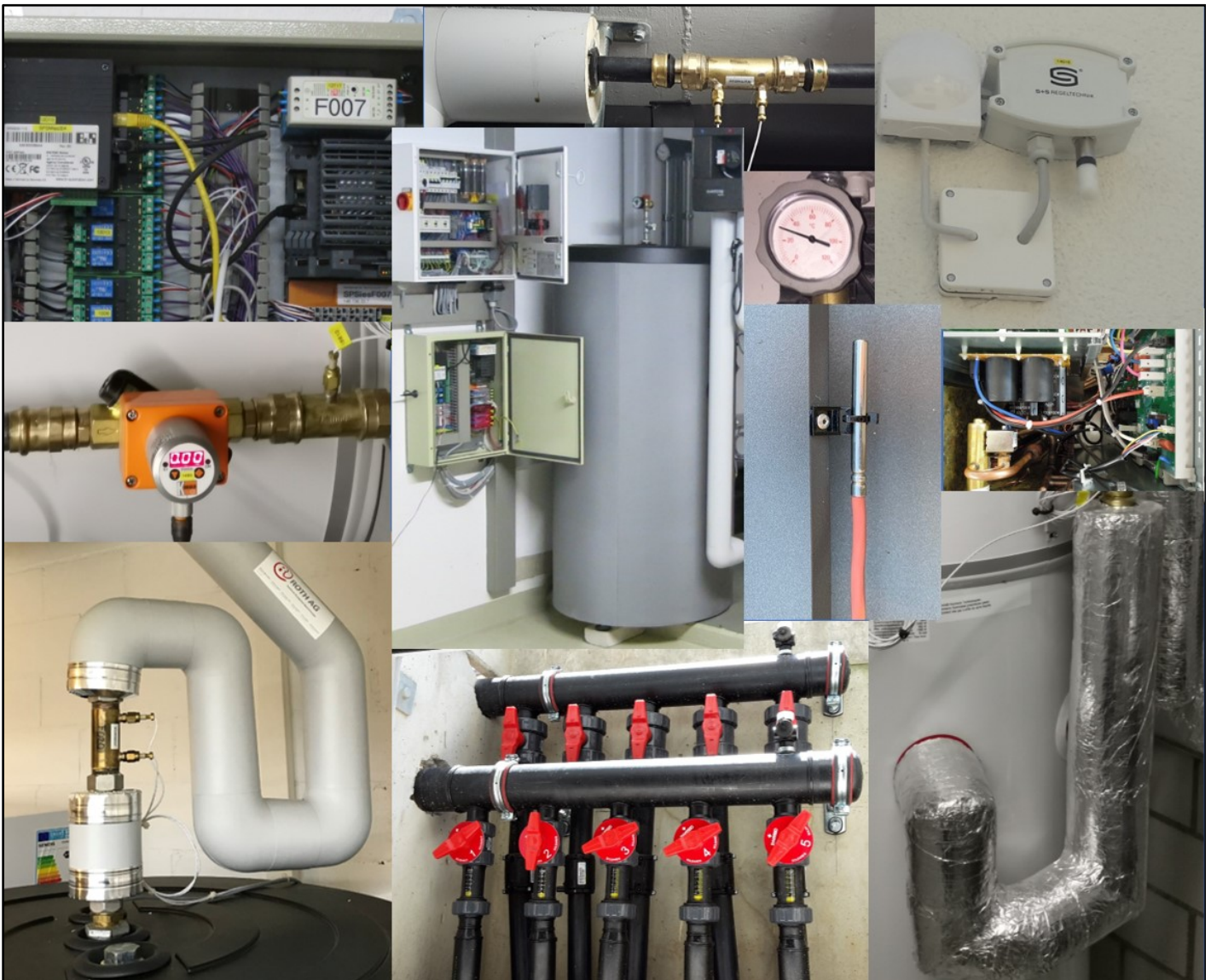


Rapport annuel, 7 janvier 2022

Rapport « Mesures de terrain des installations de pompes à chaleur Saison de chauffage 2020/2021 »



Auteurs

Manuel Prinzing	Institut des systèmes énergétiques (IESE), OST - Haute école spécialisée de Suisse orientale
Matthias Berthold	Institut des systèmes énergétiques (IESE), OST - Haute école spécialisée de Suisse orientale
Stefan Bertsch	Institut des systèmes énergétiques (IESE), OST - Haute école spécialisée de Suisse orientale
Mick Eschmann	Institut des systèmes énergétiques (IESE), OST - Haute école spécialisée de Suisse orientale

Cette étude a été réalisée sur mandat de SuisseEnergie.
Les auteurs sont seuls responsables de son contenu.

Table des matières

1.	But du projet.....	5
1.1	Description de l'objet.....	5
1.2	Limites du système et chiffres clés.....	16
2.	Résultats et évaluations des installations de pompes à chaleur	19
2.1	Comparaison des indices d'efficacité (COPA+ et TUC)	19
2.2	Influence des niveaux de température.....	21
2.3	Comparaison des indices d'efficacité pour la production d'eau chaude sanitaire	24
2.4	Chaleur de chauffage, besoins totaux en chaleur et degrés-jours de chauffage	26
2.5	Comparaison des températures de source en mode chauffage.....	30
2.6	Évolution de la température des sondes géothermiques	32
2.7	Incidents, optimisations et divers	32
3.	Évaluations spéciales en détail	34
3.1	Eau chaude sanitaire – stratégies de régulation	34
3.2	Chauffe-eau pompe à chaleur	37
3.3	Périodes de froid	38
3.4	Mode silencieux	41
4.	Conclusion et perspectives	43
5.	Annexe	45
5.1	Méthodologie et équipement de mesure	45

Résumé

Ce rapport annuel traite des données de mesure de 23 installations de pompe à chaleur, sur un total de 66 périodes de chauffe. Sur les 23 installations, 11 installations comprennent des pompes à chaleur sol/eau, et 12 installations comprennent des pompes à chaleur air/eau. Dans 4 installations sur 23, l'eau chaude sanitaire (ECS) est produite avec une pompe à chaleur séparée (chauffe-eau pompe à chaleur). Enfin, deux installations supplémentaires ont pu être récemment intégrées à la campagne de mesure. L'analyse des données relatives à ces deux nouvelles installations ne pourra cependant se faire qu'à la fin de la prochaine période d'observation. L'efficacité de l'ensemble des installations est évaluée durant une saison de chauffe complète au minimum. Ensuite de quoi, des optimisations sont réalisées au niveau de la régulation, et une nouvelle évaluation est faite pour attester de l'efficacité sur les installations de ces optimisations. Les installations qui font partie du programme de mesures in situ sont toutes situées dans des régions climatiques différentes. Quant aux bâtiments, ils diffèrent au niveau de l'enveloppe du bâtiment, du système de distribution de la chaleur, ainsi que du nombre et du comportement des habitants.

Lors de la période particulièrement froide du milieu du mois de février 2021, l'épingle électrique s'est enclenchée pour la première fois en mode chauffage, durant une courte période, sur deux installations. En réalité, ce complément de chauffage n'aurait pas été nécessaire pour assurer le confort des habitants. Il a été engendré par un problème de régulation. De plus, concernant l'installation n°16, l'épingle électrique a également comblé un déficit de chauffage durant une réparation, sans perte de confort pour les habitants. En effet, un premier problème un peu plus conséquent est apparu sur cette installation, entre mi-décembre 2020 et mi-janvier 2021, au niveau du compresseur.

Au cours de la dernière saison de chauffe (2020/21), on a pu mesurer un taux moyen d'utilisation de la chaleur (« Wärmenutzungsgrad » ou WNG en allemand) de 3.0, pour le chauffage et l'ECS, sur les installations comprenant des pompes à chaleur air/eau. Le taux moyen d'utilisation de la chaleur varie de 2.2 pour l'installation n°24, à 3.9 pour l'installation n°15. Les valeurs pour les installations avec pompe à chaleur sol/eau (sondes géothermiques) sont plus élevées, avec une moyenne à 4.5 et des taux variant de 3.1 pour l'installation n°6, à 5.2 pour les installations n°18 et n°21.

Lors de la préparation d'ECS, les pompes à chaleur avec régulation de puissance présentent un potentiel d'optimisation facile à exploiter, grâce à l'adaptation du taux de charge de l'ECS.

Enfin, alors que la problématique du bruit engendré par les pompes à chaleur air/eau fait souvent débat, les mesures in situ n'ont pas permis de mettre en évidence une utilisation des pompes à chaleur en mode « silent mode ». Seul un abaissement nocturne classique a pu être observé dans quelques bâtiments.

1. But du projet

L'efficacité des pompes à chaleur dépend fortement de leur intégration dans le système de chauffage et des réglages du régulateur de la pompe à chaleur. Cela a déjà été constaté lors de la longue campagne de mesures sur le terrain "ANIS" et dans les projets de suivi. Les données significatives collectées dans le cadre du projet ANIS sont constituées de relevés manuels et de quelques mesures effectuées par des enregistreurs de données. De nombreuses directives de conception et d'installation actuellement en vigueur ont été élaborées sur la base de ces évaluations.

Grâce au développement technologique et à la numérisation, il est aujourd'hui possible d'automatiser les mesures sur le terrain des PAC et de collecter des séries de données à haute résolution. Sur la base de ces séries de données à haute résolution, il est possible d'effectuer des analyses qui n'étaient pas possibles avec des mesures manuelles. Les analyses portent par exemple sur :

- le dégivrage
- le comportement des cycles
- la répartition détaillée selon les différents degrés d'utilisation
- des mesures aux différentes limites du système, localement et dans le temps
(Ex. mode de chauffage, de recharge ou de refroidissement, dégivrages, etc.)
- des informations sur le bâtiment et le comportement des utilisateurs
- l'influence des éléments auxiliaires sur l'efficacité (pompe de circulation, corps-de-chauffe, etc.)

Les objectifs spécifiques du projet " Mesure de terrain des PAC " sont donc la saisie automatisée et à haute résolution temporelle des installations de pompes à chaleur sur le terrain et l'analyse des résultats de mesure. Des chiffres clés appropriés seront déterminés et publiés à des fins de comparaison.

Jusqu'en 2020, seules les nouvelles installations de pompes à chaleur installées principalement dans une maison individuelle (nouvelle construction ou rénovation) étaient prises en compte. A partir de 2021, ne sont incluses dans la campagne de mesure sur le terrain que les installations dans des immeubles collectifs d'une puissance de chauffage d'environ 20-30 kW. Les installations existantes ne peuvent pas participer, car les pompes à chaleur sont mesurées avant leur installation au centre d'essai des pompes à chaleur WPZ à Buchs SG et l'équipement de mesure de la campagne de mesure sur le terrain est étalonné en conséquence.

Il est ainsi possible de comparer les performances des pompes à chaleur sur le terrain avec les performances en laboratoire et de déterminer les causes des éventuelles différences (fabrication de la pompe à chaleur, réglages du régulateur, installations, etc.)

1.1 Description de l'objet

Au cours de la dernière période d'observation, une installation de pompe à chaleur air/eau dans une maison individuelle récemment construite ainsi qu'une grande installation de pompe à chaleur sol/eau dans deux immeubles d'habitation contigus ont été ajoutées en remplacement d'un chauffage au mazout. En raison de retards dans la construction, nous ne disposons pas encore de données de mesure pour une période d'observation complète. Par conséquent, aucune nouvelle installation n'est incluse dans cette évaluation depuis le dernier rapport de terrain. Fin août 2021, 23 installations au total faisaient l'objet d'une mesure sur le terrain. Il s'agit de 12 pompes à chaleur air/eau, dont huit modèles à vitesse variable, et de 11 pompes à chaleur sol/eau, dont sept modèles à vitesse variable. Pour quatre objets, l'eau chaude sanitaire est chauffée au moyen d'un chauffe-eau à pompe à chaleur séparé. Le mode refroidissement est activé pour cinq objets. Les installations 2, 10, 13 et 21 refroidissent passivement au moyen d'une sonde géothermique, seule la pompe à chaleur air/eau 15 refroidit activement avec un compresseur.

Actuellement, l'objet 22, avec dix personnes signalées, est le seul immeuble collectif dont les données sont exploitables dans le programme de mesure sur le terrain. L'objet 19 est la seule installation de pompe à

chaleur dont la sonde géothermique verticale (SGV) est uniquement remplie d'eau dans cette campagne de mesure. Pour une meilleure vue d'ensemble, cet objet est également mentionné dans la catégorie des pompes à chaleur eau glycolée/eau.

Les 23 installations mesurées sont présentées dans ce rapport. Le tableau 1 présente un bref aperçu des installations.

Ainsi, selon l'installation, cinq périodes de chauffage au maximum (2016/17, 2017/18, 2018/19, 2019/20 et 2020/21) peuvent être évaluées. Pour les objets nouvellement enregistrés, il est fréquent que la saison de chauffage complète de 365 jours ne soit pas encore mesurée lors de la première période de mesure. Si le nombre de jours de mesure est inférieur à 350, cette saison de chauffage est marquée d'un astérisque. (Une comparaison avec d'autres périodes ou installations n'est que partiellement possible en raison du fonctionnement hivernal raccourci). Les objets avec moins de 300 jours de mesure par "saison de chauffage" ne sont pas représentés. L'annexe 14 pour la période écoulée 2020/21 constitue une exception : la transmission des données a été interrompue pendant une longue période, si bien que seuls 293 jours de mesure ont pu être saisis dans la base de données. A partir du 8 avril, aucune donnée n'est disponible pendant environ deux mois. Comme cela ne concerne que partiellement la période de chauffage, les données pour la pompe à chaleur sol/eau avec chauffe-eau pompe à chaleur séparé sont tout de même présentées. L'interruption de la connexion est due à des changements de l'opérateur de téléphonie mobile dans le domaine des normes de transmission 2G et 3G. Dans l'objet 2, le capteur de débit volumétrique pour le puits est tombé en panne en hiver 2021 et a été remplacé avec du retard en raison de la pandémie. La puissance de chauffage thermique n'a donc pas pu être déterminée correctement, raison pour laquelle toutes les données nécessitant cette valeur de mesure ne sont pas représentées. Les autres données de mesure (y compris la puissance de charge thermique) ont été correctement saisies et sont représentées pour la période de mesure 2020/21.

Des travaux de transformation ont été effectués sur l'installation de chauffage de l'objet 18. Avec une période d'inoccupation plus longue, cette installation ne peut être évaluée que de manière limitée pendant cette période de chauffage.

