériques des chapitres précédents, ainsi que d'échanges avec des professionnels (chauffagistes, bureaux d'ingénieurs, installateurs). La première section se concentre sur les recommandations à destination des fabricants de PAC, afin de développer de nouveaux modèles adaptés aux contraintes du secteur résidentiel collectif. La seconde section regroupe les points de vigilance à l'intention des ingénieurs et des chauffagistes, dans le but de faciliter le dimensionnement et le réglage de tels systèmes.

4.1 Recommandations et remarques pour les fabricants

A l'avenir, afin de rendre l'installation des PAC air-eau dans les bâtiments résidentiels collectifs plus facile et plus accessible économiquement, les prochains modèles de PAC devraient pouvoir assurer la gestion de la cascade, sans qu'il soit nécessaire de recourir à une régulation externe « MCR ». Pour rendre cela possible, les recommandations et remarques suivantes seraient à prendre en compte dans la conception de la régulation interne des PAC. Il est à noter que certains modèles de PAC existants répondent déjà en partie à ces recommandations.

Délai d'activation

- Afin de tenir compte des spécificités et des dynamiques différentes entre le chauffage et l'ECS, il serait intéressant de pouvoir **paramétrer un délai d'activation différent pour chaque mode**. En effet, selon la configuration du système (demande, volume de ballon, etc.), il peut être difficile de trouver un délai d'activation qui convienne aux deux modes de fonctionnement en termes de durée des cycles (voir section 3.5.3)
- A cause des effets saisonniers observés à la fois sur la demande de chauffage et sur la capacité de la PAC, il serait intéressant d'**adapter automatiquement le délai d'activation en fonction de la température extérieure**. A noter qu'il serait également possible que le chauffagiste modifie le réglage deux fois par an : une fois au début de la saison de chauffe et une fois au début de la période estivale. Une autre solution consisterait à utiliser un hystérèse (ΔT) à la place d'une temporisation (Δt) pour activer successivement les étages de puissance (voir section 1.2.2). En effet, l'enclenchement des étages se ferait alors en fonction de la demande de chaleur et de la puissance fournie par les PAC, et la rapidité d'activation de la cascade changerait automatiquement au cours de l'année. Cette solution n'a toutefois pas été analysée dans cette étude, les potentiels inconvénients d'une telle régulation n'ont donc pas pu être identifiés.

Intégration système

- Le **nombre de PAC « slave »** admissible pour une PAC « master » est **parfois trop faible** pour assurer la régulation du système complet à l'aide d'une seule PAC « master ». Comme montré sur le site pilote « Daru » (section 2.3), le fonctionnement en parallèle de deux PAC « master » n'est pas idéal car complexe à réguler, en particulier en bivalence avec une chaudière.
- La régulation devrait pouvoir se faire à partir d'**une unique sonde dans le ballon**, connectée à la PAC « master ». A défaut, afin de remonter l'information à chacune des PAC, il est nécessaire de mettre en place plusieurs sondes mesurant une seule et même température dans le ballon (comme cela a été le cas sur le site pilote de « Daru », section 2.3.4).
- La régulation devrait pouvoir **gérer les cascades en chauffage ET en ECS**. Pour les deux sites pilotes étudiés (Chapitre 2), il n'y a pas de gestion de la cascade à proprement parler en mode

ECS, ce qui oblige à utiliser des moyens plus complexes pour assurer cette régulation. Dans le cas du site « St-Julien », la régulation interne de la PAC ne dispose que d'un seul mode de fonctionnement. C'est le système MCR qui gère les modes de fonctionnement, en envoyant une consigne de température de production différente à la PAC pour la faire passer d'une mode à l'autre. Dans le cas du site « Daru », chaque PAC dispose d'une sonde dans le ballon d'ECS et s'enclenche selon un ΔT par rapport à la consigne, qu'il faut paramétrer manuellement dans chaque machine et modifier régulièrement pour équilibrer les heures de fonctionnement.

Prise en compte de l'état de fonctionnement

- Le **débit de la PAC** (condenseur) **doit pouvoir s'adapter au nombre de compresseurs activés** pour éviter des ΔT très faibles au condenseur et réduire la consommation d'énergie liée au pompage, qui péjorent tous deux le COP système. Sur le site pilote « St-Julien », ce débit est constant, ce qui a forcé à assurer une partie de la régulation à l'aide d'un système MCR pour réaliser des économies d'énergie, alors que la régulation master/slave fonctionnait (voir section 2.2.4).
- La régulation des PAC et compresseurs devrait prendre en compte **le nombre d'heures de fonctionnement** de chaque PAC/compresseurs pour **les équilibrer**.
- La régulation devrait **prendre en compte l'état actuel des PAC et compresseurs (dégivrage, panne haute pression, etc.)** pour ne pas demander l'enclenchement d'une PAC qui n'est pas en mesure de s'activer immédiatement. Sans cette communication, par exemple lorsque l'enclenchement des PAC est assuré par une régulation externe, la puissance fournie par la cascade augmente plus lentement et peine à atteindre la puissance nécessaire.
- Pour augmenter la disponibilité des PAC pour la production de chaleur et réduire les consommations d'énergie inutiles, il faudrait idéalement **contrôler les cycles de dégivrage à partir de mesures sur l'état réel de la PAC, plutôt qu'un enclenchement à intervalles de temps fixes**. Sur le site pilote « Daru » (section 2.3.5), les PAC sont fréquemment en mode dégivrage, ce qui réduit la puissance que la cascade de PAC peut fournir. Le manque de puissance est alors comblé par la chaudière et la couverture PAC est plus faible.
- Au lieu de brider la puissance de production PAC en ECS en termes de nombre de compresseurs, il devrait être possible d'**indiquer à la PAC « master » la puissance maximale admissible en mode ECS**, et qu'elle adapte automatiquement le niveau de puissance en conséquence. Ceci permettrait d'éviter un excédent de puissance, notamment en période estivale. Ceci aurait en outre un effet positif sur les émissions acoustiques, très appréciable en été.
- La PAC « master » devrait idéalement pouvoir **transférer le contrôle à une autre PAC si elle tombe en panne**. Cela permettrait d'éviter l'arrêt total de la production de chaleur jusqu'à la résolution de la panne, ou une couverture fossile élevée en cas de bivalence, alors que le reste de la cascade de PAC est fonctionnel.

Bivalence

- En cas de **bivalence**, pour éviter une couverture faible de la demande par les PAC (voir site pilote « Daru », section 2.3.5), **l'enclenchement de la chaudière** devrait se faire selon l'une des méthodes suivantes :
    - Activation par **temporisation**, qui doit être cohérente avec le temps d'activation des PAC
    - Activation par la **PAC « master »**, selon l'état de la cascade de PAC
    - Activation **selon la demande** (ex : si le ballon est inférieur à la consigne - ΔT pendant plus de x minutes)

4.2 Recommandations pour les ingénieurs

Selon les travaux présentés dans ce rapport, lors de l'élaboration d'un système PAC air-eau dans un immeuble résidentiel collectif, plusieurs éléments sont à prendre en compte pour la gestion de la cascade de PAC. Cette section regroupe des recommandations à l'intention des ingénieurs, relatives au choix du modèle de PAC, au réglage des paramètres de la cascade (en monovalence et bivalence), ainsi qu'au dimensionnement des PAC et des ballons tampons. Le but est de faciliter l'intégration du système et de réduire les coûts (opération, maintenance, imprévus, etc.).

De manière générale, de nombreux problèmes peuvent être évités avec une bonne communication entre les nombreux acteurs du projet (fournisseurs de PAC, ingénieurs, chauffagistes, etc.). Chaque corps de métier peut avoir une logique et une perception différente, ce qui peut facilement conduire à des malentendus. En avant-projet, la communication est notamment importante lors du choix du modèle de PAC, pour être au clair avec les fonctionnalités qu'il comporte. Pour la mise en service et le suivi du système, l'optimisation de la cascade de PAC requiert une coordination entre l'automaticien du système et le fournisseur de la PAC, en partie parce que certains paramètres ne sont modifiables que par le fournisseur.

Dans ce qui suit, nous poursuivons l'objectif d'aboutir à des systèmes simples, donc sans recourir dans tous les cas à un système MCR ajouté à l'ensemble de l'installation. Il peut s'avérer nécessaire, mais ne constitue pas un prérequis.

Choix du modèle de PAC

- Actuellement, il existe très peu de modèles de PAC de grande puissance répondant aux contraintes du secteur résidentiel collectif [1]. Les principales options possibles consistent alors à utiliser des PAC conçues pour les villas ou des PAC conçues pour des applications industrielles. **Chaque type de PAC présente des avantages et des inconvénients par rapport à leur intégration dans le secteur résidentiel collectif et à la gestion de la cascade.** Pour plus de détails, se référer à la section 1.1.2.
- Afin de faciliter la régulation du système, il convient de **vérifier que la PAC « master » peut prendre en charge la totalité des PAC « slaves » du système**, en particulier dans le cas d'un système bivalent. Le retour d'expérience sur le site pilote « Daru » (section 2.3.4) a montré qu'il était complexe de gérer la cascade lorsque le système comporte plusieurs PAC « master » (et leurs PAC « slaves »), indépendantes les unes des autres. Il a notamment fallu de nombreux ajustements dans la régulation pour obtenir une couverture PAC élevée.
- Pour un système de PAC combinées chauffage & ECS, **les PAC doivent disposer de deux modes d'opération (chauffage et ECS)**. Dans le cas contraire, il est nécessaire d'utiliser une régulation externe de type MCR pour faire le passage d'un mode à l'autre, en envoyant une consigne de température de production différente à la PAC (voir site pilote St-Julien à la section 2.2.4).
- Pour un système de PAC combinée chauffage & ECS, **il est préférable que la PAC « master » puisse gérer la cascade en ECS**. En l'absence de cette fonctionnalité, sur le site pilote « Daru » (section 2.3.4), il a fallu créer une cascade en définissant manuellement la même consigne dans chaque machine avec des « hystérèses décalées » (ex : 50°C + 1K, 50°C + 2K, etc.). Puisque la machine ayant l'hystérèse la plus faible s'enclenche en premier, elle opère plus que celle ayant l'hystérèse la plus élevée. Dès lors, **ces hystérèses doivent être interchangées annuellement**, pour équilibrer les heures de fonctionnement des PAC et de leurs compresseurs.
- La création manuelle d'une cascade en ECS, décrite au point précédent, implique que chaque PAC dispose de sa propre sonde dans le ballon d'ECS. Cela peut toutefois s'avérer problématique en fonction du nombre de sondes requises, par rapport aux emplacements disponibles dans le ballon. Il convient donc de **vérifier le nombre de sondes requises dans les ballons pour assurer la régulation** (une par PAC ou une par PAC « master »).
- En cas de bivalence, il faut **vérifier que la PAC « master » peut libérer la chaudière dans les deux modes d'opération (chauffage et ECS)**. Si elle ne peut pas le faire pour un des modes, comme c'est le cas en ECS sur le site pilote « Daru » (section 2.3.4), il est alors nécessaire d'utiliser un thermostat pour libérer la chaudière si la température du ballon est inférieure à une consigne donnée. Cette méthode n'est toutefois pas idéale car, comme elle ne tient pas compte de l'état de

la cascade, la chaudière risque de s'enclencher plus tôt que nécessaire. La couverture PAC qui en résulte est alors plus faible.