Tableau 1 : Brève description des objets

Numéro de l'objet	Début des mesures	PAC air / eau	PAC sol / eau	Construction neuve	Assainissement	Régulation de la vi- tesse	Refroidissement actif	Remarques :
1	11.05.2017	x		x				<ul style="list-style-type: none"> • Beaucoup de démarrages du compresseur en mode chauffage (plus de 20 démarrages par jour, ne s'applique pas à la recharge) • Depuis le service d'entretien du 24.09.2019, activation hebdomadaire de la fonction anti-légionellose. • Corps-de-chauffe électrique : PAC et accumulateur ECS • SCOP₃₅ = 3.85 • SCOP₅₅ = 2.95

Numéro de l'objet	Début des mesures	PAC air / eau	PAC sol / eau	Construction neuve	Assainissement	Régulation de la vi- tesse	Refroidissement actif	Remarques :
2	01.01.2017		x	x		x	x	<ul style="list-style-type: none"> L'objet a été installé en décembre 2016 Chauffe et refroidit toujours le même jour Corps-de-chauffe électrique : uniquement réservoir d'eau chaude sanitaire SCOP₃₅ = 4.9 SCOP₅₅ = n.a. – Label énergétique A++ Panne du capteur de débit au début de l'année 2021. Cette installation n'est donc pas incluse dans l'évaluation 2020/21.
3	01.07.2016	x			x	x		<ul style="list-style-type: none"> Beaucoup de démarrages du compresseur en mode chauffage (plus de 20 démarrages par jour, ne s'applique pas à la recharge) Pas de refroidissement depuis sept. 2016 Corps-de-chauffe électrique: PAC et accumulateur ECS SCOP₃₅ = 4.78 SCOP₅₅ = 3.68
4	01.07.2017		x		x	x		<ul style="list-style-type: none"> Installation de fenêtres à isolation thermique en déc. 2017 La PAC fonctionne souvent 24h/24 (par ex. du 11 novembre au 11 décembre 2017 sans interruption). Corps-de-chauffe électrique : PAC et accumulateur ECS SCOP₃₅ = 5.23 SCOP₅₅ = 4.13 Conduite de circulation par gravité
5	25.10.2017 (habité depuis 24.3.18)	x		x				<ul style="list-style-type: none"> Mesure effectuée depuis le 25.10.2017, mais habitée seulement depuis le 24.3.2018 Corps-de-chauffe électrique : PAC et accumulateur ECS SCOP₃₅ = 3.85

Numéro de l'objet	Début des mesures	PAC air / eau	PAC sol / eau	Construction neuve	Assainissement	Régulation de la vitesse	Refroidissement actif	Remarques :
								<ul style="list-style-type: none"> • SCOP₅₅ = 2.95
6	01.08.2017		x		x	x		<ul style="list-style-type: none"> • Solaire thermique en soutien pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire • Le corps-de-chauffe électrique dans la PAC est à six niveaux 1-6 kW avec modulation. En raison de la sonde froide, enclenchement fréquent. • Corps-de-chauffe électrique : PAC et accumulateur ECS • SCOP₃₅ = 5.20 • SCOP₅₅ = 4.20
7	12.01.2017		x		x			<ul style="list-style-type: none"> • Chauffe tous les jours (même si la moyenne journalière de la température ambiante était supérieure à 28 °C) • L'élément chauffant du réservoir d'eau chaude sanitaire fonctionne chaque samedi pendant 30min à 1h (l'élément chauffant électrique est mis en marche par une horloge). Il est frappant de constater que le corps-de-chauffe électrique se met en marche deux fois de suite). • Corps-de-chauffe électrique : PAC et accumulateur ECS • SCOP₃₅ = 5.43 • SCOP₅₅ = 4.03

Numéro de l'objet	Début des mesures	PAC air / eau	PAC sol / eau	Construction neuve	Assainissement	Régulation de la vi- tesse	Refroidissement actif	Remarques :
8	12.01.2017	x			x			<ul style="list-style-type: none"> • Chauffe-eau pompe à chaleur avec air de la cave (Chauffe-eau PAC présent uniquement dans les objets 8, 14, 19 et 23) • En raison des deux pompes à chaleur, les valeurs caractéristiques communes COPA+, COP+ ne peuvent pas être déterminées. <p>=> Seules les valeurs caractéristiques des objectifs de fonctionnement COPA+_chauffage et COPA+_charge sont considérées !</p> <ul style="list-style-type: none"> • Beaucoup de démarrages de compresseurs en mode chauffage (20 à 42 démarrages par jour, non valable pour la recharge) • Corps-de-chauffe électrique : réservoir tampon et chauffe-eau pompe à chaleur • SCOP₃₅ = 4.20 • SCOP₅₅ = n.a.
9								<ul style="list-style-type: none"> • Installation tierce pour laquelle la base de données de mesure de cette campagne a été utilisée.
10	10.11.2018		x		x		x	<ul style="list-style-type: none"> • Le bâtiment n'était que partiellement habité jusqu'au 01.07.20 en raison de travaux de transformation. • Sonde géothermique de 280 m prévue initialement avec de l'eau, mais le fabricant de PAC prescrit un mélange de glycol. • SCOP₃₅ = 5.6
11	01.08.2017	x			x	x		<ul style="list-style-type: none"> • Chauffe-eau du réservoir d'eau chaude sanitaire en service tous les lundis à partir du 13.11.2017 pendant environ 1h (le chauffe-eau électrique est mis en marche par une horloge). Aucun cycle anti-légionellose n'a été mesuré avant le 13/11/2017). • Corps-de-chauffe électrique : PAC et accumulateur ECS

Numéro de l'objet	Début des mesures	PAC air / eau	PAC sol / eau	Construction neuve	Assainissement	Régulation de la vitesse	Refroidissement actif	Remarques :
								<ul style="list-style-type: none"> • SCOP₃₅ = 4.35 • SCOP₅₅ = 3.38
12	25.01.2019	x			x	x		<ul style="list-style-type: none"> • Jusqu'au 24 janvier 2019, il n'y avait pas de sonde de température dans le ballon d'eau chaude sanitaire, c'est pourquoi les recharges se faisaient jusqu'alors exclusivement avec la résistance électrique. • 1/3 de l'énergie de charge pour le contrôle de la légionellose se fait au moyen d'un corps-de-chauffe électrique. • SCOP₃₅ = 5.05 • SCOP₅₅ = 3.90
13	01.08.2017		x		x	x	x	<ul style="list-style-type: none"> • L'élément chauffant du réservoir d'eau chaude sanitaire fonctionne chaque vendredi pendant environ 0,5 h à 0,9 h (l'élément chauffant électrique est mis en marche par une horloge). • La PAC fonctionne souvent 24h/24 le week-end (en semaine, souvent 22h/9h en raison d'un délestage de 1h du fournisseur d'électricité). • Corps-de-chauffe électrique : PAC et accumulateur ECS • SCOP₃₅ = 5.20 • SCOP₅₅ = 3.95

Numéro de l'objet	Début des mesures	PAC air / eau	PAC sol / eau	Construction neuve	Assainissement	Régulation de la vitesse	Refroidissement actif	Remarques :
14	01.12.2017		x		x	x		<ul style="list-style-type: none"> • Chauffe-eau pompe à chaleur avec air extérieur (!) • (Chauffe-eau PAC présent uniquement dans les objets 8, 14, 19 et 23). Remplacement en 03.2019. Le nouveau modèle a un corps-de-chauffe électrique de 700 W. Il n'est donc plus possible de distinguer la consommation du mode électrique du mode PAC (compression). • En raison des deux pompes à chaleur, les valeurs caractéristiques communes COPA+, COP+ ne peuvent pas être déterminées. <p>=> Seules les valeurs caractéristiques des objectifs de fonctionnement COPA+_chauffage et COPA+_charge sont considérées !</p> <ul style="list-style-type: none"> • Corps-de-chauffe électrique : réservoir tampon et pompe à chaleur eau chaude sanitaire • SCOP₃₅ = 5.20 • SCOP₅₅ = 3.95 • Panne de transmission des données, donc seulement 293 jours de mesure en 2020/21
15	01.01.2018	x			x	x	x	<ul style="list-style-type: none"> • Maison jumelée au standard Minergie, année de construction 2005 • La pompe à chaleur se trouve dans un abri de jardin (climat extérieur) • ECS via production d'eau chaude instantanée • Le propriétaire est un ingénieur CVC et un optimisateur d'exploitation (optimisation de la consommation propre avec l'installation photovoltaïque, en particulier pour la fonction de refroidissement). • Corps-de-chauffe électrique : uniquement dans le réservoir d'eau chaude sanitaire • SCOP₃₅ = 4.83 • SCOP₅₅ = 3.98

Numéro de l'objet	Début des mesures	PAC air / eau	PAC sol / eau	Construction neuve	Assainissement	Régulation de la vi- tesse	Refroidissement actif	Remarques :
16	01.11.2017	x			x	x		<ul style="list-style-type: none"> • Corps-de-chauffe électrique : PAC, réservoir d'eau chaude sanitaire et accumulateur tampon. • Programme anti-légionellose : le corps-de-chauffe électrique du réservoir d'eau chaude se met en marche chaque semaine pendant environ 30min à 1,2 heure (nuit du samedi au dimanche). • Dysfonctionnement de la PAC le 4.2.18 - ensuite, l'élément chauffant était actif dans le réservoir tampon. Après avoir reçu les informations correspondantes, le corps-de-chauffe électrique a été désactivé. • SCOP₃₅ = n.a. – Label énergétique A++ • SCOP₅₅ = n.a. – Label énergétique A++
17	06.11.2018 (habité depuis 22.12.2018)	x			x	x		<ul style="list-style-type: none"> • Au début, activation quotidienne du programme anti-légionellose avec corps-de-chauffe électrique, première mise en service incomplète, deuxième effectuée le 21.01.2019 : maintenant activation hebdomadaire du programme anti-legionellose. • SCOP₃₅ = 4.41 • SCOP₅₅ = 3.37

Numéro de l'objet	Début des mesures	PAC air / eau	PAC sol / eau	Construction neuve	Assainissement	Régulation de la vi- tesse	Refroidissement actif	Remarques :
18	15.03.2019		x		x		x	<ul style="list-style-type: none"> • Immeuble de 3 appartements (EBF : 400 m2) • Station de production d'eau chaude sanitaire instantanée avec circulation • Hydraulique spéciale, collecteur pour radiateurs dans l'ancien bâtiment et chauffage par le sol, retour pour le préchauffage du ballon de production ECS instantanée • Il n'est donc pas possible de répartir les chiffres clés en fonction des objectifs de fonctionnement ("chauffage", "charge"). • Pompe à eau glycolée défectueuse, travaux de transformation, utilisation de corps-de-chauffe électrique et non-occupation 2020/21
19	09.05.2019		x		x			<ul style="list-style-type: none"> • Chauffe-eau pompe à chaleur dans la cave (buanderie) (chauffe-eau pompe à chaleur disponible uniquement pour les objets 8, 14, 19 et 23) • Sonde géothermique remplie avec de l'eau • Pompe à chaleur identique à l'installation 7, mais ECS au moyen d'un chauffe-eau pompe à chaleur • SCOP₃₅ = 5.43 • SCOP₅₅ = 4.03
20	10.05.2019	x			x			<ul style="list-style-type: none"> • Chauffage au sol • Remplacement d'une pompe à chaleur air/eau de 1994 en état de marche
21	09.02.2020		x		x	x		<ul style="list-style-type: none"> • Chauffage au sol • SCOP₃₅ = 5.2 • SCOP₅₅ = 4.0
22	13.07.2019		x		x	x		<ul style="list-style-type: none"> • Immeuble collectif • Réservoir tampon de 500l, réservoir d'eau chaude sanitaire de 1000l

Numéro de l'objet	Début des mesures	PAC air / eau	PAC sol / eau	Construction neuve	Assainissement	Régulation de la vi- tesse	Refroidissement actif	Remarques :
23	27.07.2019	x			x	x		<ul style="list-style-type: none"> • Chauffe-eau pompe à chaleur dans une petite chaufferie (chauffe-eau pompe à chaleur uniquement pour les objets 8, 14, 19 et 23) • Possibilité de refroidissement actif le 18.08.2020 • Construction en bois Minergie des années 1990
24	13.02.2020	x			x	x		<ul style="list-style-type: none"> • Pompe de circulation • Chauffage par radiateurs • SCOP₃₅ = 4.5 • SCOP₅₅ = 3.4

L'altitude du bâtiment, la surface de référence énergétique (SRE), le nombre de personnes déclarées ainsi que des informations sur le système de distribution de chaleur (radiateurs, chauffage au sol, etc.) sont énumérés dans le tableau 2.

Les besoins en chauffage (présentés au chapitre 2.4) dépendent essentiellement de l'emplacement, de la structure du bâtiment, de la taille de l'objet et du comportement des utilisateurs (température des pièces d'habitation, comportement d'aération). Le site le plus bas se trouve à 393 m d'altitude, le plus haut à 834 m. Les différences géographiques entraînent également des différences considérables au niveau des températures extérieures et des températures de la source (tant pour les pompes à chaleur air/eau que pour les pompes à chaleur sol/eau).

On constate également des différences considérables au niveau de la surface habitable chauffée (voir Surface de référence énergétique SRE) et de l'occupation des bâtiments (sur la base du nombre de personnes déclarées). Le nombre de personnes influence à son tour les besoins en eau chaude sanitaire. Pour des raisons de protection des données et de grande volatilité de l'occupation, aucune distinction supplémentaire n'a été faite ici (ex. âge de la personne, enfant, adulte, senior), activité professionnelle, fréquence des visites, etc.)

La plupart des objets utilisent un chauffage au sol comme système de distribution de chaleur, parfois combiné avec des radiateurs (système mixte). Il convient de noter la grande variabilité des températures de départ pour les systèmes de chauffage par le sol (voir chapitre 2.2), qui ne s'explique pas uniquement par la situation géographique.

Tableau 2 : Station de mesure Météo la plus proche, surfaces de référence énergétique (SRE), altitude du site du bâtiment, personnes annoncées et données sur le système de distribution de chaleur des différents objets

Objet	Station météo pour point d'exposition	SRE [m ²]	Hauteur du site	Personnes	Ch. Sol / Rad.
1	Vaduz	277	481	indéfini	Ch. Sol
2	Vaduz	418	452	indéfini	Ch. Sol
3	Vaduz	180	460	6	Ch. Sol
4	Zürich	230	473	indéfini	indéfini
5	Vaduz	252	468	4	Ch. Sol
6	St. Gallen	240	755	5	Rad. et Ch. Sol (peu)
7	Bern-Liebefeld	235	565	2.5	Rad.
8	Vaduz	228	451	indéfini	indéfini
10	St. Gallen	251	614	3	Ch. Sol
11	Buchs-Aarau	220	465	4	Ch. Sol
12	Glarus	120	427	indéfini	Ch. Sol et Rad.
13	Zürich	190	419	4	Ch. Sol
14	Zürich	163	393	5	Ch. Sol
15	Zürich	224	402	5	Ch. Sol
16	Zürich	225	541	5	Rad.
17	St. Gallen	187	737	2	Ch. Sol
18	Payerne	450	755	indéfini	Ch. Sol et Rad.
19	St. Gallen	195	600	indéfini	Rad.
20	Wynau	140	458	indéfini	Ch. Sol
21	St. Gallen	278	834	2	Ch. Sol
22	Schaffhausen	466	428	10	Ch. Sol
23	Güttingen	240	445	4	Ch. Sol
24	Schaffhausen	173	478	4	Rad.

La figure 1 présente la répartition géographique des installations de pompes à chaleur.

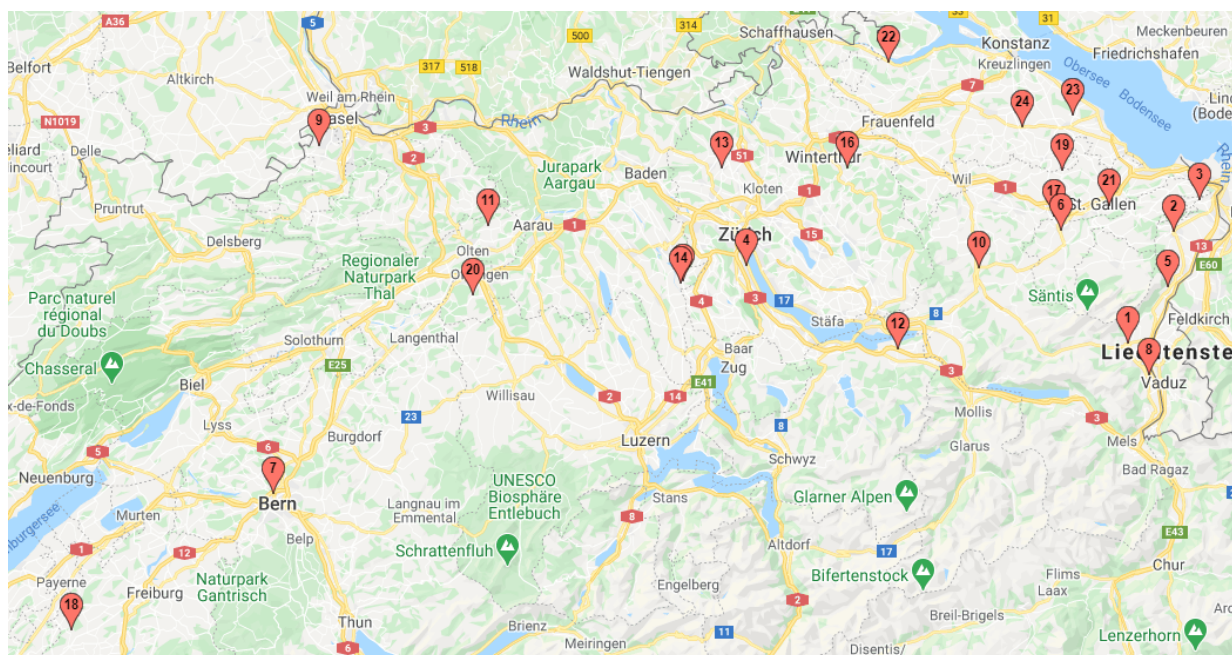


Figure 1 : Emplacements des installations de pompes à chaleur (créé avec <http://batchgeo.com>)

1.2 Limites du système et chiffres clés

Par analogie avec la description et les conseils d'utilisation des différents taux d'utilisation de l'OFEN, les chiffres clés suivants sont présentés par installation de pompe à chaleur. Seuls les chiffres clés utilisés dans les illustrations présentées ici sont répertoriés.

La notion générale d'efficacité de la pompe à chaleur est décrite par le coefficient de performance annuel (COPA), l'efficacité de l'installation de pompe à chaleur par le taux d'utilisation de la chaleur (TUC) et l'efficacité liée au comportement de l'utilisateur pour l'eau chaude sanitaire (TUS). Les formules et les grandeurs de mesure suivantes sont utilisées pour l'évaluation des données de mesure :

$$\begin{aligned} COPA+ &= (Q_{Chauffage} + Q_{Charge_ECS}) / (E_{Tot} - E_{Source} - E_{Elec_ext}) && \text{Coefficient de performance annuel [-]} \\ TUC &= (Q_{Chauffage} + Q_{Charge_ECS}) / E_{Tot} && \text{Taux d'utilisation de la chaleur [-]} \\ TUS &= Q_{ECS} / E_{Charge_ECS} && \text{Taux d'utilisation du système eau chaude sanitaire [-]} \end{aligned}$$

Le coefficient de performance annuel COPA+ est une valeur caractéristique de l'efficacité de la pompe à chaleur. Cet indice ne prend en compte que l'énergie électrique du compresseur, de l'électronique de commande, de la soufflerie (uniquement pompe à chaleur air/eau) ou de la pompe source (uniquement pompe à chaleur sol/eau).

Le taux d'utilisation de la chaleur (TUC) décrit l'efficacité du système de production et de distribution de chaleur. Les énergies électriques de la pompe de circulation des sondes géothermiques et de tous les corps-de-chauffe électriques sont également prises en compte ici.

Le taux d'utilisation du système pour l'utilisation de l'eau chaude sanitaire (TUS) décrit l'efficacité de l'ensemble de la production d'eau chaude, en partant de l'eau chaude effectivement utilisée à la sortie du ballon. Le TUS comprend les pertes de stockage du réservoir d'eau chaude sanitaire et, le cas échéant, les pertes de circulation. Une faible consommation d'eau chaude sanitaire entraîne généralement une faible consommation d'énergie, mais aussi un indice d'efficacité plus faible, car les pertes qui en résultent sont plus importantes. Le TUS peut également être déterminé pour les chauffe-eaux pompes à chaleur, ce qui permet une comparaison avec la charge d'ECS à l'aide des pompes à chaleur centralisées.

Le besoin total en énergie électrique pour l'ensemble de l'installation de pompe à chaleur, communément appelé achat d'électricité, est indiqué sous E_{Tot} .

Les données relatives aux besoins en chauffage et en chaleur totale rapportent l'énergie de chauffage ou l'énergie totale nécessaire à la surface de référence énergétique (SRE). Les différentes tailles de bâtiments sont ainsi prises en compte. Les degrés-jours de chauffage reflètent l'influence des conditions météorologiques d'une période (mois ou saison de chauffage) et/ou du site :

$$\begin{aligned} QS_{Chauffage} &= Q_{Chauffage} / SRE && \text{Besoin spécifique en chauffage [kWh/m}^2\text{]} \\ ES_{Chauffage} &= E_{Chauffage} / SRE && \text{Besoin spécifique en chauffage électrique [kWh}_{el}\text{/m}^2\text{]} \\ QS_{tot} &= (Q_{Chauffage} + Q_{charge_ECS}) / SRE && \text{Besoin total en chaleur [kWh/m}^2\text{]} \\ DJU_{20_12} \text{ ou } DJU_{20_16} &&& \text{Degrés-jours de chauffage [}^\circ\text{C]} \\ &&& \text{(20/12 pour les nouvelles constructions,} \\ &&& \text{20/16 pour les anciennes constructions)} \end{aligned}$$

Avec:

- $Q_{Chauffage}$ Énergie thermique utilisée pour le chauffage [kWh]
- Q_{Charge_ECS} Énergie thermique fournie lors de la charge de l'ECS [kWh]
- Q_{ECS} Énergie thermique de l'eau chaude sanitaire soutirée
- E_{Tot} Énergie électrique de l'ensemble du système de pompe à chaleur [kWh]
- $E_{Chauffage}$ Énergie électrique utilisée pour le chauffage [kWh]
- E_{Source} Énergie électrique de la pompe de circulation des SGV [kWh]
- E_{Elec_ext} Énergie électrique des corps-de-chauffe électriques [kWh]
- SRE Surface de référence énergétique [m²]

Lors de la détermination des degrés-jours de chauffage DJU_{20_12} pour les objets de construction neuve, on utilise une température limite de 12 °C et une température intérieure de référence de 20 °C. Les degrés-jours de chauffage ne sont comptés que si la moyenne journalière de la température ambiante est inférieure

à la limite de chauffage (ici 12 °C). Les DJU résultent alors de la différence entre la température moyenne journalière et 20 °C. Pour les bâtiments rénovés, la limite de chauffage est généralement fixée à 16 °C, ce qui explique l'utilisation de l'indicateur de degré de chauffage DJU_20_16.

Pour l'indice "Besoin en eau chaude sanitaire" (ECS), l'énergie de charge nécessaire est rapportée à la surface de référence énergétique (SRE) afin de faciliter la comparaison :

$$Q_{Charge_ECS} = Q_{Charge_ECS} / SRE \quad \text{Besoin thermique spécifique pour la charge ECS [kWh/m}^2\text{]}$$

$$E_{Charge_ECS} = E_{Charge_ECS} / SRE \quad \text{Besoin électrique spécifique pour la charge ECS [kWh}_{\text{élec}}\text{/m}^2\text{]}$$

Avec:

Q_{Charge_ECS}	Énergie thermique fournie pour la charge de l'ECS [kWh]
E_{Charge_ECS}	Énergie électrique de l'ensemble du système de pompe à chaleur pour la charge de l'ECS [kWh]
SRE	Surface de référence énergétique [m ²]

Les différentes limites du système et les désignations des valeurs caractéristiques sont représentées dans la figure 2 pour une pompe à chaleur sol/eau avec chauffage en circuit direct et réservoir d'eau chaude sanitaire.

La limite du système n'est pas seulement locale, spécifique aux composants de l'installation, mais aussi temporelle. On distingue ici les objectifs de fonctionnement "Chauffage", "Charge eau chaude sanitaire" et "Refroidissement". Les consommations électriques de veille (veille = arrêt des compresseurs et pas de refroidissement) sont attribuées au mode chauffage en fonction de la position de la vanne de commutation. Par conséquent, ces pertes en mode veille ne sont pas comprises dans les valeurs spécifiques pour la charge de l'eau chaude sanitaire (COPA+, TUC et TUS). La part des pertes électriques en mode veille représente en moyenne énergétique environ 3 % de la consommation annuelle totale d'énergie électrique.

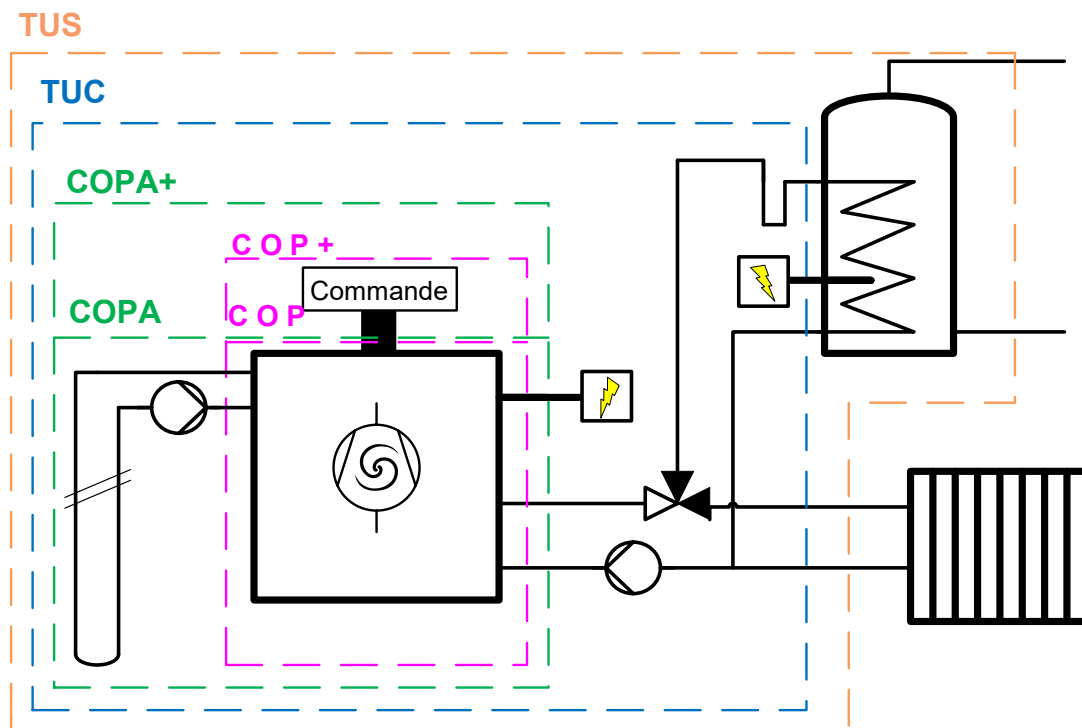


Figure 2 : Limites simplifiées du système d'une pompe à chaleur sol/eau avec circuit de chauffage direct et production d'eau chaude sanitaire au moyen d'un réservoir.

Les limites détaillées du système selon les prescriptions de l'OFEN figurent dans la figure 3.

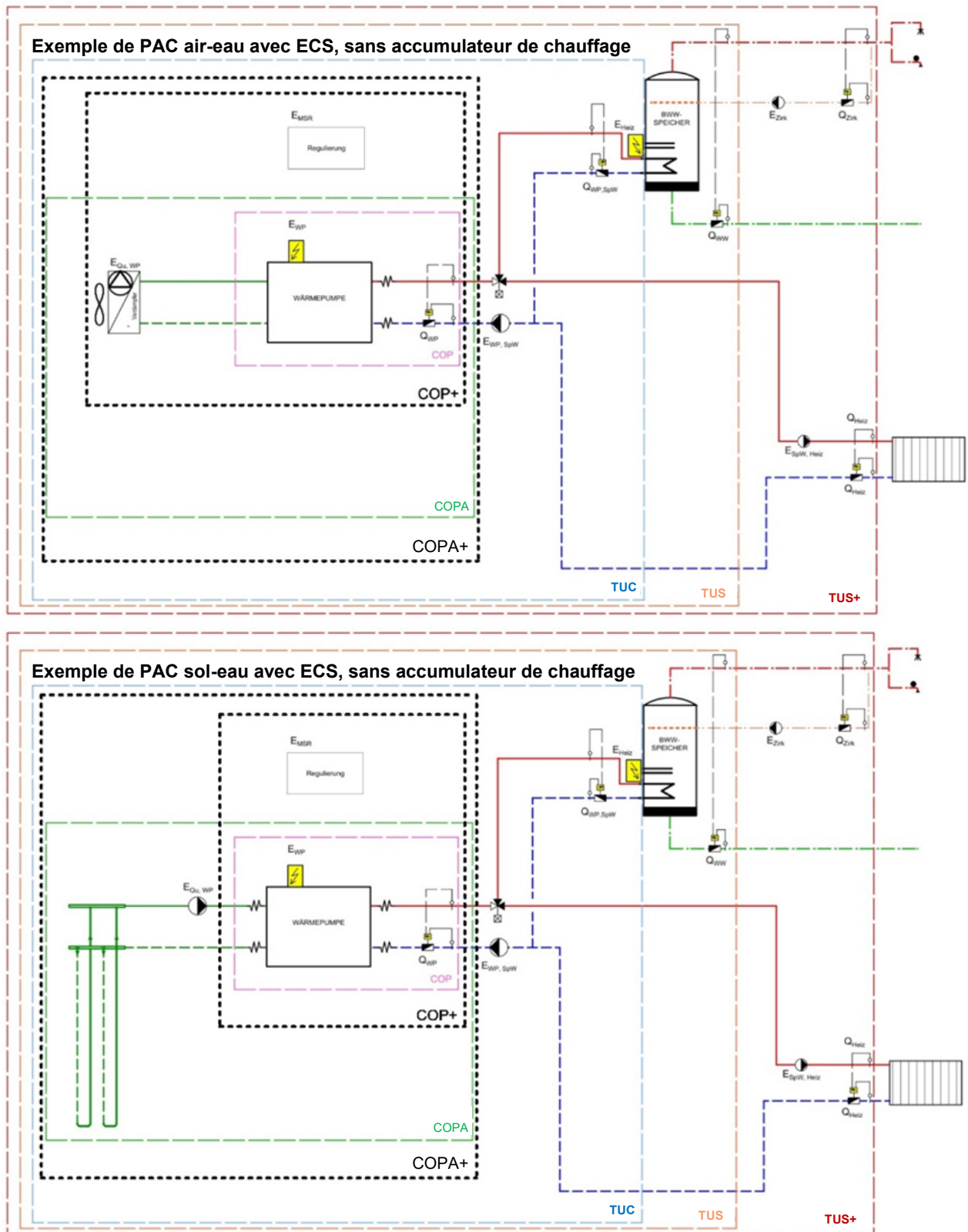


Figure 3 : Limites du système selon l'OFEN pour les PAC air-eau et géothermiques avec ballon d'eau chaude sanitaire, mais sans ballon de chauffage. Contrairement au COP+, la valeur caractéristique COPA+ comprend le besoin en énergie de la pompe de circulation de la source pour les pompes à chaleur sol/eau.