- Il faut **vérifier que le débit des PAC** (condenseur) **peut s'adapter au nombre de compresseurs activés**, en particulier pour des PAC comportant plus de 2 compresseurs. Cela permet d'éviter des ΔT très faibles au condenseur et de réduire la consommation d'énergie liée au pompage, qui péjorent tous deux le COP système. Sur le site pilote « St-Julien », ce débit est constant, ce qui a forcé à assurer une partie de la régulation à l'aide d'un système MCR pour réaliser des économies d'énergie, alors que la régulation master/slave fonctionnait (voir section 2.2.4).

Délai d'activation des étages de puissance

- A cause de la dégradation de la puissance des PAC air-eau avec la diminution de la température extérieure, la dynamique de la cascade (durée des cycles, nombre de cycles) varie au cours de l'année. Ces effets saisonniers sont d'autant plus marqués en chauffage, car la dégradation de la puissance des PAC s'accompagne également d'une augmentation de la demande de chauffage. Afin de respecter le confort des usagers sans péjorer la durée de vie des PAC, il est recommandé de **modifier le délai d'activation selon la période de l'année, en particulier en mode chauffage**. Il s'agit donc de paramétrer un délai d'activation plus court en hiver qu'en mi-saison ou en été (voir section 3.4.1).
- Pour un système de PAC combinées chauffage & ECS, selon le ratio entre les demandes de chauffage et d'ECS et la configuration du système (volume des ballons, puissance PAC, etc.), **un délai d'activation adapté au mode chauffage n'est pas toujours adapté au mode ECS** (voir sections 3.4.2 et 3.5.3). Il est alors parfois difficile de trouver un délai d'activation compatible aux deux modes, notamment pour des systèmes monovalents où la puissance PAC installée est généralement surdimensionnée pour l'ECS. Pour pallier à ce problème, plusieurs options sont possibles :
    - **Brider la puissance des PAC pour le mode ECS** (c'est-à-dire restreindre le nombre d'étages de puissance disponibles)
    - **Trouver un compris entre un délai d'activation long** permettant d'éviter les courts-cycles en ECS, **et un délai d'activation court** permettant de respecter la consigne en chauffage
    - **Utiliser des PAC dédiées plutôt que des PAC combinées chauffage & ECS**.

Bivalence

- Afin d'éviter une surproduction de la chaudière et une couverture PAC faible**, le délai d'activation des étages de puissance de la cascade de PAC (y.c les compresseurs) doit être en adéquation avec l'activation de la chaudière** (voir section 2.3.5). En effet, si la chaudière s'enclenche avant que l'intégralité de la cascade de PAC ne soit activée, alors la chaudière couvrira une partie de la demande qui aurait pu être comblée par les PAC.
- Il est nécessaire d'**ajuster les niveaux de température de production de la chaudière et des PAC de sorte à maximiser la couverture PAC** (voir section 2.3.6). Si la température de consigne de la chaudière est trop élevée ou que celle des PAC est trop faible, alors la couverture PAC devient faible. De plus, si la chaudière produit à haute température, il y a plus de risques de pannes de PAC liées à des températures de retour élevées.

Dimensionnement de la PAC

- **En chauffage, avec une PAC dédiée, une erreur de dimensionnement de l'ordre de 15% n'a pas d'impact significatif sur la gestion de la cascade**. A cause du plus grand nombre de courts-cycles constatés dans le cas d'un surdimensionnement, il serait a priori préférable de légèrement sous-dimensionner la PAC plutôt que l'inverse. Ainsi, il serait intéressant de pouvoir **mesurer la demande de chauffage avant la mise en place de la PAC afin d'éviter les surdimensionnements**, qui entraînent des surinvestissements et présentent davantage de risques de courts-cycles néfastes pour les machines (voir section 3.5.2).

- **En ECS, avec une PAC dédiée, un sous-dimensionnement de la PAC impacte le respect de la consigne de distribution** (voir section 3.5.1). Comme cela peut affecter non seulement le confort, mais aussi le développement des légionnelles, il serait intéressant de **mesurer la demande d'ECS avant la mise en place de la PAC**.
- **En monovalent, l'évaluation correcte de la demande est fondamentale.** En effet, hormis la question de l'investissement, un surdimensionnement de la PAC risque d'induire des cycles trop courts. Cette problématique est d'autant plus sensible que : i) l'espace à disposition pour les ballons est souvent restreint, pouvant mener à un rapport puissance PAC / volume de stockage défavorable ; ii) une rénovation ultérieure de l'enveloppe du bâtiment risque d'amplifier ce surdimensionnement.

Dimensionnement des ballons tampons

- **En chauffage**, que ce soit avec une PAC dédiée ou une PAC combinée chauffage & ECS, **le ballon tampon doit être dimensionné de sorte à garantir un temps de fonctionnement de la PAC d'au moins 20 minutes sur sa plus petite puissance**, c'est-à-dire pour un seul étage de puissance activé (voir projet AirBiVal, [1]) . Si le volume du ballon est plus faible, le risque est d'avoir : i) une durée des cycles très faible (< 20 min) ; ii) un nombre de cycles élevé ; iii) un nombre d'heures de fonctionnement élevé ; iv) une température de distribution non-respectée (voir section 3.5.2).
- **En ECS**, que ce soit avec une PAC dédiée ou une PAC combinée chauffage & ECS**, le ballon tampon devrait être dimensionné par rapport à la demande**, selon la méthode SIA 385/2 [8], **mais aussi par rapport à la puissance de la PAC** afin d'éviter les courts-cycles, comme décrit ci-dessus pour le mode chauffage (voir section 3.5.1).
- **Si la place est restreinte en chaufferie et ne permet pas d'installer les volumes minimums recommandés** ci-dessus, la question de la réduction du volume en ECS et/ou en chauffage reste actuellement ouverte.
- **En ECS, avec une PAC dédiée, un grand volume de ballon** permet d'éviter les courts-cycles et de diminuer le nombre de cycles. Pour un volume suffisamment grand, **un seul cycle** est requis (2-3h environ), ce qui pourrait être **avantageux pour optimiser le rendement de la PAC** en positionnant ce cycle à un moment où la température extérieure est élevée, **ou bien pour maximiser l'autoconsommation d'une production photovoltaïque**. Il est à noter qu'au-delà d'un certain volume seule la durée des cycles est rallongée, mais il y a peu de différence sur le nombre d'heures de fonctionnement de la PAC, le nombre de cycles et le respect de la consigne (voir section 3.5.1).
- **En ECS, avec une PAC combinée chauffage & ECS**, bien que les effets sur le respect des consignes n'aient pas été simulés dans cette étude, il est **a priori déconseillé d'utiliser un grand volume pour le ballon d'ECS** à cause de la longue durée des cycles d'ECS. Comme l'ECS est généralement prioritaire sur le chauffage, une telle configuration risque de péjorer le confort en chauffage.

Conclusions et perspectives

Les expériences rencontrées lors du suivi de sites pilotes [1] ont démontré que la gestion de pompes à chaleur (PAC) air-eau en cascade dans les bâtiments existants, avec ou sans chaudière d'appoint, constitue un point délicat, voire problématique. Autant les pompes à chaleur sont bien optimisées individuellement, autant un ensemble de pompes à chaleur ne fait pas l'objet d'une optimisation globale chez les différents fournisseurs expérimentés.

Le présent projet a permis d'analyser la gestion des cascades de PAC air-eau dans le contexte difficile et spécifique des immeubles résidentiels collectifs existants, sans rénovation totale du bâtiment. Cette analyse est basée sur des retours d'expérience de deux sites pilotes, ainsi que d'études de sensibilité par simulation numérique. Le but est de formuler des recommandations à destination des fabricants de pompes à chaleur, pour l'intégration dans les modèles de PAC air-eau d'une gestion complète des cascades (sans avoir à recourir à une régulation externe), et à l'intention des ingénieurs, en lien avec la planification ou l'exploitation de tels systèmes.

Retours d'expérience

Sur le premier site, le système de production est constitué de deux PAC air-eau de type industrielles et chaque PAC comporte 4 compresseurs « scroll ». Les principaux constats suite à un suivi de 2 ans sont les suivants :

- Bien que la régulation maître/esclave soit suffisante pour gérer la cascade de 2 PAC (y.c. leurs compresseurs), il s'est avéré que le fonctionnement 24h/24 de la pompe de circulation de la PAC esclave était nécessaire à la régulation. Cette pompe étant à débit fixe, la consommation d'électricité qui en résultait était élevée et péjorait le COP du système. Cela a amené à utiliser le système MCR pour gérer l'activation des deux PAC, et la régulation interne de chaque PAC pour commander l'enclenchement de leurs compresseurs.
- En hiver, le nombre de cycles par jour et la durée des cycles sont plus sensibles au délai d'activation des compresseurs qu'en été. Avec un délai d'activation court de la cascade, la consigne est atteinte plus rapidement. En revanche, les cycles deviennent très courts et nombreux, ce qui risque d'endommager les compresseurs. A l'inverse, avec un délai d'activation long, la consigne est atteinte plus lentement et les cycles deviennent parfois très longs (> 120 min), avec un risque de péjorer le confort.
- En raison d'un faible volume de ballon en chauffage (lié à un manque d'espace dans la chaufferie) et de PAC surdimensionnées (à cause de l'incertitude sur l'évaluation de la demande), avec des délais d'activation faibles, les cycles ont tendance à être courts et nombreux.

Sur le second site, le système de production de chaleur est constitué de 6 PAC air-eau de type villa en bivalence avec la chaudière existante. Chaque PAC comporte 2 compresseurs « scroll ». Les principaux constats suite à un suivi de 3 ans sont les suivants :

- Ce site présente un niveau de complexité élevé en termes de régulation, puisqu'il a été nécessaire de combiner le fonctionnement de plus petites unités en cascade, avec l'ancienne chaudière existante.
- La régulation maître/esclave de ce modèle de PAC de villa n'est pas suffisante pour gérer la cascade de 6 PAC, et encore moins la bivalence avec une chaudière. Les machines manquent de certaines fonctionnalités adaptées à ce contexte, comme le pilotage de plus de trois PAC en cascade.
- En bivalence, si la cascade n'est pas bien gérée, la couverture PAC reste faible. En particulier, il s'agit de régler les niveaux de température entre les PAC et la chaudière, ainsi que la temporisation avant la libération de la chaudière.
- Durant les trois années de suivi, la couverture PAC mensuelle est passée de 40% à 80%, en raison d'ajustements au niveau du système hydraulique, ainsi qu'au niveau de la régulation de la cascade. Sur une base annuelle, la couverture PAC est passée de 50% à 67%, et on estime qu'elle pourrait atteindre environ 80% les années suivantes. Pour y arriver, un suivi minutieux sur 3 années de fonctionnement a été nécessaire.

Ces deux sites pilotes ont permis de démontrer l'importance du réglage du délai entre l'activation des étages de puissance de la cascade pour : i) maintenir le confort des usagers sans péjorer la durée de vie de la PAC à cause de courts cycles, et ii) atteindre une couverture PAC élevée en cas de bivalence.

Simulation

Afin d'évaluer plus précisément l'impact du délai d'activation de la cascade et d'émettre des recommandations, des modèles numériques ont été mis en place à l'aide du logiciel TRNSYS. Ces modèles s'appuient sur celui réalisé dans le cadre du projet AirBiVal, qui a été calibré et validé à partir de mesures in-situ. La gestion en cascade des PAC a été reproduite pour activer successivement les étages de puissance avec une temporisation.

La gestion en cascade a été étudiée sur trois systèmes monovalents couramment installés lors du changement d'agent énergétique : i) PAC dédiée pour l'ECS, ii) PAC dédiée pour le chauffage et iii) PAC qui alterne entre la production d'ECS et de chauffage. Pour chaque système, le délai entre l'activation de chaque étage de puissance a été varié de 0 min (activation instantanée de tous les étages) à 18 min, par intervalle de 3 minutes (0 min, 3 min, 6 min, …, 18 min).

Des analyses de sensibilité ont été effectuées sur chaque système, portant sur des conditions fréquemment observées sur le terrain : i) des bâtiments avec des niveaux de demande différents, ii) un sous- ou surdimensionnement de la PAC, iii) un volume des ballons plus ou moins grand, et iv) un fonctionnement 24h/24 ou non de la boucle de recirculation d'ECS. Cette étude de sensibilité a montré les résultats suivants :

- Quelle que soit la configuration du système, les cycles et le confort varient de façon saisonnière, en raison de la dégradation de la capacité de la PAC et des variations de la demande par rapport à la température extérieure. De longs cycles accompagnés d'une diminution du confort sont présents au milieu de l'hiver en ECS et en chauffage. Ainsi, comme observé sur les retours d'expérience, le délai d'activation de la cascade devrait être fonction de la période de l'année en raison des effets saisonniers, du mode d'opération (chauffage/ECS) et des caractéristiques de l'installation (PAC dédiée, volume du ballon, puissance de la PAC, etc.).
- Il est important de pouvoir mesurer la demande de chaleur avant la mise en place de la PAC afin d'éviter : i) les surdimensionnements en chauffage, qui entraînent des surinvestissements et présentent davantage de risques de courts-cycles néfastes pour les machines ; ii) les sous-dimensionnements de PAC dédiée à l'ECS, qui rendent plus difficile le respect du confort et des normes anti-légionnelles.
- Que ce soit en chauffage ou en ECS, le volume du ballon a une influence importante pour éviter les courts-cycles de la PAC, limiter le nombre d'heures de fonctionnement et assurer le confort des usagers, en particulier en mode chauffage. Une taille de stockage suffisante procure également une certaine flexibilité sur le choix du délai d'activation de la cascade.

Recommandations

Finalement, ce travail a abouti à une liste de recommandations relatives à la gestion des cascades, sur la base des retours d'expériences sur installations pilotes, des simulations numériques, ainsi que d'échanges avec des professionnels (chauffagistes, bureaux d'ingénieurs, installateurs).

De manière générale, de nombreux problèmes peuvent être évités avec une bonne communication entre les nombreux acteurs du projet (fournisseurs de PAC, ingénieurs, chauffagistes, etc.). Chaque corps de métier peut avoir une logique et une perception différente, ce qui peut facilement conduire à des malentendus. En avant-projet, la communication est notamment importante lors du choix du modèle de PAC, pour être au clair avec les fonctionnalités qu'il comporte. Pour la mise en service et le suivi du système, l'optimisation de la cascade de PAC requiert une coordination entre l'automaticien du système et le fournisseur de la PAC, en partie parce que certains paramètres ne sont modifiables que par le fournisseur.

Une première partie est destinée aux fabricants de PAC, afin de développer de nouveaux modèles adaptés aux contraintes du secteur résidentiel collectif. Les recommandations concernent notamment : i) l'ajout de flexibilité au délai d'activation de la cascade (par mode d'opération et selon la température extérieure) ; ii) les capacités de gestion de la cascade des PAC « master » (nombre de PAC « slaves » prisent en charge, gestion de la cascade en mode chauffage et ECS, etc.) ; iii) la prise en compte de l'état de fonctionnement des PAC (nombre de compresseurs activés, dégivrage, panne, etc.) ; iv) la libération de la chaudière en cas de bivalence.

La seconde partie regroupe des points de vigilance à l'intention des ingénieurs et des chauffagistes, dans le but de faciliter le dimensionnement et le réglage de tels systèmes. Il s'agit notamment : i) du choix du modèle de PAC et des solutions possibles en cas d'absence d'une fonctionnalité ; ii) du paramétrage du délai d'activation de la cascade ; iii) des réglages nécessaires en cas de bivalence ; iv) du dimensionnement de la PAC et des ballons tampons.

Limites

Faute de temps pour développer une simulation intégrée des deux modes, la configuration PAC combinée chauffage & ECS est simulée via deux simulations séparées de PAC-ECS et PAC-chauffage dédiées, avec cependant une puissance de PAC identique pour les deux systèmes. Si cette façon de procéder reproduit à priori correctement les effets liés au dimensionnement combiné chauffage & ECS, il ne garantit pas l'alternance temporelle entre les deux modes (la PAC pouvant de fait être disponible simultanément pour l'un et l'autre). Contrairement au cas réel, la simulation ne reproduira par contre pas les effets liés à l'indisponibilité de la PAC pour le chauffage lorsqu'elle produit de l'ECS, ce qui aura pour tendance de : i) sous-estimer la durée des cycles de chauffage : ii) sous-estimer la durée pendant laquelle la consigne du ballon de chauffage n'est pas atteinte.

Par ailleurs, l'ensemble des simulations réalisées ici considère une activation de la cascade selon un délai d'activation fixe (temporisation, Δt). Or, comme expliqué précédemment, il faudrait idéalement que le délai d'activation varie en fonction de la température extérieure afin de compenser les effets saisonniers du système. Une autre solution consisterait à activer successivement les étages de puissance selon l'écart de température par rapport à la consigne (hystérèse, ΔT), à la place d'une temporisation (Δt). En effet, l'enclenchement des étages se ferait alors en fonction de la demande de chaleur et de la puissance fournie par les PAC, et la rapidité d'activation de la cascade changerait automatiquement au cours de l'année. Cette solution n'a pas été analysée dans cette étude, mais il serait intéressant de simuler une telle régulation afin d'en identifier les points forts et faibles.

Finalement, dans le cadre de cette étude, nous ne nous intéressons pas aux effets de la gestion des cascades (charge partielle, marche/arrêt) sur la consommation d'électricité, qui ne sont pas intégrés dans le modèle de simulation.

Perspectives

Afin de disséminer les résultats de cette étude, il est prévu de procéder à la mise à jour du Vademecum "PAC air-eau en toiture" élaboré par SIG et CSD Ingénieurs SA [2], ainsi que l'organisation d'un workshop avec les acteurs concernés (fournisseurs, groupement professionnel des pompes à chaleur,…).

Des études complémentaires seront également réalisées dans le cadre de la thèse de doctorat d'Omar Montero D. (octobre 2020 – septembre 2025), financé par SIG, portant sur l'intégration de pompes à chaleur air/eau dans le parc immobilier existant. En particulier, il s'agit du projet « Renowave », financé par Innosuisse, dont l'objectif est de dynamiser la décarbonisation du parc immobilier suisse, tant en termes de quantité (taux de rénovation) que de qualité (performance), afin de contribuer à la réalisation des objectifs suisses de la Stratégie énergétique 2050 [10]. Les travaux réalisés dans le cadre de ce projet donneront notamment lieu à la publication des résultats dans des revues scientifiques, ainsi qu'à la participation à des conférences.

Bibliographie

[1] N. Calame *et al.*, « AirBiVal: Développement et optimisation de concepts hybrides de pompes à chaleur sur l'air pour des immeubles résidentiels collectifs », 2021, Consulté le: 9 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://archive-ouverte.unige.ch/unige:156969

[2] CSD Ingénieurs SA et Services Industriels de Genève, « « 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. », SuisseEnergie, Vademecum, 2018.

[3] N. Calame, A. Freyre, F. Rognon, S. Callegari, et M. Rüetschi, « Air to water heat pumps for heating system retrofit in urban areas: understanding the multi-faceted challenge », *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1343, p. 012079, nov. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1343/1/012079.

[4] OCEN (Office cantonal de l'énergie), « Energie - Degrés jour ». 2020. Consulté le: 18 novembre 2020. [En ligne]. Disponible sur: https://www.ge.ch/document/energie-degres-jour

[5] Klein S.A. et al., « TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program ». Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA, 2010. [En ligne]. Disponible sur: https://sel.me.wisc.edu/trnsys/

[6] SIA, « Cahier technique 2028:2010 - Données climatiques pour la physique du bâtiment, l'énergie et les installations du bâtiment ». Société suisse des ingénieurs et des architectes, juillet 2010.