2. Résultats et évaluations des installations de pompes à chaleur

Dans ce chapitre, les installations de pompes à chaleur sont comparées entre elles au cours de cinq périodes de chauffage enregistrées au maximum. Outre l'efficacité énergétique générale, l'influence de la température de la source et du puits est également prise en compte. Les données évaluées se rapportent à la période de chauffage correspondante, du 1er septembre au 31 août. Si l'on ne dispose que de 300 à 350 jours sur 365 possibles pour un objet (par exemple en raison d'une mise en service tardive), cette période de chauffage est marquée d'une étoile dans les graphiques. Ces valeurs n'ont cependant qu'une pertinence limitée et ne peuvent pas être simplement comparées avec les périodes suivantes.

2.1 Comparaison des indices d'efficacité (COPA+ et TUC)

La figure 4 et la figure 5 présentent les coefficients de performance annuels COPA+ et les taux d'utilisation de la chaleur TUC. Contrairement au coefficient de performance annuel COPA+, le taux d'utilisation de la chaleur (TUC) prend en compte les besoins en énergie électrique de la pompe de circulation des sondes géothermiques ainsi que des corps-de-chauffe électriques externes. Par conséquent, cet indice reflète l'efficacité de la production de chaleur du point de vue de l'utilisateur. Le coefficient COPA+, quant à lui, illustre l'efficacité de la pompe à chaleur en tant que composant individuel.

Des différences apparaissent en raison de l'utilisation d'un corps-de-chauffe électrique dans le chauffe-eau (par exemple en raison du programme "anti-légionellose") et de la pompe de circulation, lesquels sont pris en compte dans le taux d'utilisation de la chaleur. L'influence des différentes températures de source et des sondes géothermiques pendant les différentes périodes de chauffage est examinée dans le chapitre suivant. Pour les objets 8, 14, 19 et 23, l'eau chaude sanitaire est produite par un chauffe-eau pompe à chaleur. De ce fait, il n'est pas possible de calculer tous les indices pour ces quatre systèmes, le COPA+ pour ces objets se réfère donc uniquement au mode chauffage.

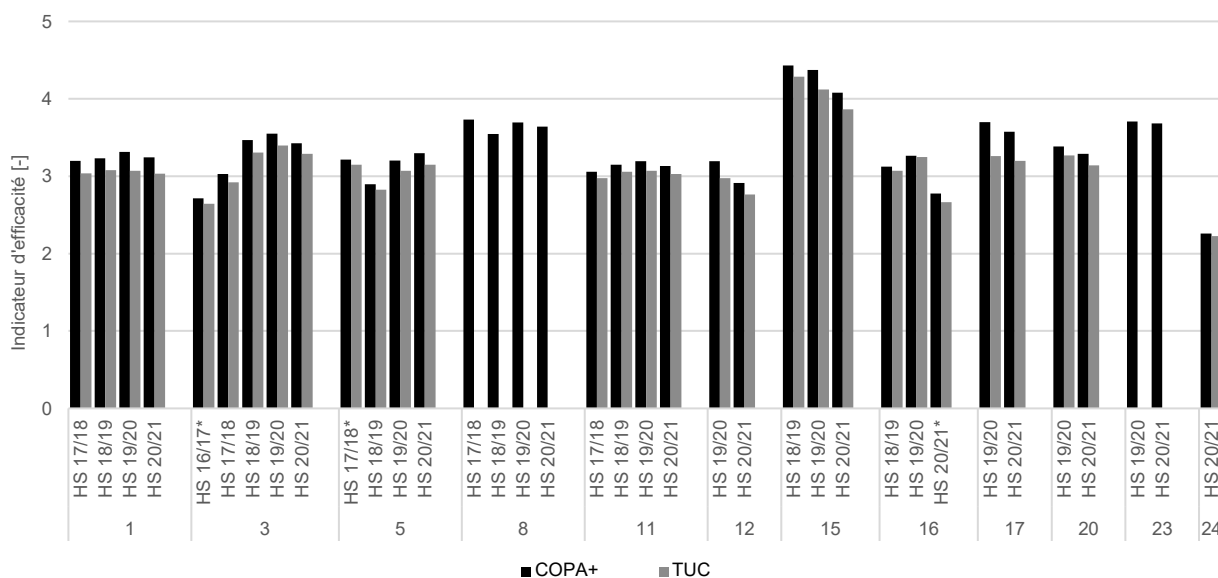


Figure 4 : Coefficient de performance annuel (COPA+) et taux d'utilisation de la chaleur (TUC) des systèmes de pompes à chaleur air/eau

L'installation 24 présente le taux d'utilisation de la chaleur (TUC) le plus bas sur l'ensemble de la période de mesure avec une valeur de 2,23 (2020/21). Avec cette nouvelle installation, c'est la première fois que l'on mesure un taux d'utilisation de la chaleur nettement inférieur à 3 pour une pompe à chaleur air/eau. L'installation 15 atteint la valeur caractéristique la plus élevée avec 4.29 (2018/19) grâce à une température de départ très basse et à une demande de chauffage ciblée plus élevée pendant les heures plus chaudes de l'après-midi (température de source plus élevée pour la PAC air/eau, détails dans le rapport "Mesures de terrain PAC - Rapport annuel 2018", chapitre 4.3).

Avec un historique allant jusqu'à cinq périodes de mesure, il est désormais possible de constater des changements dans certaines installations. Les raisons ne sont pas toujours clairement identifiables. Les causes peuvent être des effets climatiques dus à des périodes de chauffage plus ou moins froides ou à un rayonnement solaire plus ou moins important, une modification de l'occupation ou encore des réglages différents de l'installation de chauffage.

En principe, l'hiver dernier a été nettement plus froid que la période de chauffage 2019/20, avec un hiver exceptionnellement doux. Les valeurs d'efficacité se sont donc légèrement détériorées, à l'exception de l'installation 5, pour laquelle des modifications de la courbe de chauffage ont été effectuées. L'installation 17 présente la plus grande différence entre TUC et COPA+, soit 11 %. Cela s'explique par l'utilisation notable du corps-de-chauffe électrique pour la désinfection thermique de l'eau chaude sanitaire contre la légionellose. L'augmentation de l'efficacité de l'objet 3 entre la période de chauffage 17/18 et 19/20 s'explique par l'adaptation significative de la courbe de chauffage dans le cadre des optimisations réalisées. Celle-ci était inutilement trop élevée d'environ 10 K en raison d'une surélévation de l'accumulateur (rapport " Mesures de terrain des installations de pompes à chaleur - rapport annuel 2018 ", chapitre 4.1).

La figure 5 présente les mêmes indicateurs d'efficacité pour les installations de pompes à chaleur sol/eau. Il est intéressant de constater les nettes différences entre le COPA+ et le TUC, comme le montre la comparaison des deux dernières périodes d'observation pour l'installation 22. Alors que le TUC était encore réduit de 25 % par rapport au COPA+ lors de la première période de mesure, il n'est plus que de 3 %. Ce changement s'explique par une adaptation du programme anti-légionellose (voir rapport de l'année précédente). Si les valeurs d'efficacité des pompes à chaleur air/eau baissent en raison des températures extérieures très froides, les pompes à chaleur sol/eau atteignent un TUC plus élevé (pour le chauffage et la charge de l'ECS), car le rapport thermique se déplace en faveur du mode chauffage. Le TUC reste presque inchangé pour la plupart des installations selon la figure 9.

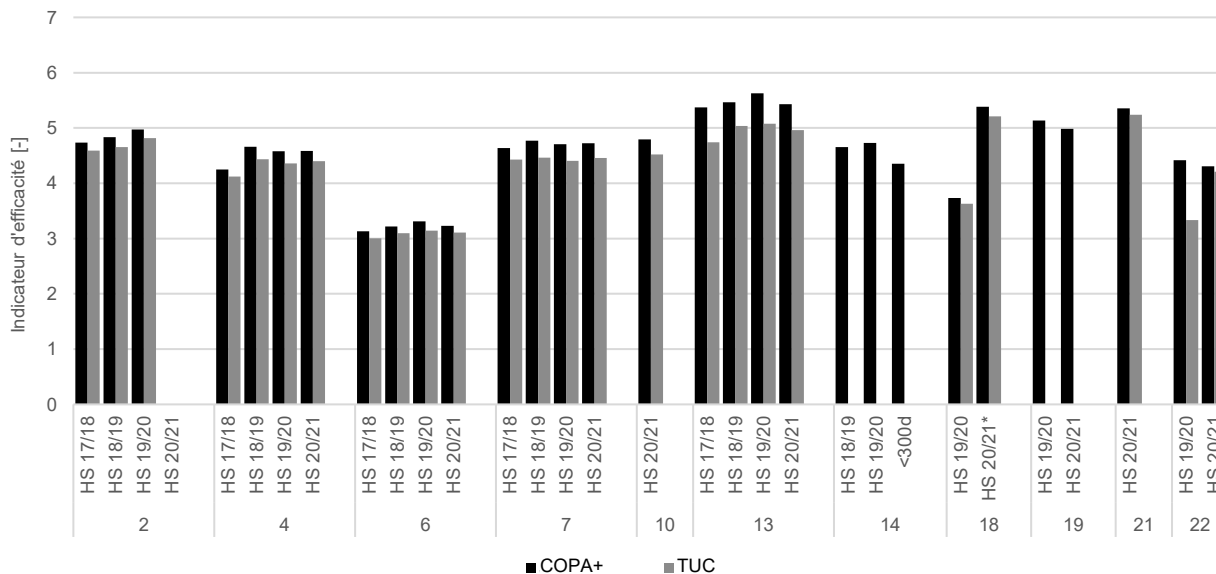


Figure 5 : Coefficient de performance annuel (COPA+) et taux d'utilisation de la chaleur (TUC) des systèmes de pompes à chaleur eau glycolée/eau

L'évaluation des pompes à chaleur sol/eau met en évidence la grande variabilité du COP (pour le chauffage et la charge de l'ECS), de 3,13 (installation 6, période de chauffage 2017/18) à 5,63 (installation 13, période 2019/20), selon la technologie de la pompe à chaleur, la température de la source et le niveau de température requis pour l'objet. Il est intéressant de noter que les installations 10, 13, 18, 19 et 21 ont un COPA+ supérieur à cinq, ce qui s'explique par le niveau de température de la source de chaleur, dont les détails sont présentés dans la figure 9. L'installation 6 (sonde géothermique existante, chauffage solaire d'appoint) présente le TUC le plus bas sur toutes les périodes de chauffage, soit 3,0, tandis que l'installation 21 atteint le TUC le plus élevé, soit 5,24.

2.2 Influence des niveaux de température

Dans ce chapitre, les différents niveaux de température des pompes à chaleur sont comparés. Seules les périodes pendant lesquelles les pompes à chaleur étaient en service sont prises en compte. Le mode de fonctionnement de la pompe à chaleur ("mode chauffage" ou "mode ECS") est pris en compte.

Les abréviations suivantes sont utilisées dans les illustrations :

- $T_{Qein_Chauffage}$: Valeur moyenne de la température d'entrée d'air aspiré, pendant le "mode chauffage" de la pompe à chaleur.
- T_{Qein_ECS} : Valeur moyenne de la température d'entrée d'air aspiré, pendant le "mode ECS" de la pompe à chaleur.
- $T_{VL_Chauffage}$: Valeur moyenne de la température de départ, pendant le "mode chauffage" de la pompe à chaleur.
- T_{VL_ECS} : Valeur moyenne de la température de départ, pendant le " mode ECS " de la pompe à chaleur.

La figure 6 présente les niveaux de température des pompes à chaleur air/eau et la figure 7 ceux des pompes à chaleur sol/eau, en distinguant les modes de fonctionnement chauffage et recharge.

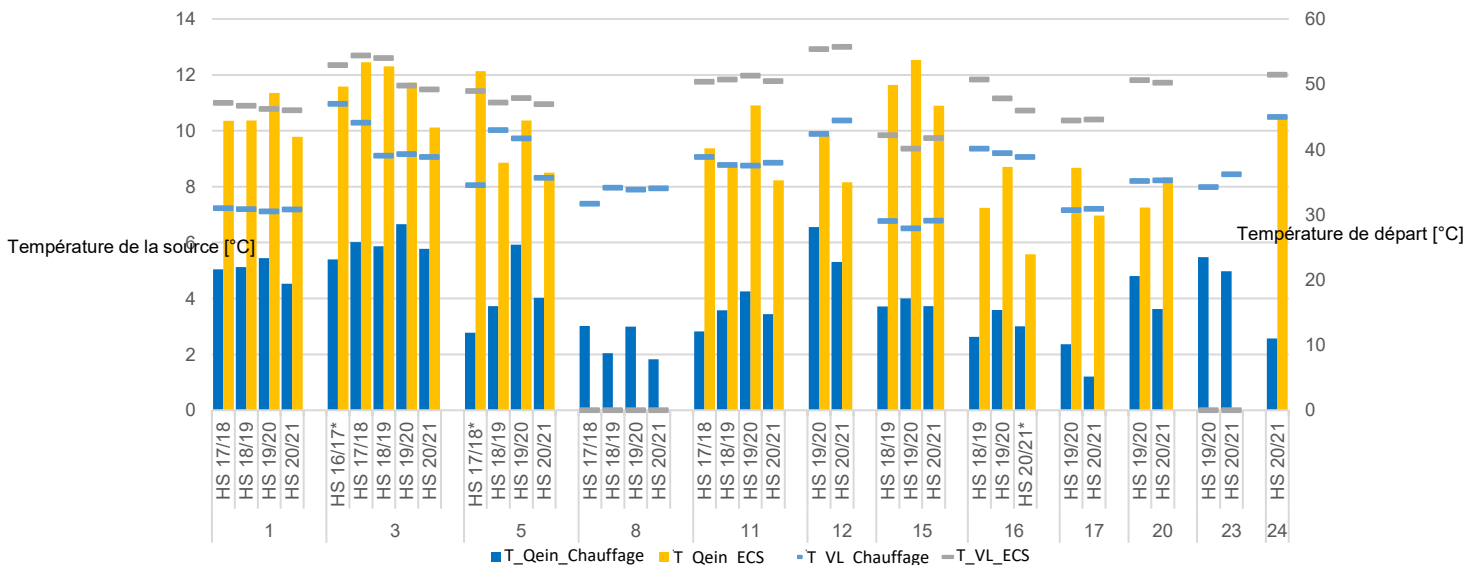


Figure 6 : Représentation des différents niveaux de température de l'entrée de la source (aspiration d'air) et du départ chauffage pendant les différents modes de fonctionnement "Chauffage" et "ECS" pour les pompes à chaleur air/eau. Les objets 8 et 23 disposent d'un chauffe-eau pompe à chaleur séparé, ce qui explique l'absence des valeurs caractéristiques "ECS".

Le retour d'un hiver un peu plus froid au cours de la dernière période de chauffage est bien visible dans toutes les installations. Selon la logique des températures de départ commandées par la température extérieure, les températures de chauffage mesurées sont donc à nouveau un peu plus élevées, à l'exception des installations 3, 16 et surtout 5, pour lesquelles des adaptations importantes de la courbe de chauffage ont été effectuées par des essais d'optimisation et ensuite par les habitants eux-mêmes. En raison d'un été plus froid, les températures de l'air pendant la recharge (T_{Qein_ECS}) sont également nettement plus basses. Dans l'installation 20, le réglage d'un programme horaire pour la charge de l'ECS en début de soirée a permis d'augmenter les températures de la source.