[7] J. Khoury, « Rénovation énergétique des bâtiments résidentiels collectifs: état des lieux, retours d'expérience et potentiels du parc genevois », Université de Genève, 2014. Consulté le: 24 octobre 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://archive-ouverte.unige.ch/unige:48085

[8] SIA, « 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, 1 janvier 2015.

[9] L. Quiquerez, « Analyse comparative des consommations de chaleur pour la production de l'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 », 2017, Consulté le: 9 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://archive-ouverte.unige.ch/unige:91218

[10] RENOWAVE, « Massive Decarbonization of the Swiss building stock. Research proposal of the Innosuisse Flagship Initiative (Swiss Innovation Agency) », Switzerland, 2021.

[11] O. Montero *et al.*, « Large Air-to-Water Heat Pumps for Fuel-Boiler Substitution in Non-Retrofitted Multi-Family Buildings—Energy Performance, CO2 Savings, and Lessons Learned in Actual Conditions of Use », *Energies*, vol. 15, nº 14, Art. nº 14, janv. 2022, doi: 10.3390/en15145033.

Annexes

Annexe A. Dimensionnement des PAC et des ballons du site pilote « St-Julien »

En bureau d'études, afin d'éviter les cycles de courte durée, les accumulateurs de chaleur pour le chauffage sont généralement dimensionnés de sorte à permettre à la PAC de travailler sur une période de 20 minutes minimum à son niveau de puissance le plus faible. Sur le site de St-Julien, compte tenu de la puissance d'une PAC pour des températures proches de la température de non-chauffage (176 kW @ 15°C/45°C), avec 4 étages de puissance, le volume tampon en chauffage aurait dû être de 3.3 m³ afin de garantir ce temps de fonctionnement minimal de 20 minutes. Ce volume n'a cependant pas pu être installé en raison du manque de place dans la chaufferie. Le système de chauffage comprend finalement un ballon de 1 m³. Ainsi, les ballons tampons constituent davantage un découplage hydraulique qu'un stockage de chaleur.

Par ailleurs, les deux PAC de St-Julien ont été surdimensionnées car, faute de compteurs de chaleur, la capacité requise a été déterminée à partir des relevés de consommation de mazout en considérant un rendement hypothétique de la chaudière. Cependant, le rendement estimé de la chaudière, mesuré après l'installation des PAC, était bien inférieur à la valeur hypothétique. La demande de chaleur du bâtiment a donc été surestimée lors du dimensionnement des PAC, ce qui a eu pour effet d'augmenter la capacité installée. In fine, dans la plage de température extérieure de 0 à 5°C, où l'on observe la plus faible différence en moyenne horaire entre la capacité de la PAC (280 kW) et la demande de chaleur de pointe (196 kW), le ratio capacité/demande s'élève à 143% [11].

Figure 33 : Petit ballon de chauffage (1 m³) du site pilote de St-Julien.

Annexe B. Performance de la PAC du site pilote de St-Julien en fonction de la température extérieure selon les données du fabricant

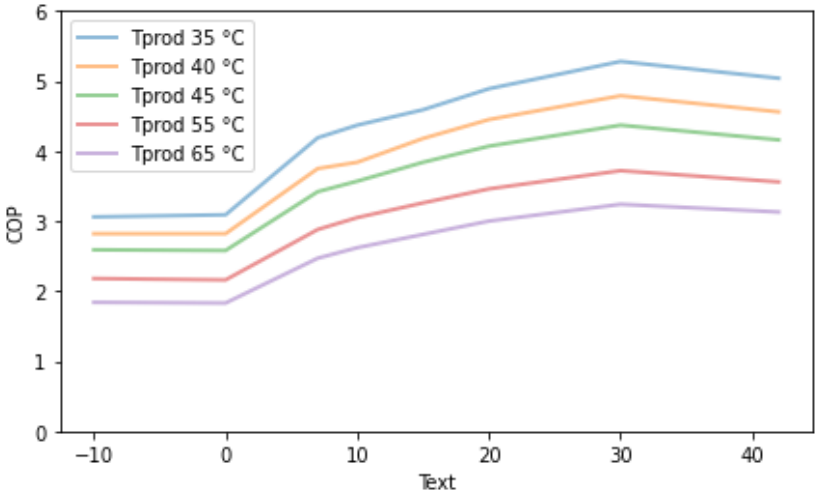


Figure 34 : Performance de la PAC du site pilote « St-Julien » en fonction de la température extérieure pour différentes températures de production, selon les données du fabricant. Le mode dégivrage est inclus sous la forme d'une dégradation de la puissance disponible à partir d'une température extérieure inférieure à 7°C.

Annexe C. Courbes de chauffe programmées dans la simulation

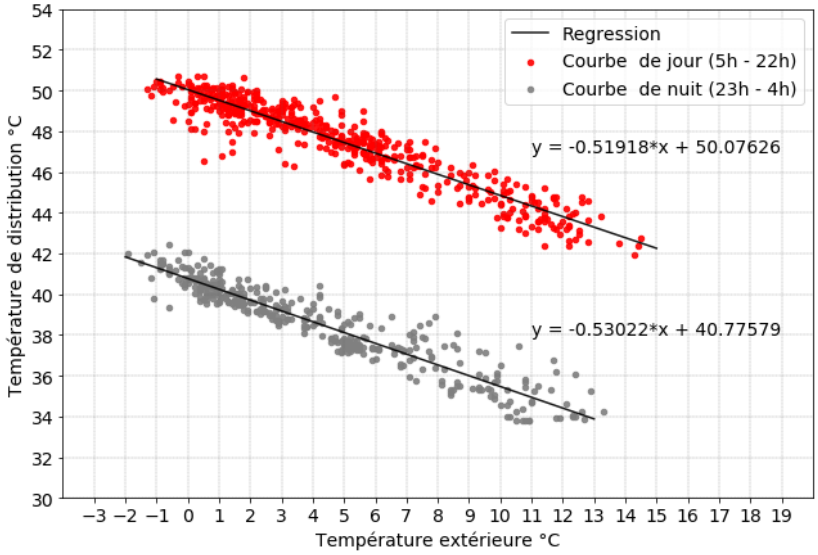


Figure 35 : Courbes de chauffe (jour et nuit) programmées dans la simulation. Les courbes ont issues des mesures du site pilote « St-Julien » pour la période de novembre 2018 à février 2019.

Annexe D. Assemblages des modèles TRNSYS

PAC dédiée ECS

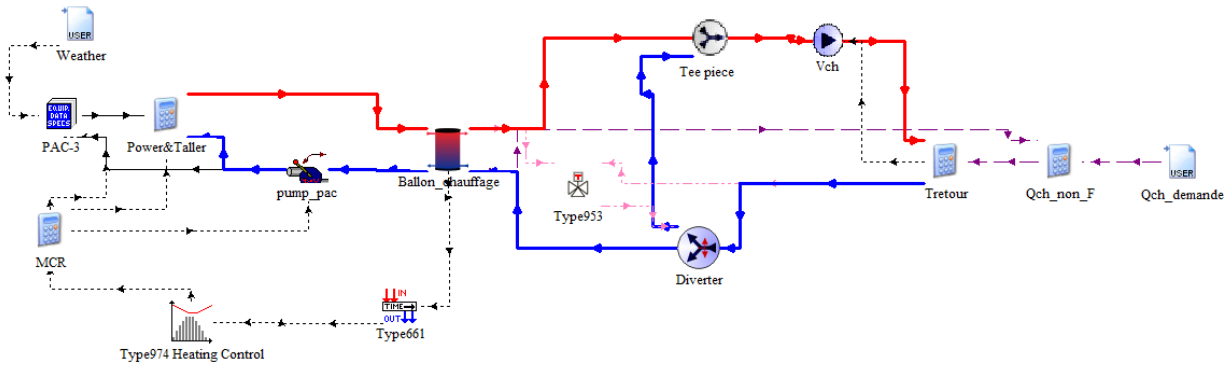


Figure 36 : Simulation PAC dédiée ECS dans l'enivrement TRNSYS

PAC dédiée chauffage

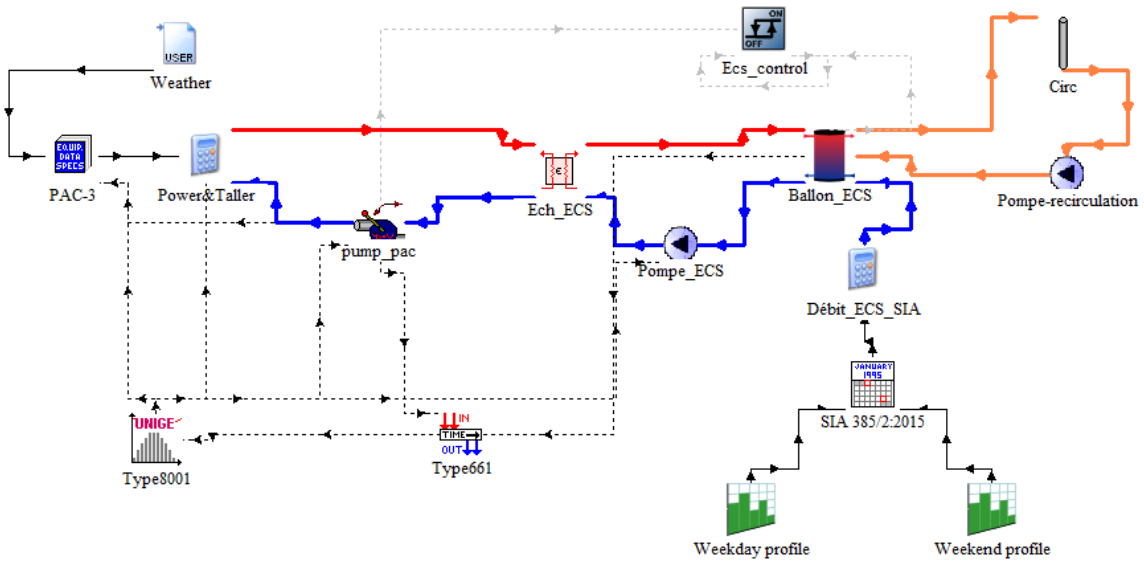


Figure 37 : Simulation PAC dédiée chauffage dans l'enivrement TRNSYS

Annexe E. Jours typiques de la charge et décharge du ballon

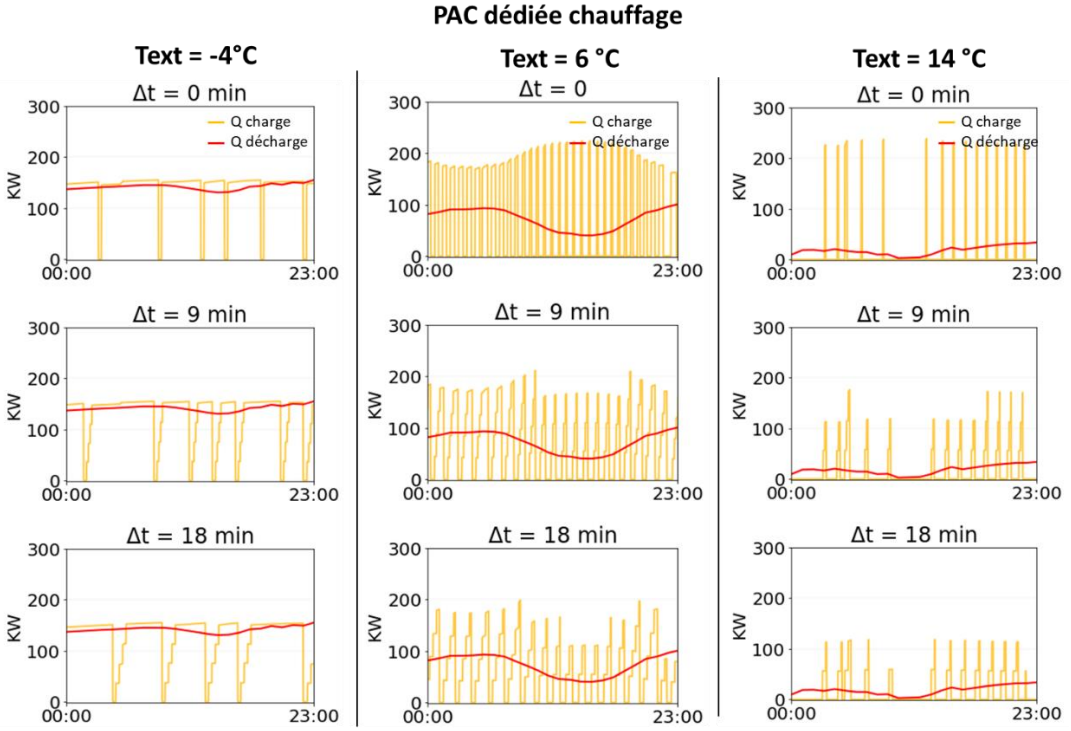


Figure 38 : Jours typiques de la charge et décharge du ballon de chauffage dans le système avec PAC dédiée chauffage, pour différentes températures extérieures journalières (-4°C, 6°C et 14°C) et différents délais d'activation (0, 9 et 18 min).

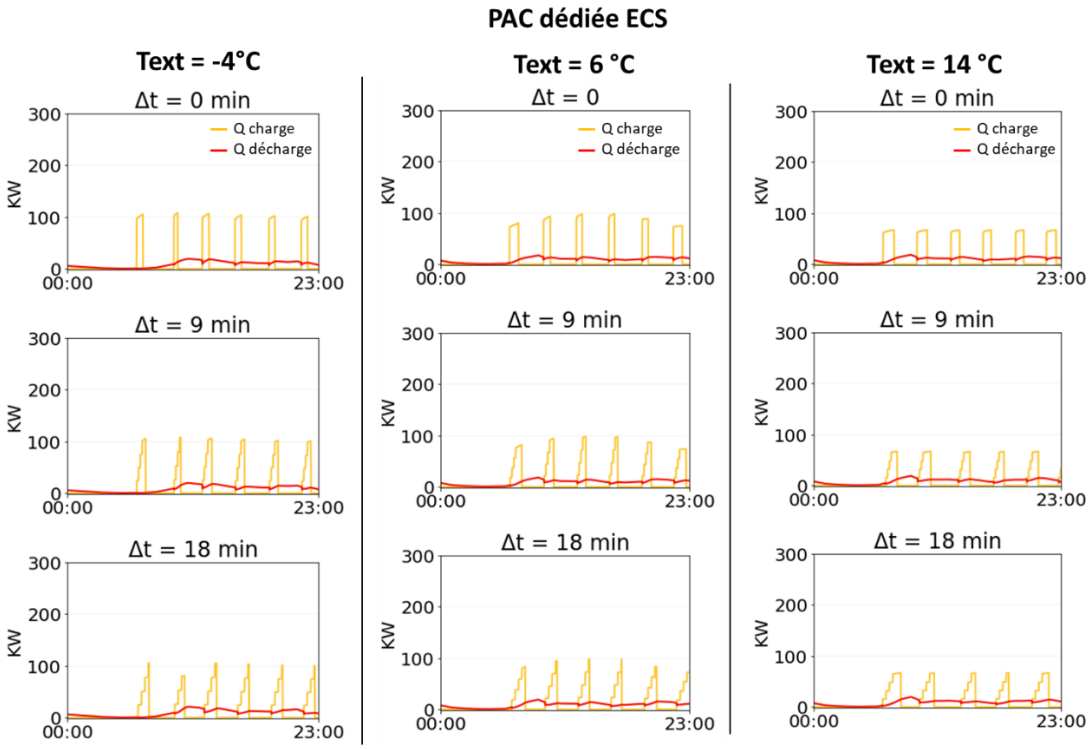


Figure 39 : Jours typiques de la charge et décharge du ballon d'ECS dans le système avec PAC dédiée ECS, pour différentes températures extérieures journalières (-4°C, 6°C et 14°C) et différents délais d'activation (0, 9 et 18 min).

Annexe F. Résultats journaliers sur système de référence PAC combinée chauffage & ECS

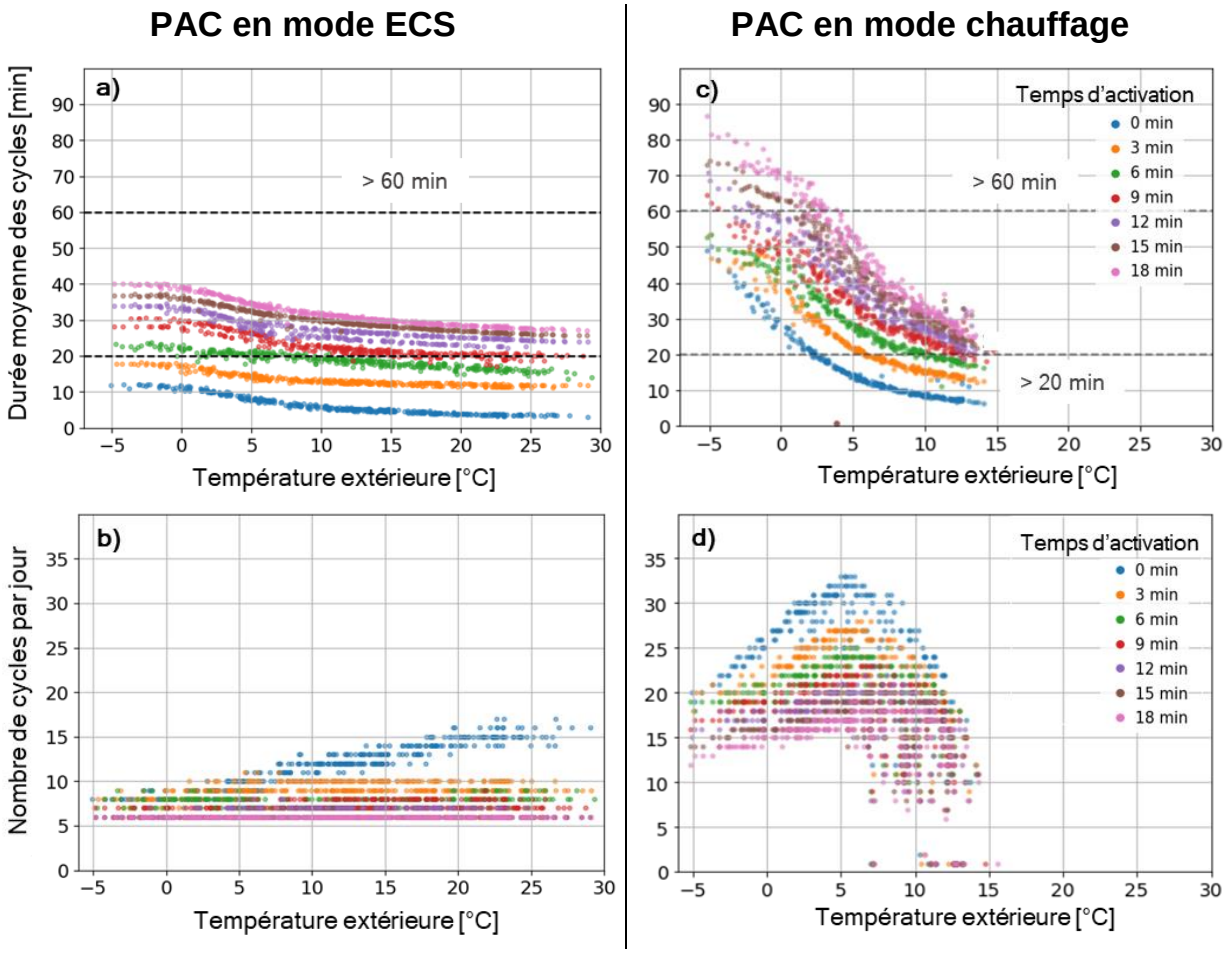


Figure 40 : Variations saisonnières du système de référence PAC combinée chauffage & ECS, en mode ECS (à gauche) et en mode chauffage (à droite) : durée moyenne des cycles et nombre de cycles par jour en fonction de la température extérieure pour différents temps d'activation des étages de puissance (valeurs journalières).