L'objet 15 présente les températures de départ les plus basses en mode chauffage et en mode ECS. Il en résulte les meilleurs chiffres d'efficacité. Pour cet objet, l'eau chaude sanitaire est chauffée au moyen d'une station de production d'eau chaude instantanée.

La figure 7 montre les évaluations pour les pompes à chaleur sol/eau. Pour l'objet 6, celle-ci doit surmonter la plus grande variation de température. Ici, la sonde géothermique existante présente des températures de source basses avec des températures de départ très élevées pour les radiateurs. Pour l'objet 6, une installation solaire thermique est également intégrée. Cet apport de chaleur n'est pas mesuré, c'est pourquoi les valeurs énergétiques et caractéristiques ne reflètent pas l'ensemble des besoins et que la pompe à chaleur doit assurer le réchauffement à un niveau de température plus élevé. Les objets 6 et 14 présentent les températures de source les plus basses. Il s'agit de sondes géothermiques déjà existantes. Celles-ci étaient déjà limitées avec la première pompe à chaleur, et l'efficacité accrue des nouvelles pompes à chaleur sollicite encore plus la sonde avec un prélèvement de chaleur plus important. Plus une nouvelle pompe à chaleur est efficace, moins elle consomme d'énergie électrique provenant du réseau électrique. Pour fournir la même quantité de chaleur de chauffage, il faut cependant prélever davantage de chaleur dans le sol.

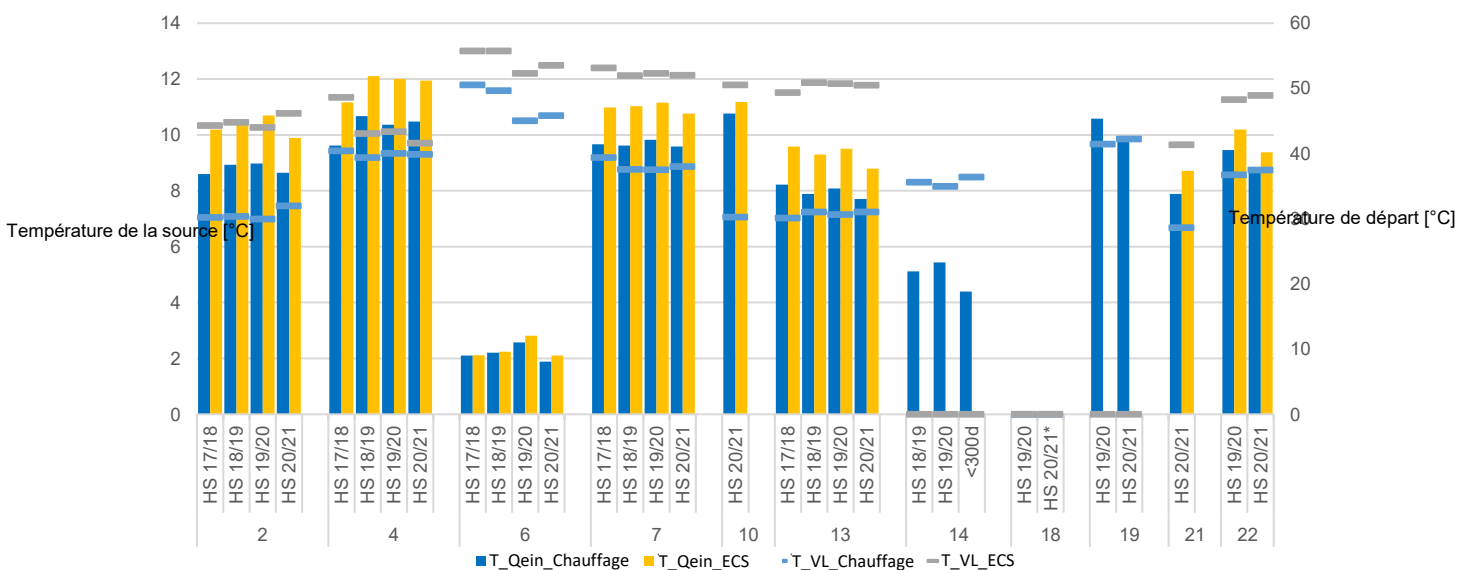


Figure 7 : Représentation des différents niveaux de température de l'entrée de la source (départ de la sonde géothermique) et du départ chauffage pendant les différents modes de fonctionnement "Chauffage" et "ECS" pour les pompes à chaleur sol/eau. Les objets 14 et 19 disposent d'un chauffe-eau pompe à chaleur séparé.

Même si la baisse des températures de source des sondes géothermiques en mode chauffage (T_{Qein_Chauffage}) au cours de la dernière période d'observation pourrait suggérer un possible refroidissement du sol, il faut tenir compte du prélèvement de chaleur nettement plus élevé dû à la période de chauffage plus froide. Une analyse détaillée des différentes températures de source entre les pompes à chaleur air/eau et sol/eau est décrite au chapitre 2.5.

La figure 8 (pompes à chaleur air/eau) et la figure 9 (pompes à chaleur sol/eau) montrent l'influence des niveaux de température de la source et du départ chauffage sur le taux d'utilisation de la chaleur.

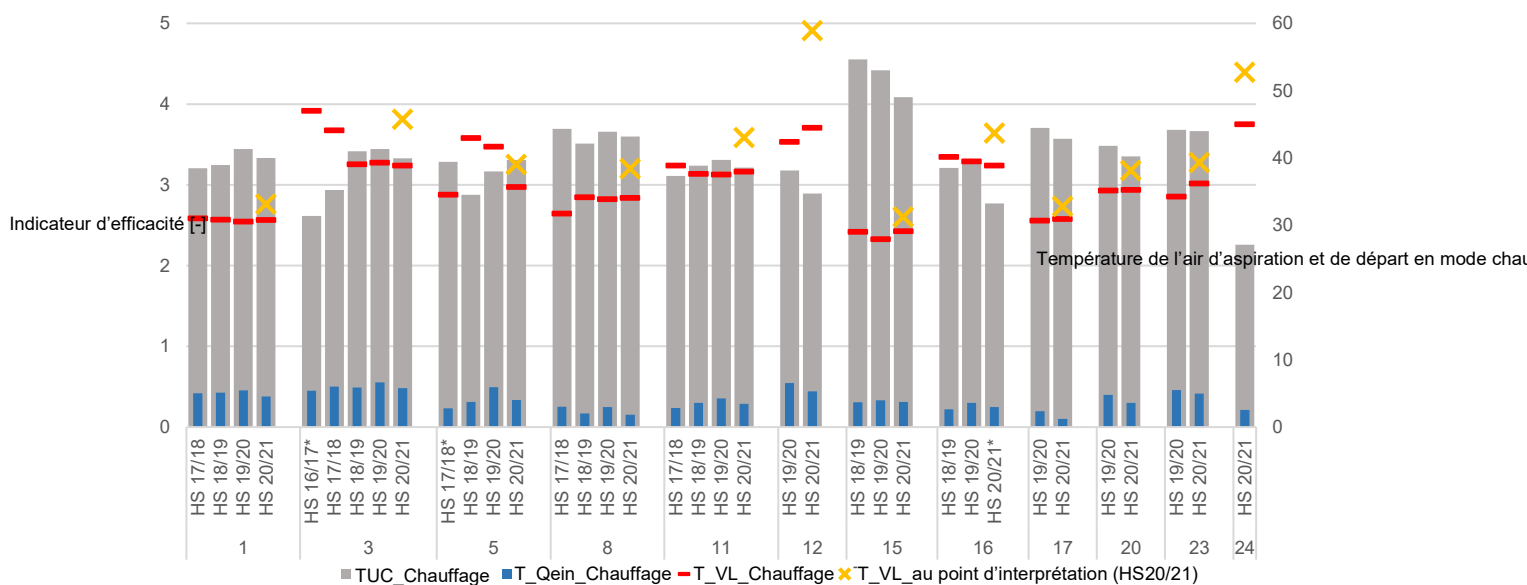


Figure 8 : Taux d'utilisation de la chaleur des pompes à chaleur air/eau et températures de l'air d'aspiration (bleu) et du départ chauffage moyen (rouge) pendant le chauffage. La température de départ au point d'utilisation (croix jaune) est également représentée.

Les valeurs de température moyennes annuelles (pondérées dans le temps) sont représentées uniquement en mode chauffage. Une grande distance entre la colonne bleue (température d'entrée de la source) et la barre rouge pour la température moyenne de départ mesurée en mode chauffage illustre une grande amplitude de température que la pompe à chaleur doit réaliser. En principe, plus la course de température est faible, plus la pompe à chaleur est efficace (TUC élevé). De plus, les températures de départ au point d'utilisation de l'installation sont indiquées par une croix jaune dans les illustrations. Pour les installations avec un chauffage par le sol, le point d'utilisation est proche de la température de départ moyenne en raison de la courbe de chauffage plus plate.

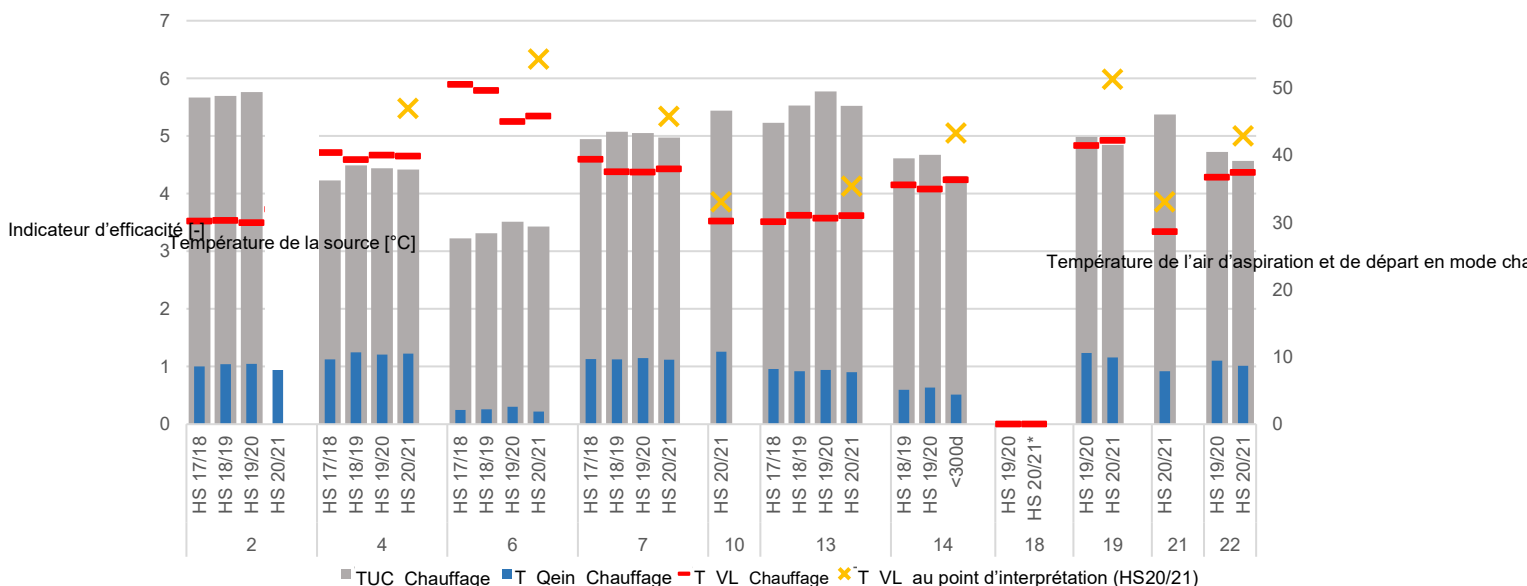


Figure 9 : Taux d'utilisation de la chaleur des pompes à chaleur sol/eau et températures de la sonde géothermique (en bleu) et du départ chauffage (en rouge) pendant le mode chauffage. De plus, la température de départ au point d'utilisation (croix jaune) est aussi représentée.

Sur l'ensemble des périodes de chauffage, les sondes géothermiques nouvellement installées atteignent un niveau de température moyen généralement supérieur à 8 °C en mode chauffage. La température moyenne de toutes les nouvelles installations sur l'ensemble des périodes de chauffage est de 9,4 °C. Pour les pompes à chaleur air/eau, la température de l'air extérieur est en moyenne de 4,3 °C en mode chauffage, ce qui est nettement plus froid.

Les variations visibles de la courbe de chauffage se traduisent par les différences significatives des températures de départ entre les différentes périodes d'observation, indépendamment de l'influence de la température extérieure. C'est notamment le cas pour les installations 3, 5, 6 et 12. Dans les installations 6 et 12, les modifications ont été effectuées par les habitants.

2.3 Comparaison des indices d'efficacité pour la production d'eau chaude sanitaire

La figure 10 présente les trois valeurs caractéristiques d'efficacité (COPA+, TUC et TUS) des installations de pompes à chaleur air/eau mesurées.

Le coefficient de performance annuel COPA+ et le taux d'utilisation de la chaleur TUC se rapportent à l'efficacité du système de chauffage. En revanche, le taux d'utilisation du système TUS tient compte de l'utilisation de l'eau chaude sanitaire dans l'indice d'efficacité. Dans le TUS, les pertes de chaleur du réservoir d'eau chaude sanitaire, du conduit de circulation et du système hydraulique côté chauffage (voir chapitre 2.7) sont donc visibles.

Les coefficients de performance annuels pour la production d'eau chaude sanitaire avec des installations de pompes à chaleur air/eau se situent entre 2,2 et 3,6 en moyenne sur une période de chauffage entièrement mesurée. Si l'on considère les différentes limites du système, on constate que les coefficients d'utilisation de la chaleur TUC (valeur moyenne de toutes les installations et périodes de 2.58) sont en moyenne 10 % plus bas que les coefficients de performance annuels COPA+ (2.88). L'écart maximal de près de 40 % se produit pour l'objet 12. Cette différence est due au fait que le COPA+ ne tient pas compte de la part énergétique de la résistance externe et de la pompe de circulation du chauffage. Dans le cas de l'objet 12, une désinfection thermique (anti-légionellose) quotidienne est effectuée par le biais d'un corps-de-chauffage électrique. L'efficacité du comportement des utilisateurs TUS varie entre 0,6 et 2,7 pour les installations de pompes à chaleur air/eau. Les objets 1, 3, 5, 8, 15 et 23 présentent des taux d'utilisation du système TUS élevés, supérieurs à 2. Le TUS le plus bas est mesuré dans l'objet 12 en raison de la part élevée d'éléments chauffants mentionnée ci-dessus, associée à un faible prélèvement d'eau chaude sanitaire. Pour les chauffe-eaux pompes à chaleur 8, 14, 19 et 23, l'énergie de charge thermique ne peut pas être déterminée sans transformation importante et sans intervention dans le circuit frigorifique de l'objet de mesure. C'est pourquoi elle n'est pas mesurée et le taux d'utilisation de la chaleur ainsi que les besoins en eau chaude sanitaire ne peuvent pas être déterminés et représentés.