Annexe G. Résultats de l'étude de sensibilité PAC dédiée

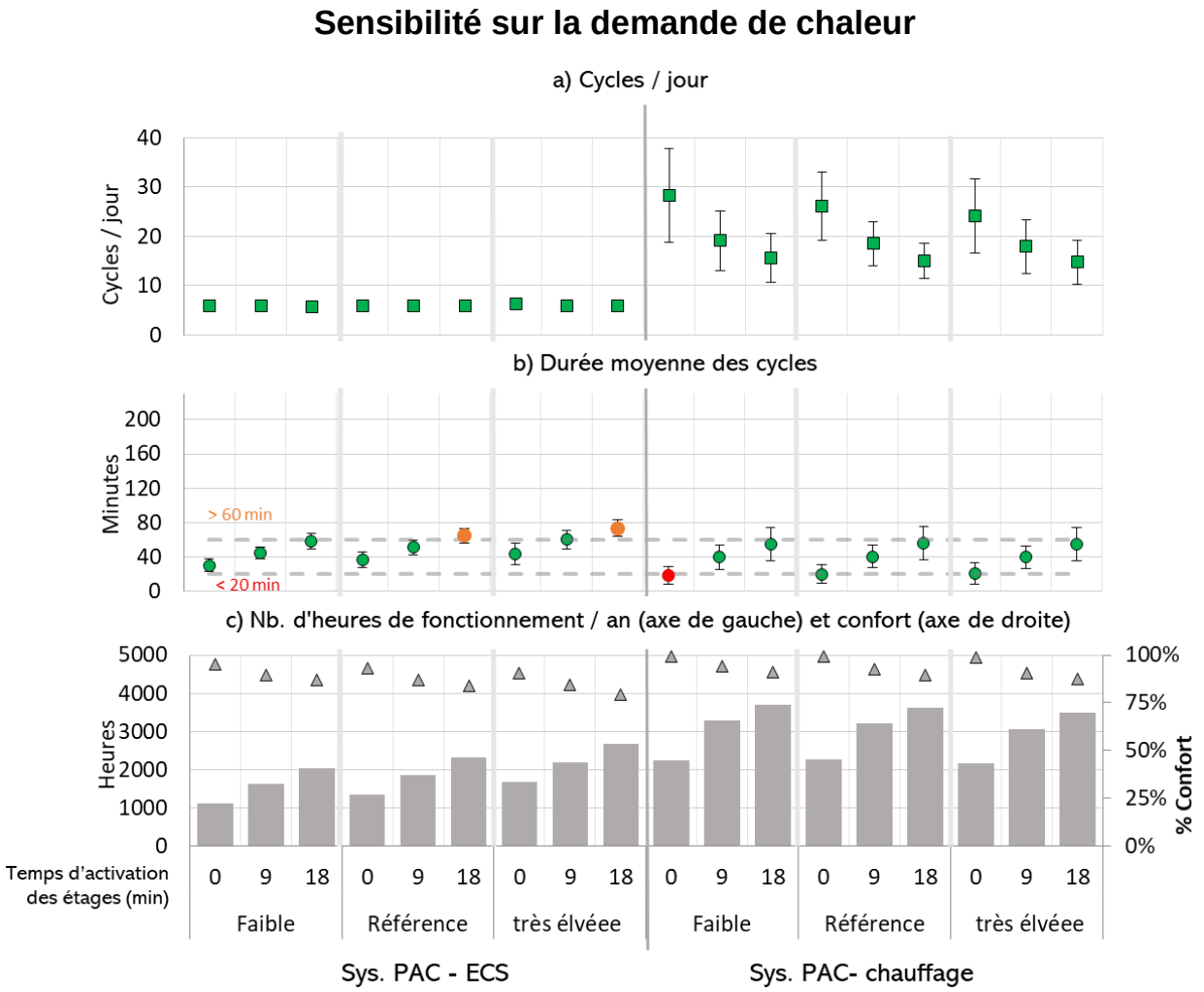


Figure 41 : Résultats de l'étude de sensibilité sur la demande de chaleur des systèmes PAC-ECS (à gauche) et PAC-chauffage (à droite). Pour chaque variante, le temps d'activation de chaque étage de puissance a été varié de 0 à 18 minutes. (a) Le nombre de cycles/jour et (b) la durée des cycles sont des valeurs moyennes au cours de l'année. Chaque valeur moyenne est accompagnée de son écart-type qui montre la dispersion des cycles au cours de l'année.

Sensibilité sur le volume des ballons

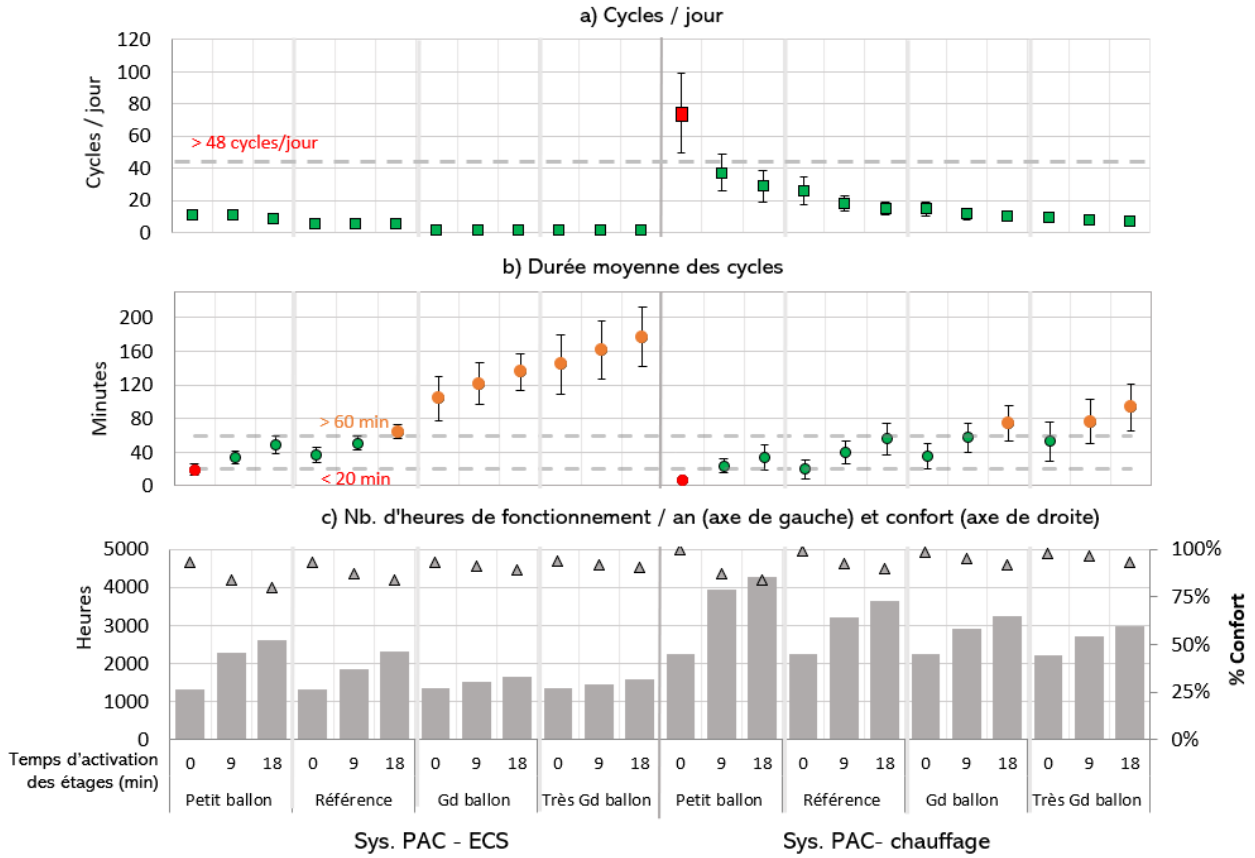


Figure 42 : Résultats de l'étude de sensibilité sur le volume des ballons des systèmes PAC-ECS (à gauche) et PAC-chauffage (à droite). Pour chaque variante, le temps d'activation de chaque étage de puissance a été varié de 0 à 18 minutes. (a) Le nombre de cycles/jour et (b) la durée des cycles sont des valeurs moyennes au cours de l'année. Chaque valeur moyenne est accompagnée de son écart-type qui montre la dispersion des cycles au cours de l'année.

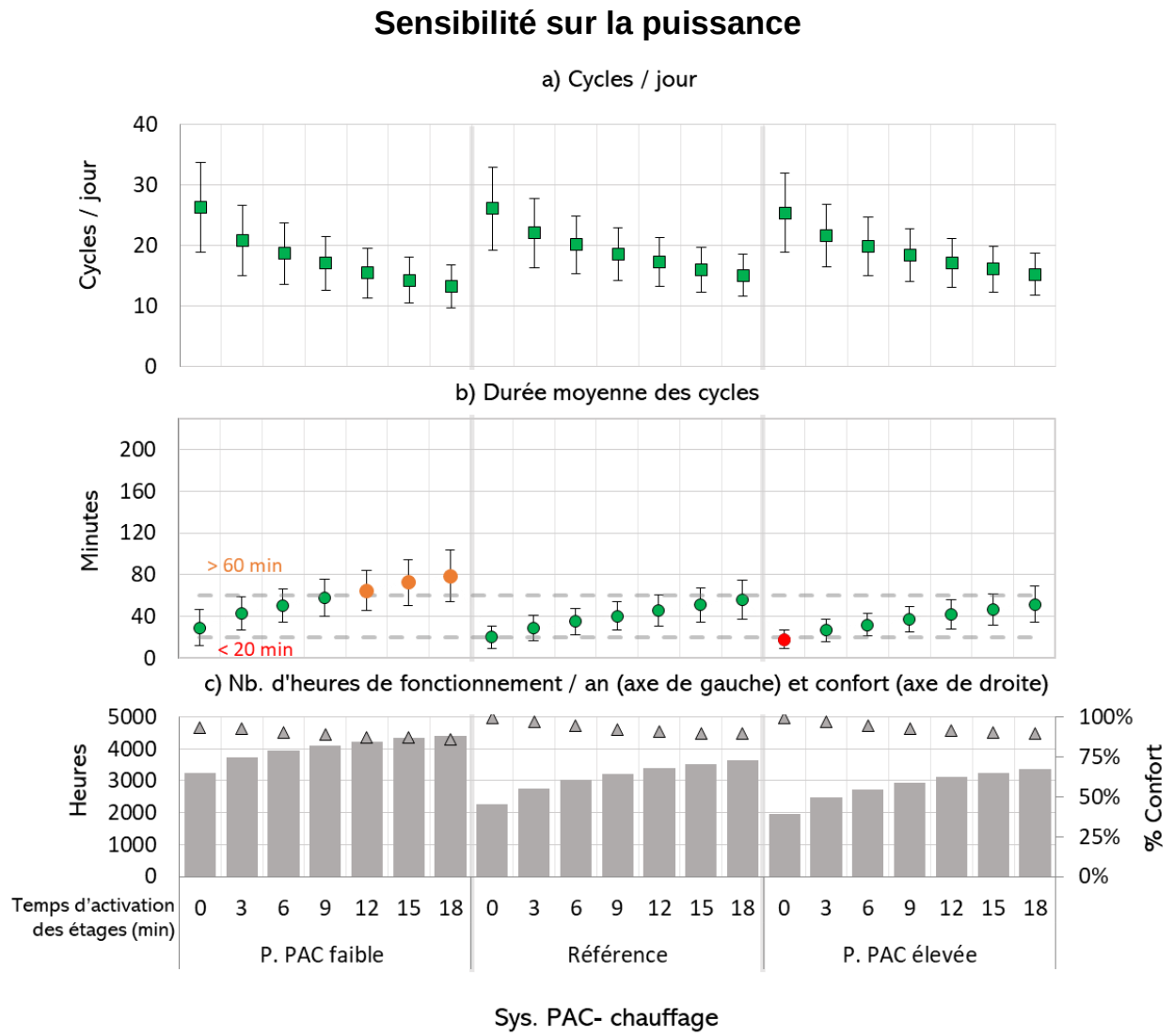


Figure 43 : Résultats de l'étude de sensibilité sur la puissance du système PAC – chauffage. Pour chaque variante, le temps d'activation de chaque étage de puissance a été varié de 0 à 18 minutes. (a) Le nombre de cycles/jour et (b) la durée des cycles sont des valeurs moyennes au cours de l'année. Chaque valeur moyenne est accompagnée de son écart-type qui montre la dispersion des cycles au cours de l'année.