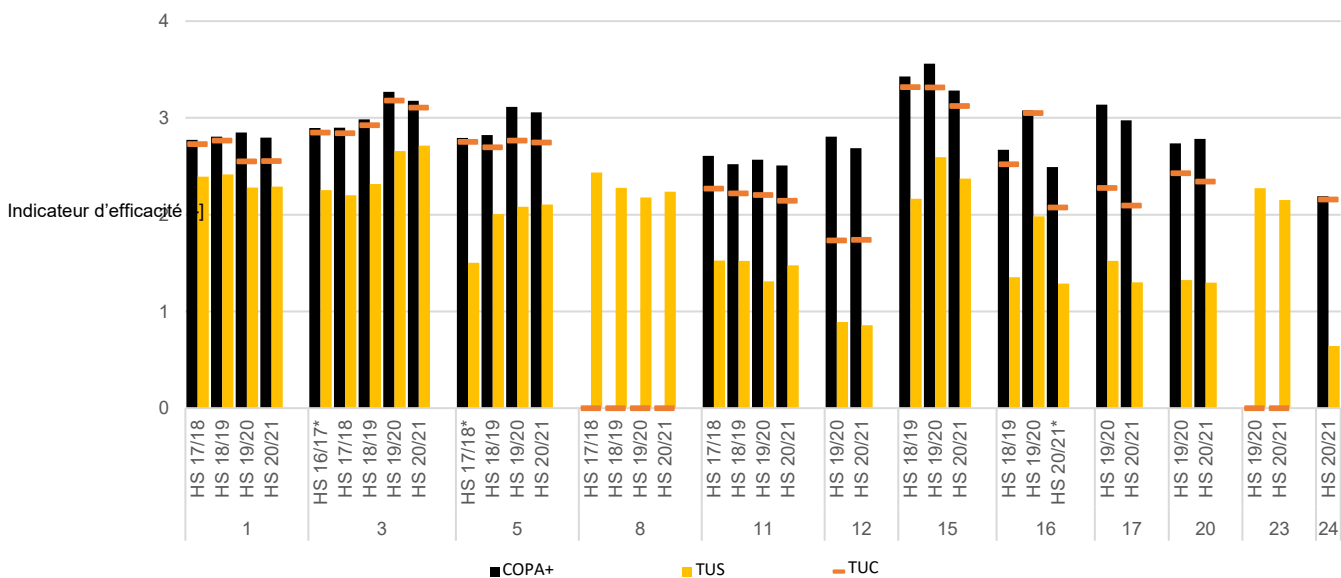


Figure 10 : Coefficient de performance annuel COPA+ lors de la production ECS, taux d'utilisation de la chaleur TUC lors de la charge ECS et taux d'utilisation du système global TUS de la production d'ECS des installations de pompes à chaleur air/eau.

L'efficacité de la production d'eau chaude sanitaire pour les installations de pompes à chaleur sol/eau est illustrée à la figure 11. Dans ce cas, le coefficient de performance annuel COPA+ se situe entre 1,6 et 4,8. Les coefficients d'utilisation de la chaleur TUC sont en moyenne 13 % plus bas que le COPA+ et varient entre 1,4 et 4,7. Il est frappant de constater que la différence entre ces deux paramètres est nettement plus importante pour les pompes à chaleur sol/eau que pour les pompes à chaleur air/eau. Les indices d'efficacité de l'installation 6 avec une installation solaire supplémentaire ne sont que partiellement significatifs, car l'apport de chaleur n'est pas mesuré et les niveaux de température nécessaires sont augmentés par l'installation solaire thermique pour la pompe à chaleur.

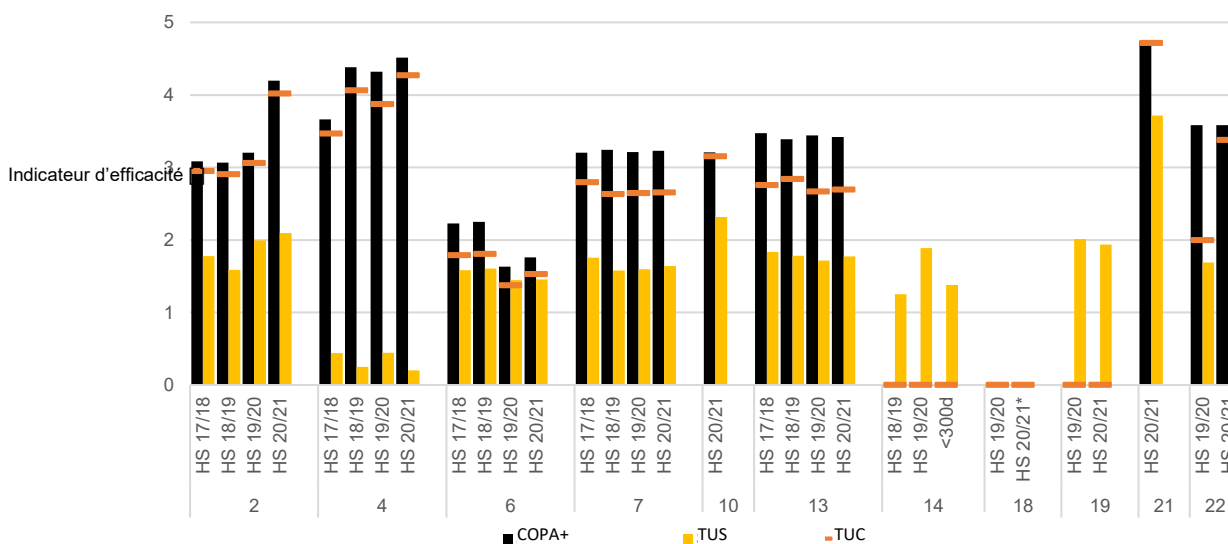


Illustration 11 : Coefficient de performance annuel COPA+, taux d'utilisation de la chaleur TUC et taux d'utilisation du système TUS de la production d'eau chaude sanitaire des installations de pompes à chaleur sol/eau. Les grandes différences entre le COPA+ et le TUC lors de la charge ECS indiquent un programme anti-légionellose à forte consommation d'énergie.

La différence entre les objets 4 et 21 est remarquable. Les deux installations de pompes à chaleur avec sondes géothermiques effectuent la recharge de manière très efficace avec un taux d'utilisation de la chaleur supérieur à quatre, mais le taux d'utilisation du système incluant la production d'eau chaude sanitaire, y compris les pertes de chaleur, est le plus inefficace pour l'objet 4 (TUS de 0,2). Ce faible valeur repose sur un besoin en eau chaude très faible de 28 l/j en 2018, 13 l/j en 2019 et moins de 10 l/j en 2020 et 2021. De plus, cet objet présente encore une circulation gravitaire existante du réseau d'eau chaude sanitaire, ce qui doit être remis en question en termes d'hygiène (et d'efficacité énergétique).

Dans le cas de l'objet 22, la nette économie d'énergie électrique est due à une adaptation du programme anti-légionellose. Au cours de la période 2019/20, un chauffage programmé a été effectué quotidiennement à l'aide d'un corps-de-chauffe électrique, ce qui a porté la totalité du contenu du réservoir à plus de 55 °C.

Nous tenons toutefois à souligner qu'une consommation d'eau chaude économique, malgré une efficacité moindre, permet de réaliser les plus grandes économies d'énergie. Ceci est également visible dans la figure 12 avec la représentation de l'énergie de charge par rapport à la quantité de chaleur effectivement prélevée.

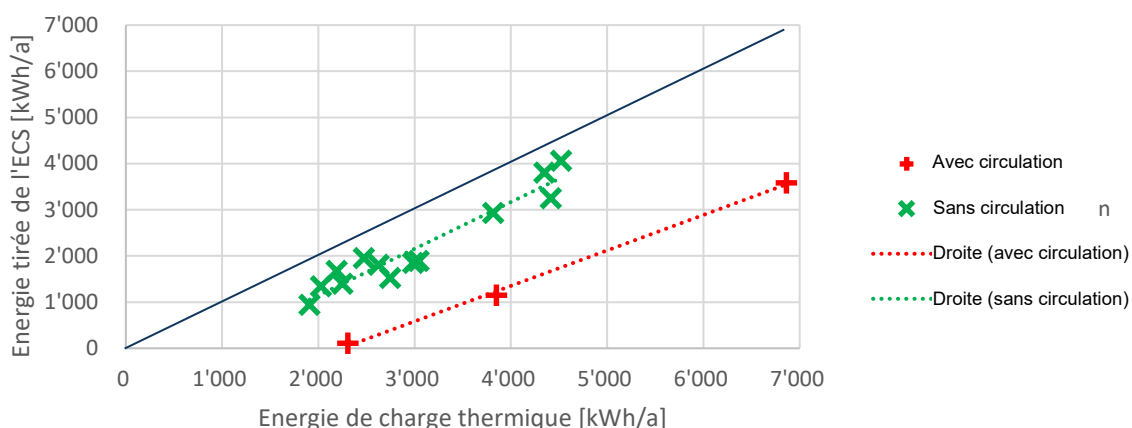


Figure 12 : Comparaison entre l'énergie de charge thermique et la quantité de chaleur effectivement prélevée dans l'eau chaude sanitaire. Les installations sans circulation sont représentées en vert et les trois installations avec circulation en rouge. Il s'agit ici de données de mesure qui ne constituent pas une base de planification.

La représentation de la quantité de chaleur mise à disposition par la pompe à chaleur et, le cas échéant, par le corps-de-chauffe électrique pour chauffer l'eau chaude sanitaire par rapport à la quantité de chaleur effectivement utilisée ou prélevée dans l'eau chaude sanitaire montre clairement les pertes de chaleur. Celles-ci se produisent d'une part pendant la charge dans le système hydraulique des tuyaux entre la pompe à chaleur et le réservoir et d'autre part par le réservoir lui-même avec sa surface. Une circulation supplémentaire augmente considérablement les pertes de chaleur. La ligne noire montre le cas idéal sans aucune perte de chaleur.

Conformément à l'analyse effectuée jusqu'à présent, les facteurs suivants ont une grande influence sur le niveau du taux d'utilisation du système TUS :

- Conduite de circulation existante
- Utilisation de l'eau chaude sanitaire : la quantité utilisée a une grande influence sur le TUS.
- L'isolation thermique du réservoir ainsi qu'une circulation supplémentaire ont une influence déterminante sur la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer l'eau potable. En revanche, l'efficacité de la production d'eau chaude sanitaire pure n'a qu'une influence secondaire sur le rendement du système.
- Thématique de la légionellose : ici, cela dépend surtout de la manière dont la température élevée de l'eau chaude sanitaire est atteinte. Dans de nombreuses installations, le corps-de-chauffe électrique n'est actuellement activé que par une minuterie, sans préchauffage possible à l'aide d'une pompe à chaleur beaucoup plus efficace. La version révisée de la norme SIA 385/1 exige toutefois un préchauffage maximal au moyen du compresseur de la pompe à chaleur. Cela devrait être pris en compte lors de la construction de nouvelles installations. Cela nécessite une coordination entre l'installation, la mise en service et le service. Elle est toutefois facile à mettre en œuvre, augmente le rendement du système et réduit les besoins énergétiques absolus.

2.4 Chaleur de chauffage, besoins totaux en chaleur et degrés-jours de chauffage

Les conditions d'utilisation des systèmes de pompes à chaleur peuvent être mieux décrites à l'aide d'un paramètre de bâtiment, d'un paramètre de consommation et d'un paramètre de site :

$$Q_{Schauffage} = Q_{Chauffage} / SRE$$

$$Q_{Stot} = (Q_{Chauffage} + Q_{Charge_ECS}) / SRE$$

$$DJU_{20_16}$$

$$DJU_{20_12}$$

Besoin spécifique de chaleur de chauffage [kWh/m²]

Besoins totaux en chaleur [kWh/m²]

Degrés-jours de chauffage [°C] avec limite de chauffage à 16°C et une température ambiante de 20°C (assainissement)

Degrés-jours de chauffage [°C] avec limite de chauffage à 12°C et une température ambiante de 20°C (Nouvelle construction)

La valeur limite du besoin en chaleur total pour Minergie est de 55 kWh/m²a et pour Minergie A de 35 kWh/m²a. Le besoin total en chaleur (Q_{Stot}) correspond à la somme du besoin en chauffage et du besoin en chaleur pour la charge de l'eau potable. Pour les rénovations, les degrés-jours de chauffage sont rapportés à 20/16 et pour les nouvelles constructions à 20/12. L'utilisation des degrés-jours de chauffage comme indicateur est décrite plus en détail au chapitre 1.2.

Les besoins en chaleur de chauffage des différentes installations de pompes à chaleur air/eau varient entre 34 et 213 kWh/m² pendant la dernière période de chauffage, en considérant uniquement des périodes annuelles entièrement mesurées. Cette valeur dépend bien entendu fortement de la structure du bâtiment. Les besoins en eau chaude sanitaire, qui dépendent du comportement des utilisateurs, de l'occupation et des pertes de chaleur du système hydraulique, varient de 3 à 10 kWh/m².

La figure 13 ne dit rien sur l'efficacité de l'installation de chauffage, mais décrit les besoins énergétiques du bâtiment. En général, la différence entre les nouvelles et les anciennes constructions est significative. Dans les bâtiments neufs (ne concerne que ce programme de mesure sur le terrain) équipés de pompes à chaleur air/eau, la consommation d'énergie est environ 3 fois plus faible que dans les bâtiments rénovés. On peut en tout cas en déduire que les installations de pompes à chaleur dans les bâtiments à rénover devraient être mises en œuvre de la manière la plus efficace possible afin d'économiser beaucoup d'électricité. En raison des besoins de chauffage plus importants dans les bâtiments anciens, les pompes à chaleur présentent également un potentiel de réduction des émissions de CO₂ plus élevé que les chauffages fossiles.

L'objet 12 est le bâtiment présentant le besoin de chaleur spécifique total le plus élevé d'environ 213 kWh/m² qui a été intégré dans la campagne de mesure sur le terrain au cours de l'avant-dernière période de chauffage. En combinaison avec un système de chauffage au sol et de radiateurs, cette chaleur de chauffage élevée ne peut être fournie que par des températures de départ élevées (valeur moyenne mesurée au cours de l'année : 42,4 °C en 2019/20 et 44,5 °C en 2020/21 avec une courbe de chauffage légèrement plus élevée). Néanmoins, il est possible d'atteindre un taux d'utilisation de la chaleur notable en mode chauffage de 3,18 en 2019/20 et de 2,89 en 2020/21).

La figure 13 montre également de manière impressionnante comment le rapport entre le besoin total de chaleur pour l'eau chaude (Q_{SECS}) et la chaleur pour le chauffage ($Q_{Schauffage}$) passe de seulement 7 % pour l'installation 12 à 32 % pour le nouveau bâtiment de l'installation 1. Avec cette évaluation, même dans le cas d'une nouvelle construction Minergie, le besoin en chaleur de chauffage est encore nettement élevé avec une part de deux tiers. Le faible besoin en chaleur de chauffage de l'objet 24 est également impressionnant, puisqu'il s'agit d'un objet entièrement rénové datant de 1975.

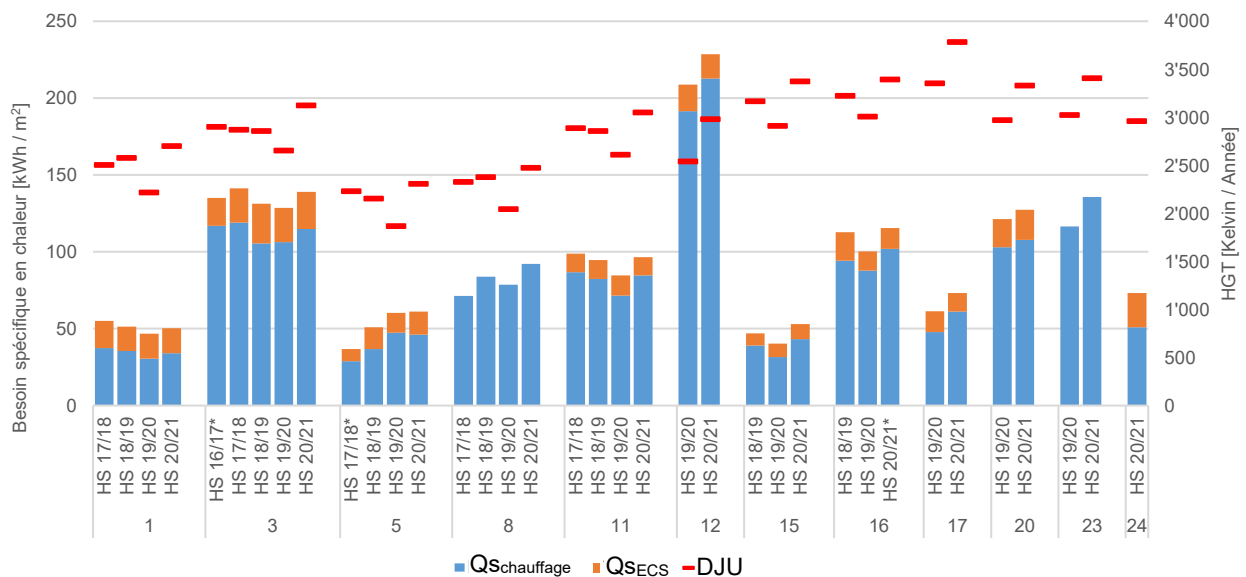


Figure 13 : Représentation des besoins en chaleur de chauffage ($Q_{Schauffage}$), des besoins en eau chaude sanitaire (Q_{SECS}) ainsi que des degrés-jours de chauffage de toutes les installations de pompes à chaleur air/eau

Il est bien sûr également intéressant de connaître la quantité d'énergie électrique dont le bâtiment a besoin pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire. La figure 14 présente donc la consommation d'énergie électrique spécifique pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire.

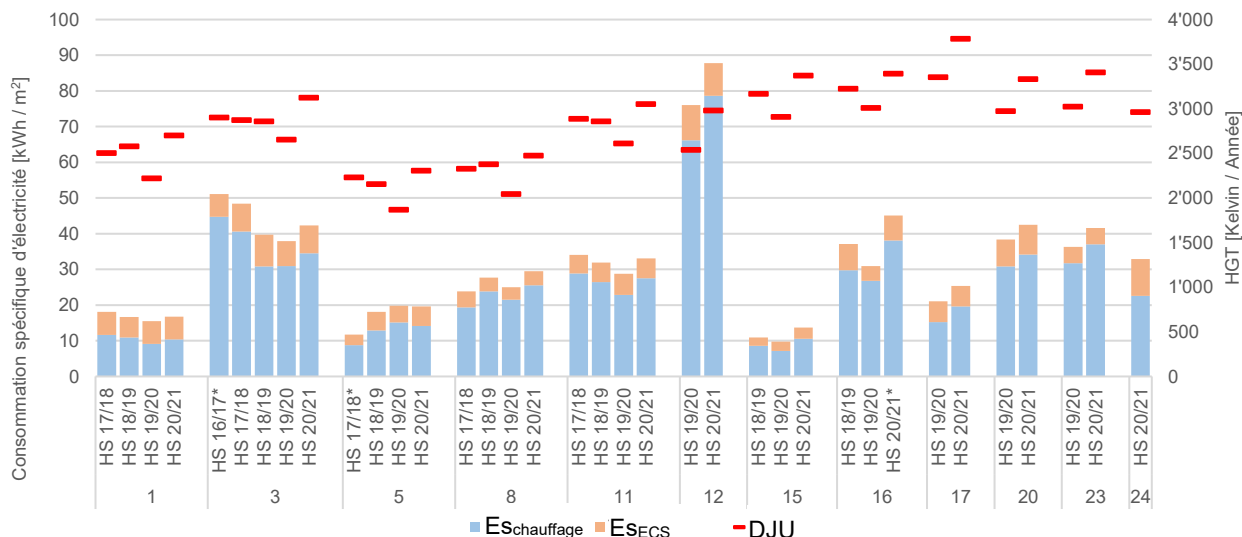


Figure 14 : Représentation de la consommation d'électricité pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire par m², ainsi que des degrés-jours de chauffage de toutes les installations de pompes à chaleur air/eau

La comparaison entre les objets 5 et 24 est par exemple particulière : les besoins en chaleur spécifiques totaux sont similaires (61 contre 73 kWh/m²), mais la consommation de courant électrique de l'installation de pompe à chaleur est 70% plus élevée que celle de l'objet 5 (20 kWh_{élec}/m²) en raison de l'efficacité nettement plus faible de l'installation 24 (33 kWh_{élec}/m²). Cette différence ne s'explique toutefois qu'en partie par la température de départ plus élevée de 10 K, la température de l'air extérieur plus froide et le conduit de circulation existant.

Les installations de pompes à chaleur sol/eau sont étudiées à partir de la figure 15. Ici, les besoins en chauffage se situent entre 40 et 106 kWh/m² pendant la dernière période de chauffage entièrement mesurée. Les besoins en eau chaude sanitaire se situent dans une fourchette de 9 à 23 kWh/m². Pour les installations de pompes à chaleur eau glycolée/eau, un seul nouveau bâtiment est mesuré, tous les autres objets sont des bâtiments existants. Ici aussi, on constate que les besoins en chauffage des nouvelles constructions sont au moins deux fois moins importants que ceux de la plupart des bâtiments existants. Avec un besoin en chaleur de chauffage de 40,3 kWh/m², l'objet 21 nouvellement enregistré atteint presque la valeur limite de Minergie (38 kWh/m²a).

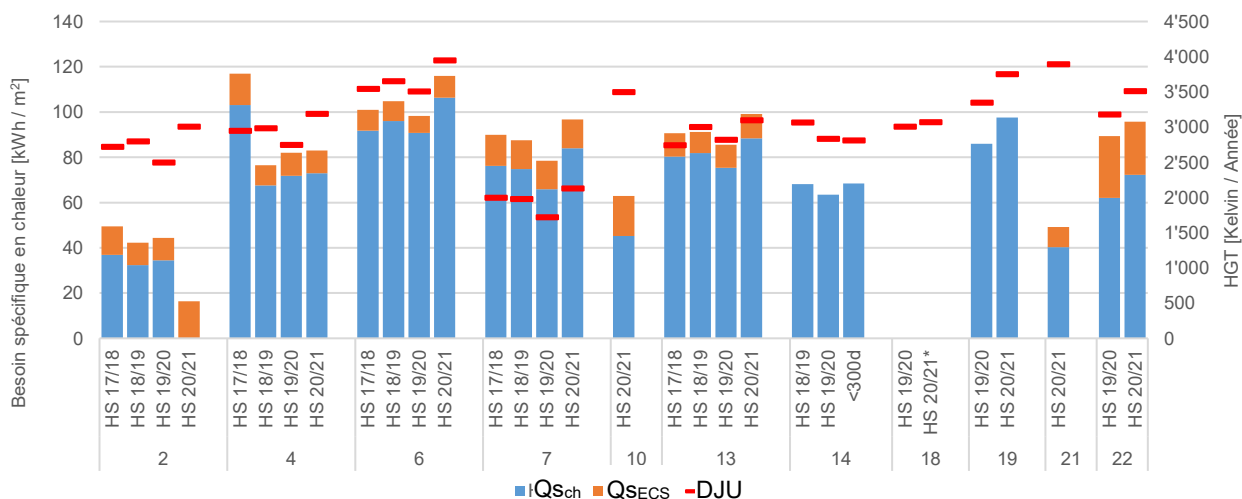


Figure 15 : Représentation des besoins en chaleur de chauffage ($Q_{s\text{chauffage}}$), des besoins en eau chaude sanitaire ($Q_{s\text{ECS}}$) ainsi que des degrés-jours de chauffage de toutes les installations de pompes à chaleur sol/eau

Les besoins en électricité de l'installation de chauffage du bâtiment sont indiqués dans la figure 16.

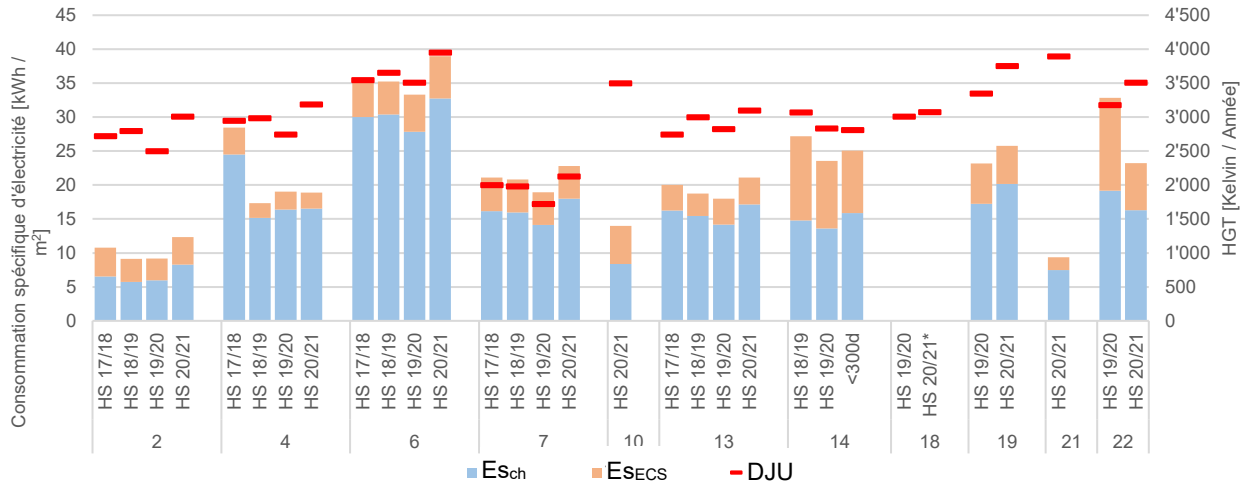


Figure 16 : Représentation de la consommation d'électricité pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire par m², ainsi que des degrés-jours de chauffage de toutes les installations de pompes à chaleur eau glycolée/eau.

La forte consommation d'énergie électrique pour la production d'eau chaude sanitaire est frappante pour les objets 14 et 22. Pour l'objet 14, une pompe à chaleur pour l'eau chaude sanitaire (chauffe-eau pompe à chaleur) fonctionne avec l'air extérieur. Le premier chauffe-eau à pompe à chaleur a été remplacé par un autre modèle au printemps 2019 suite à une panne de compresseur. Cependant, cet appareil effectue également la recharge de manière purement électrique lorsque les températures extérieures sont glaciales. Contrairement aux pompes à chaleur air/eau traditionnelles, les chauffe-eaux à pompe à chaleur n'ont qu'un champ d'application limité lorsque la température de l'air d'aspiration est très froide.

La différence de taux d'utilisation de la chaleur entre les pompes à chaleur air/eau et les pompes à chaleur sol/eau, mise en évidence au chapitre 2.1, est à nouveau illustrée dans les deux figures suivantes par l'examen des quantités d'énergie. Pour fournir l'énergie de chauffage thermique, les pompes à chaleur sol/eau ont besoin de nettement moins d'énergie électrique en raison de leur plus grande efficacité. Cette différence d'efficacité est particulièrement notable pour les bâtiments existants dont les besoins en chauffage sont élevés. Pour un bâtiment dont les besoins en chauffage sont de 20 MWh, une pompe à chaleur air/eau nécessite en moyenne 2'000 kWh d'énergie électrique en plus (double flèche noire). En raison des basses températures de la sonde géothermique associées à des températures de départ élevées, l'objet 6 présente un TUC plus faible que les pompes à chaleur sol/eau moyennes. L'installation nouvellement construite dans l'objet 22 fournit plus de 8'000 kWh de chaleur en plus avec moins d'énergie électrique.

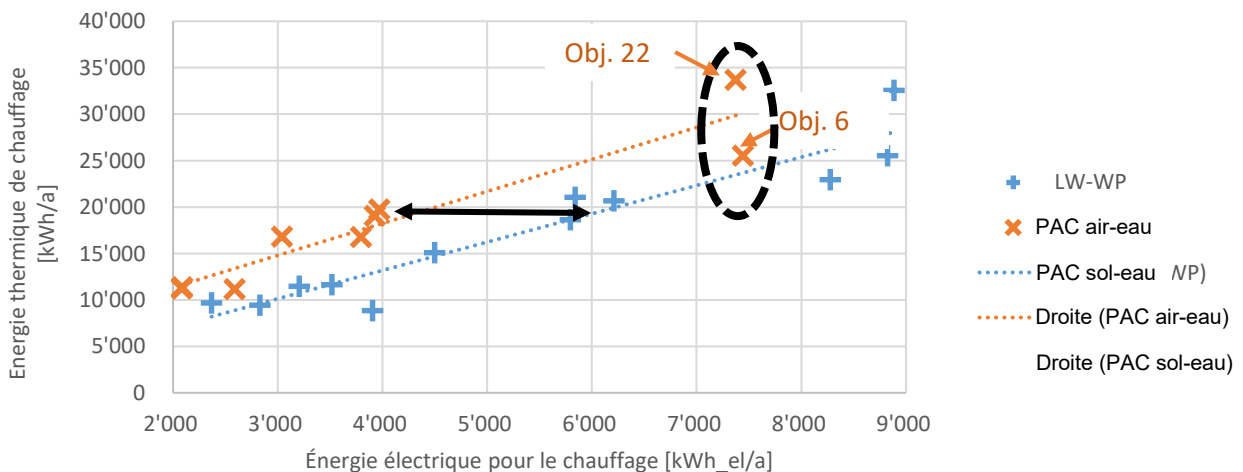


Figure 17 : Prélèvement d'énergie électrique et mise à disposition de l'énergie de chauffage thermique pour les pompes à chaleur air/eau (PAC air-eau) et eau glycolée/eau (PAC sol-eau)

La figure 18 montre la différence d'efficacité dans le taux d'utilisation de la chaleur (en mode chauffage uniquement) en fonction des besoins spécifiques de chauffage du bâtiment. Pour fournir un besoin de chauffage élevé, il faut des températures de départ élevées dans les systèmes de radiateurs, ce qui réduit l'efficacité de l'installation de pompe à chaleur. Néanmoins, cette affirmation ne peut pas être généralisée. Pour les bâtiments dont les besoins en chauffage sont très faibles, on constate des différences considérables dans le TUC. L'objet 24, en tant que rénovation, dispose encore de radiateurs, l'objet 15 atteint également une efficacité presque deux fois plus élevée avec une pompe à chaleur air/eau grâce à des températures de départ très basses. Sans l'objet 6, la droite moyenne orange des pompes à chaleur sol/eau serait beaucoup plus plate et donc nettement supérieure à la droite bleue des pompes à chaleur air/eau.