Sensibilité sur la recirculation du système PAC – ECS

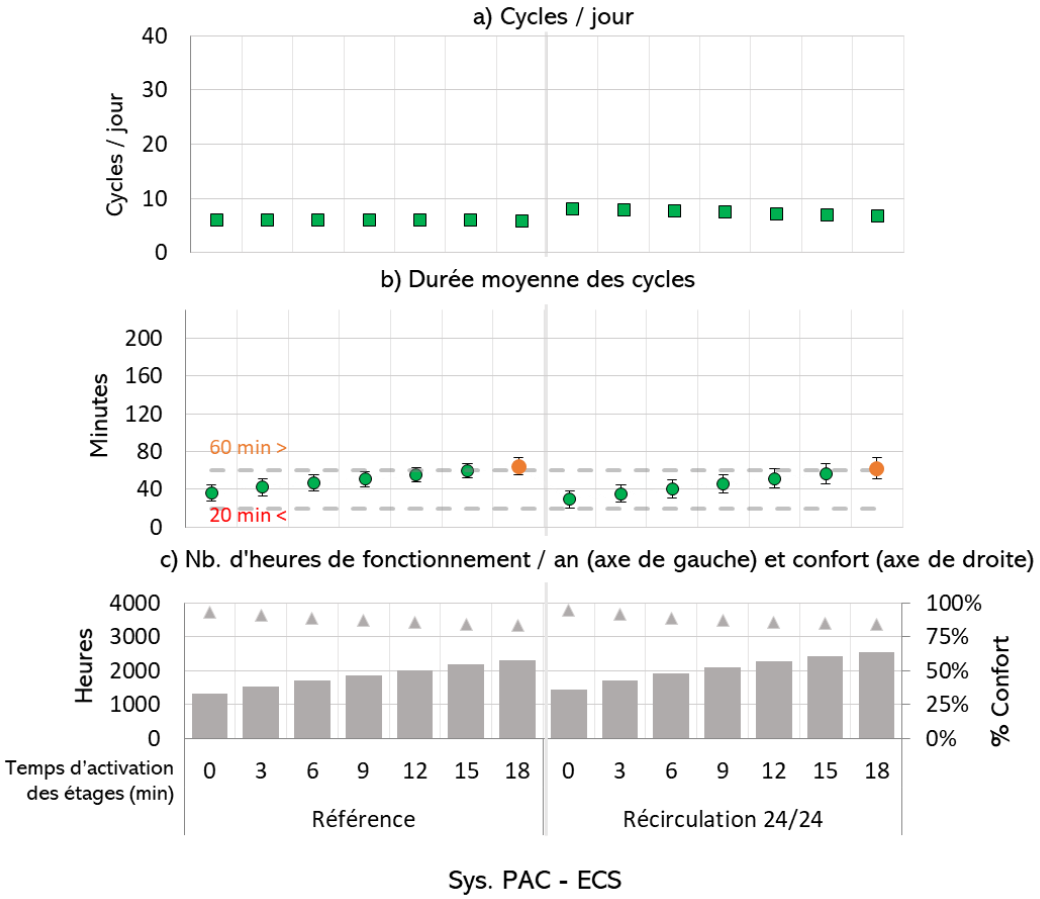


Figure 44 : Résultats de l'étude de sensibilité sur la recirculation du système PAC – ECS. Pour chaque variante le délai d'activation de chaque étage de puissance a été varié de 0 à 18 minutes. (a) Les cycles/jour et (b) la durée de cycles sont des valeurs moyennes au cours de l'année. Chaque valeur moyenne compte avec son écart-type qui montre la dispersion saisonnière des cycles au cours de l'année.

Annexe H. Résultats de l'étude de sensibilité PAC combinée chauffage & ECS

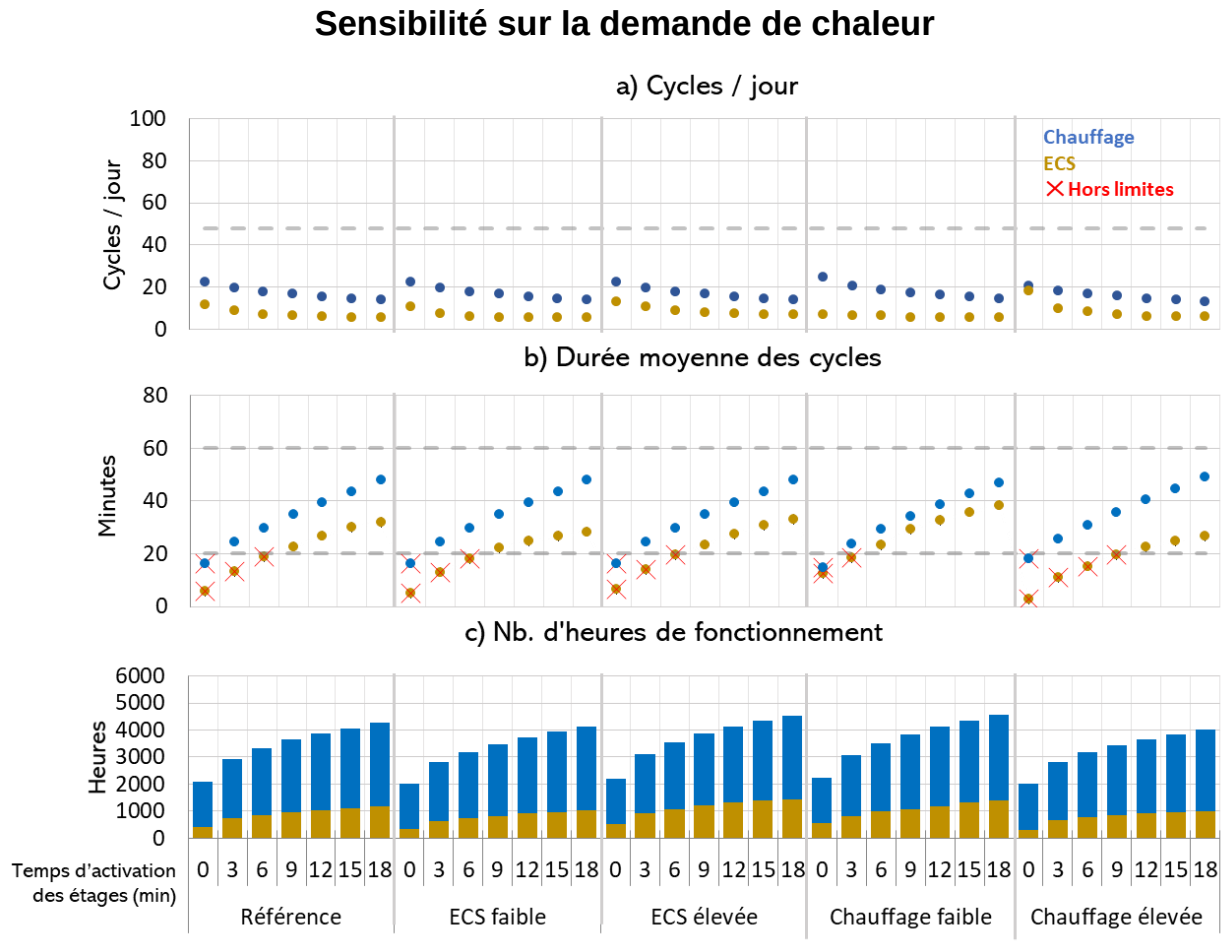


Figure 45 : Résultats de l'étude de sensibilité sur la demande du système PAC combinée chauffage & ECS avec différents temps d'activation des étages de puissance. Il s'agit de la superposition des résultats entre les systèmes de référence PAC-chauffage (bleu) et PAC-ECS (doré) avec une même puissance PAC installée. (a) Le nombre de cycles et (b) la durée de cycles sont des valeurs moyennes au cours de l'année. Les valeurs en dehors des limites recommandées sont marquées avec une croix (rouge).

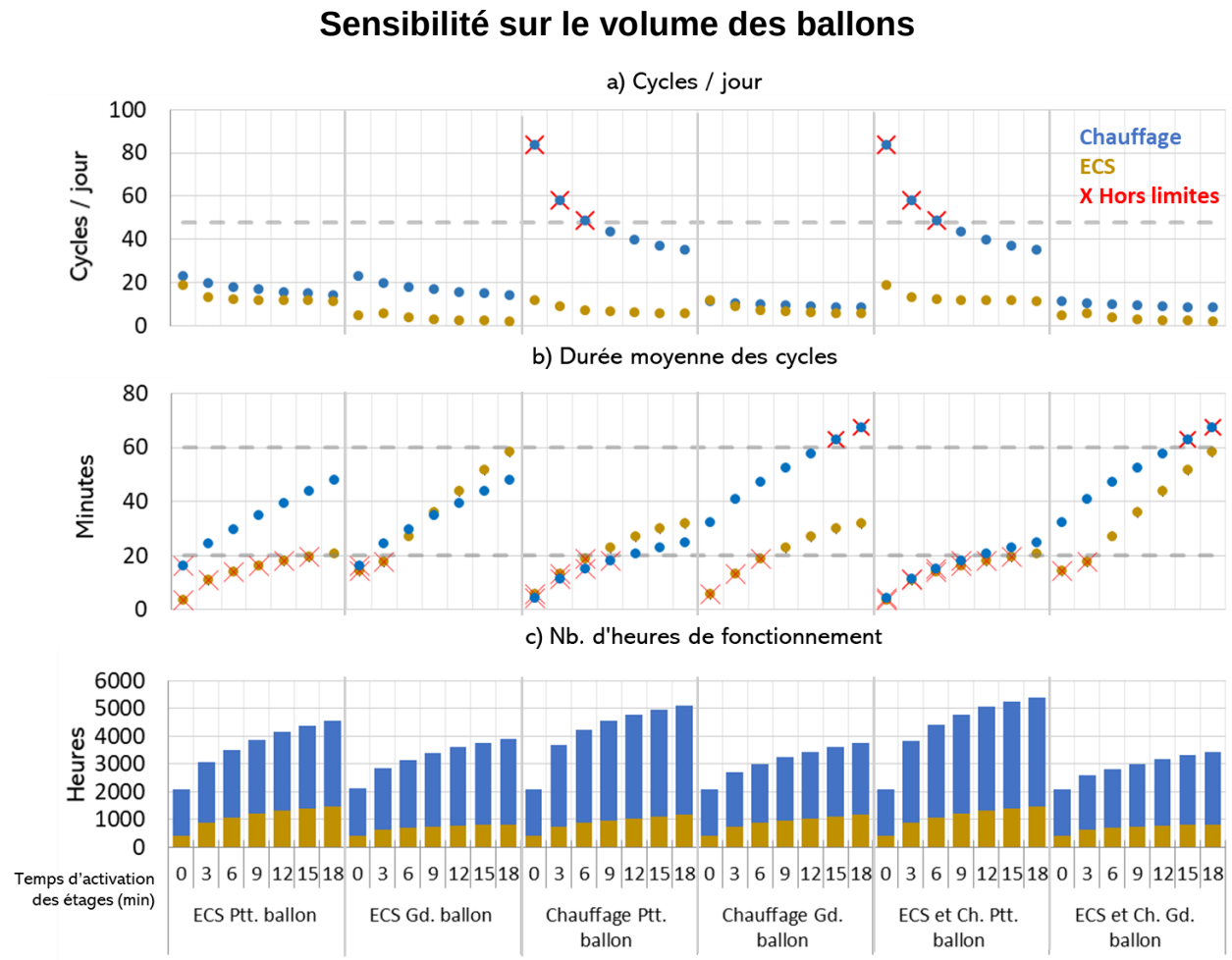


Figure 46 : Résultats de l'étude de sensibilité sur le volume des ballons du système PAC combinée chauffage & ECS avec différents temps d'activation des étages de puissance. Il s'agit de la superposition des résultats entre les systèmes de référence PAC-chauffage (bleu) et PAC-ECS (doré) avec une même puissance PAC installée. (a) Le nombre de cycles et (b) la durée de cycles sont des valeurs moyennes au cours de l'année. Les valeurs en dehors des limites recommandées sont marquées avec une croix (rouge).

Avec le soutien de
suisseénergie

Annexe I. Liste de problèmes rencontrés sur les sites pilotes

Site pilote	Catégorie(s)	Problème	Conséquence	Solution	Limites	Spécifique ou général
St-Julien	Rendement, Durée de vie des équipements	Débit des circulateurs fixe	COP PAC faible lors de la production à faible puissance	Activation de plusieurs compresseurs à la fois à chaque enclenchement d'une PAC *ou* Utilisation de circulateur à débit variable	Réduction de la durée des cycles et surproduction par rapport à la demande durant certaines périodes	Spécifique à ce modèle (industriel)
St-Julien	Rendement, Contraintes fabricant	Pour assurer la régulation, la PAC « master » doit connaître la température de retour de la PAC « slave »	Le circulateur de la PAC « slave » doit fonctionner en tout temps. Comme il est à débit fixe, sa consommation est élevée et le COP du système est fortement péjoré.	Utilisation d'une MCR pour réguler les deux PAC (« master » et « slave » indépendamment)	Oblige à disposer d'une MCR alors que le système ne comporte que 2 PAC.	Général
St-Julien	Contraintes fabricant	La MCR peut gérer l'enclenchement des PAC, mais pas de leurs compresseurs.	Régulation plus complexe et faisant appel à la fois à l'automaticien et au technicien des PAC.	Modification des possibilités de régulation par le fabricant	Si la régulation est mal faite, il y a un risque d'endommagement des PAC. Problématique par rapport à la garantie des PAC.	Général
St-Julien	Contraintes fabricant	Avec une PAC « master » et des PAC « slave », un changement de régulation interne de la PAC « master » se répercute sur les PAC « slave » automatiquement. Ce n'est pas le cas avec une MCR.	Risque d'oublier d'appliquer la nouvelle régulation à toutes les PAC.	Modification des possibilités de régulation par le fabricant de sorte à ce qu'il n'y ait pas besoin d'utiliser une MCR		Général
St-Julien	Rendement, Contraintes fabricant	Cycles de dégivrage programmés à intervalle de temps fixe	Consommation d'énergie plus élevée qu'avec un dégivrage adapté aux conditions réelles, et difficulté à répondre à la demande car les PAC sont moins disponibles.	Modification de la régulation par le fabricant : développer un algorithme qui gère le dégivrage selon une mesure du ΔP et du ΔT de l'air à l'évaporateur		Spécifique à ce modèle

Site pilote	Catégorie(s)	Problème	Conséquence	Solution	Limites	Spécifique ou général
Daru	Contraintes fabricant	Sans MCR, ce sont des PAC « master » qui gèrent des PAC « slave »	Si une panne survient sur une PAC « master », alors les PAC « slave » qui en dépendent sont bloquées.	Modification des possibilités de régulation par le fabricant : la PAC « master » devrait idéalement pouvoir transférer le contrôle à une autre PAC si elle tombe en panne.		Général
Daru	Contraintes fabricant, Confort, Rendement	Une PAC « master » ne peut gérer que 2 PAC « slave ». Comme il y a 6 PAC sur ce site, le système est régulé par 2 PAC « master » qui ne communiquent pas entre elles.	La gestion des cascades est beaucoup plus complexe et les PAC ont parfois du mal à répondre à la demande. Cela affecte la consommation de gaz de la chaudière et éventuellement le confort des usagers.	Utiliser une MCR *ou* Modification des possibilités de régulation par le fabricant : augmenter le nombre de PAC « slave » gérées par une PAC « master ».	La MCR peut gérer l'enclenchement des PAC, mais pas de leurs compresseurs. La modification d'un paramètre dans la régulation interne des PAC doit être fait manuellement dans chacune des PAC.	Spécifique à ce modèle
Daru	Contraintes fabricant, Confort, Rendement	Chaque PAC ne transmet pas d'information sur son état (nombre de compresseurs activités, dégivrage, panne haute pression, etc.)	Il est difficile de répondre à la demande car la libération d'une PAC par le système de régulation ne garantit pas son enclenchement immédiat. Cela affecte la consommation de gaz de la chaudière et éventuellement le confort des usagers.	Activer plus de PAC en même temps pour augmenter la couverture de la demande par les PAC, selon le gradient de la demande. *ou* Modification de la régulation par le fabricant pour tenir compte de l'état de fonctionnement des différentes PAC du système.	Risque de retours chauds au niveau des PAC si trop de PAC sont enclenchées par rapport à la demande. Les PAC s'arrêteraient alors et la chaudière comblerait une part encore plus grande de la demande.	Général
Daru	Rendement	L'enclenchement de la chaudière se fait à partir d'une temporisation.	Si le délai d'activation entre chaque PAC sont trop longs ou que la temporisation de la chaudière est trop courte, la chaudière va s'enclencher alors que les PAC n'ont pas atteint leur puissance maximale.	Le délai d'activation de la cascade de PAC (y.c les compresseurs) doit être en accord avec la temporisation de la chaudière.	Quelques paramètres sont bridés et seul le fournisseur peut les modifier.	Général

Site pilote	Catégorie(s)	Problème	Conséquence	Solution	Limites	Spécifique ou général
Daru	Rendement, Contraintes fabricant	Débit fixe des PAC pour des questions de sécurité interne (dégivrage dimensionné pour le débit maximal)	Consommation d'électricité des circulateurs plus importante et donc péjoration du COP système.	Modification de la régulation par le fabricant : faire varier le débit en fonction du nombre de compresseurs activés et de l'activation du mode dégivrage		Spécifique à ce modèle
Daru	Rendement, Contraintes fabricant	Cycles de dégivrage programmés à intervalle de temps fixe	Consommation d'énergie plus élevée qu'avec un dégivrage adapté aux conditions réelles, et difficulté à répondre à la demande car les PAC sont moins disponibles.	Modification de la régulation par le fabricant : développer un algorithme qui gère le dégivrage selon une mesure du ΔP et du ΔT de l'air à l'évaporateur		Spécifique à ce modèle
Daru	Contraintes fabricant, Durée de vie des équipements	Pas de gestion des cascades à proprement parler en ECS : chaque PAC est indépendante et s'enclenche selon un écart de température par rapport à la consigne (hystérèse)	La PAC dont l'hystérèse est la plus faible fonctionne davantage. Les heures de fonctionnement ne sont donc pas équilibrées entre les différentes PAC.	Modifier périodiquement les hystérèses pour rééquilibrer les heures de fonctionnement des PAC. *ou* Modification de la régulation par le fabricant : centraliser la régulation sur la PAC « master », de sorte à ce que la PAC « master » équilibre les heures de fonctionnement des PAC.	Dans le cas de la modification périodique des hystérèses : Qui doit se charger d'effectuer cette modification ? Risque d'oubli et donc d'usure inégale des PAC.	
Daru	Contraintes fabricant	Pas de gestion des cascades à proprement parler en ECS : chaque PAC est indépendante et a besoin de sa propre sonde de température dans le ballon d'ECS	Il y a besoin de plusieurs sondes dans le ballon d'ECS pour mesurer une même température	Centraliser la régulation sur une MCR *ou* Modification de la régulation par le fabricant : centraliser la régulation sur la PAC « master », de sorte à ce qu'il n'y ait besoin que d'une seule sonde dans le ballon		