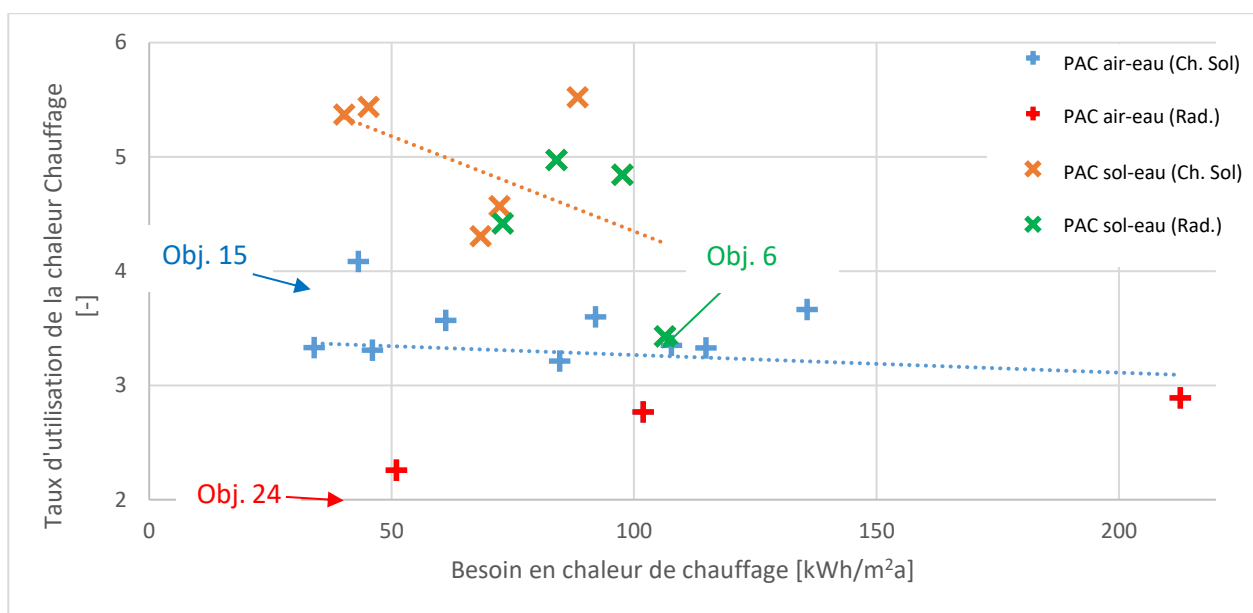


Figure 18 : Taux d'utilisation de la chaleur pour le chauffage (TUC) en fonction de la demande spécifique de chaleur pour le chauffage ($Q_{\text{chauffage}}$). Les systèmes d'émission de chaleur pour le chauffage par le sol (Ch. Sol) et les radiateurs (Rad.) sont différenciés par des couleurs.

2.5 Comparaison des températures de source en mode chauffage

La figure 19 montre la comparaison du niveau de température moyen des sources d'énergie que sont l'air extérieur (AE) et la sonde géothermique (SGV) dans les modes de fonctionnement Chauffage (jaune) et Chauffage avec suralimentation (vert). Dans ce dernier cas, les températures des sources sont donc prises en compte lors du fonctionnement du compresseur pendant toute la période de mesure. C'est pourquoi il y a une différence plus importante pour les pompes à chaleur air/eau en raison des variations de température plus importantes selon les saisons (chauffage uniquement en hiver par opposition à la recharge toute l'année). Il faut néanmoins noter que les besoins énergétiques de loin les plus importants sont ceux de l'hiver. Les détails concernant les différents objets se trouvent dans l'évaluation du rapport annuel précédent. Par rapport à la même période de l'année précédente, le temps a été nettement plus froid, la température moyenne de la source pour les pompes à chaleur air/eau est inférieure d'un kelvin, soit 3,7 °C. Les différences de température pour les pompes à chaleur air/eau résultent des différentes altitudes géographiques entre 393 et 834 m au-dessus du niveau de la mer.

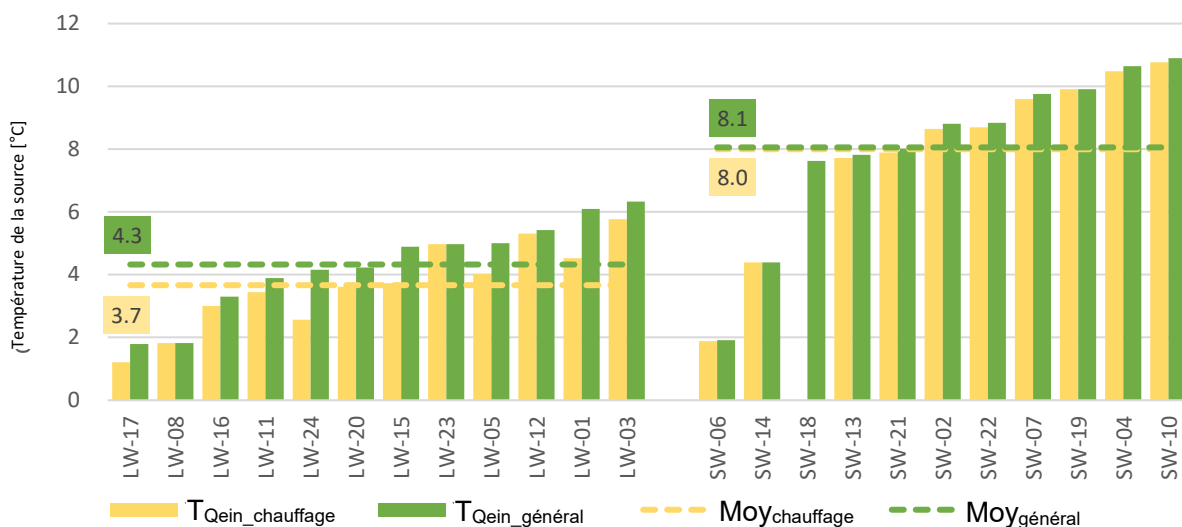


Figure 19 : Températures de la source en mode chauffage et au total, séparément pour les pompes à chaleur air/eau (LW-WP) et sol/eau (SW-WP), triées par ordre croissant

La température des sondes géothermiques n'a diminué en moyenne que de 0,3 K par rapport à la même période de l'année précédente. La nette différence de température entre les sondes géothermiques existantes (SW-06 et SW-14) et celles nouvellement installées reste très impressionnante. Les sondes, conçues à l'époque de manière plutôt économique, sont désormais soumises à une charge supplémentaire suite au remplacement d'une nouvelle pompe à chaleur plus efficace, puisque davantage de chaleur est désormais prélevée dans le sol et moins d'énergie électrique.

Comme pour le rapport précédent, la figure 20 ci-dessous permet d'examiner en détail les températures extérieures des pompes à chaleur air/eau. A l'aide des deux capteurs de température, un capteur de température extérieure sur la façade de la maison à proximité de la sonde de chauffage et un capteur de température de source directement à l'entrée de l'évaporateur, il est possible de repérer un éventuel court-circuit de l'air de la pompe à chaleur ainsi que des "lacs d'air froid". Afin d'éviter d'éventuelles erreurs dues au rayonnement solaire et au réchauffement de la façade, cette évaluation ne prend en compte que le mode de chauffage pendant la nuit (22 à 7 heures). Néanmoins, une façade chauffée ou un pont thermique dans le bâtiment peuvent influencer la mesure de la température de la sonde extérieure. (Dans le cas de l'installation 1, le parvis goudronné réchauffé pendant la journée pourrait être à l'origine d'une température d'aspiration d'air plus élevée pour la pompe à chaleur installée à l'intérieur).

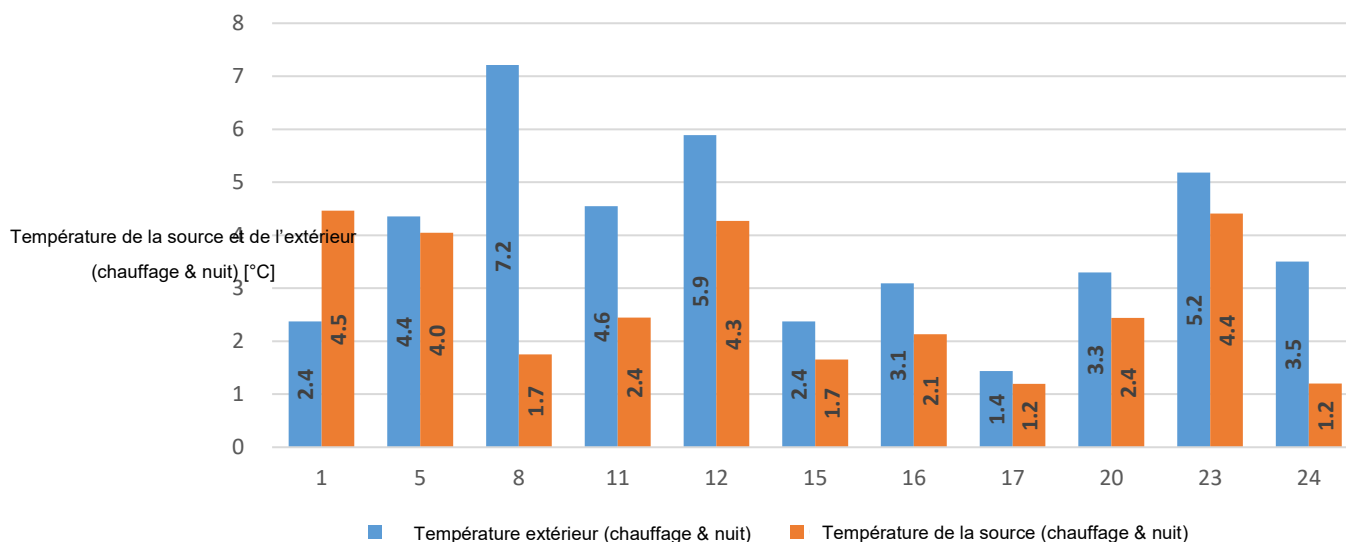


Figure 20 : Températures extérieures et températures de source pendant la nuit (22h à 7h) et en mode chauffage des différentes pompes à chaleur air/eau pendant la saison de chauffage 2020/2021.

2.6 Évolution de la température des sondes géothermiques

Pour les sondes géothermiques nouvellement installées, on admet souvent dans la pratique une baisse significative de la température après les premières années d'exploitation, à chaque fois en fonction de la géologie et du dimensionnement de la puissance et de la quantité de chaleur extraite. La mesure sur le terrain permet d'analyser les premières installations sur une durée d'exploitation de quatre ans. Avec la dernière période de chauffage nettement plus froide, on constate dans la figure 21 une légère baisse de température dans l'installation 7. Celle-ci est toutefois davantage due à la plus grande quantité de chaleur extraite et probablement pas à un refroidissement continu de la sonde. Néanmoins, les températures les plus élevées de la sonde (13 °C) n'ont plus été atteintes cet été. L'influence du prélèvement de chaleur est également visible l'année précédente : en raison de l'hiver doux, la température de la source a légèrement augmenté en moyenne annuelle.

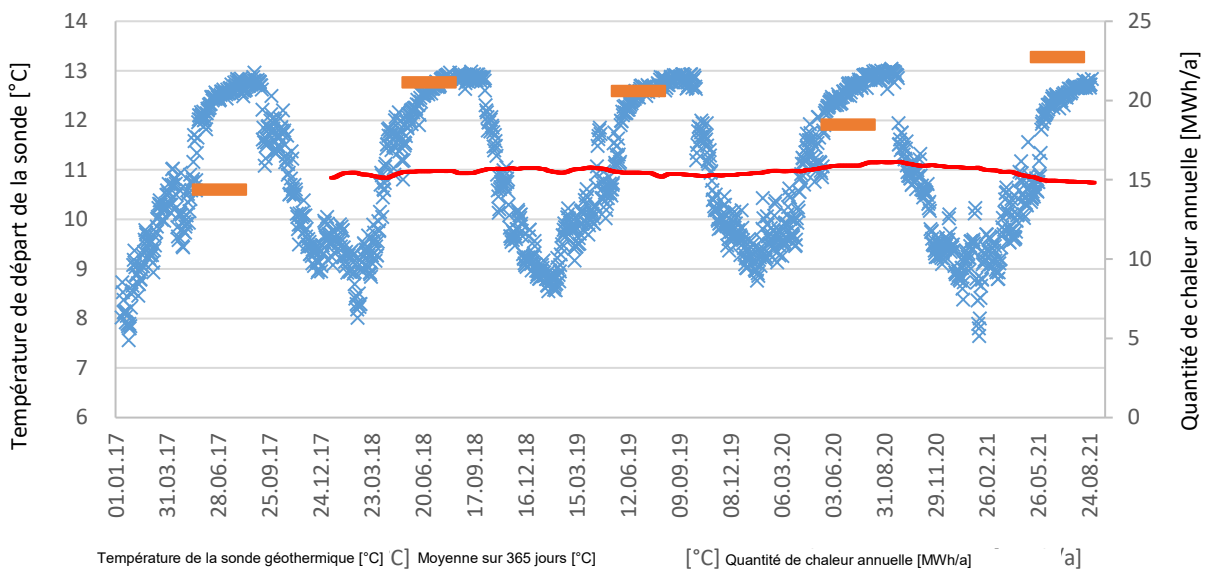


Figure 21 : Installation 7 sans refroidissement ni régénération de la sonde géothermique, pompe à chaleur on/off

2.7 Incidents, optimisations et divers

Dans l'installation 20, le nombre de recharges a pu être réduit à une seule par jour grâce à un programme horaire. En raison d'un tarif d'électricité très avantageux, le résident s'est décidé pour une recharge de l'eau chaude sanitaire un peu plus efficace sur le plan énergétique à l'heure du déjeuner, lorsque les températures extérieures sont les plus élevées. L'analyse détaillée a révélé des pertes de chaleur accrues au niveau de l'accumulateur d'eau chaude sanitaire, soit environ 3,35 kWh par jour. D'après la plaque signalétique de l'accumulateur, celui-ci ne devrait perdre que 1,64 kWh selon la mesure normalisée à 60 °C de charge sans raccords hydrauliques. En raison de ces écarts importants, des mesures ont été effectuées fin juin en utilisant uniquement le corps-de-chauffe électrique de l'accumulateur. Dans ce cas, les pertes thermiques quotidiennes dues à la production d'eau chaude sanitaire sont nettement plus faibles (environ 2,47 kWh), mais toujours plus élevées que celles indiquées par le fabricant. Ainsi, la moitié des pertes de chaleur sont dues au raccordement hydraulique (tuyauterie de la pompe à chaleur jusqu'au réservoir). 0,88 kWh de pertes de chaleur se produisent de la pompe à chaleur au réservoir éloigné. La majeure partie des pertes, soit 2,47 kWh, se produit donc au niveau du réservoir et de la sortie d'eau chaude. Ceci est d'autant plus surprenant qu'un siphon thermique a été installé ultérieurement au niveau de la sortie, mais qu'il n'a pas permis de réduire ces pertes. Au total, les pertes de 3.35 kWh ne correspondent qu'à une quantité de chaleur soutirée de 4.18 kWh, valeurs détaillées voir tableau 4.



Figure 22 : Ballon d'eau chaude sanitaire, installation 20. A droite, montage ultérieur d'un siphon. Double mesure redondante de la température directement à la sortie.

La thématique des pertes thermiques lors de la production d'eau chaude sanitaire a également été étudiée pour l'installation 17. Avec 2,34 kWh par jour, elles sont nettement plus faibles et proches des 2,2 kWh indiqués par le fabricant de l'accumulateur. En cas d'utilisation exclusive d'un corps-de-chauffe électrique, des valeurs d'environ 2,0 kWh ont pu être mesurées. Ainsi, les pertes de chaleur dues à la courte tuyauterie entre la pompe à chaleur et l'accumulateur sont minimales.

Dans l'installation 16, une pompe à chaleur air/eau à modulation de puissance (monobloc) installée à l'extérieur a subi en décembre 2020 un endommagement progressif du compresseur avec une baisse de la puissance de chauffage et de l'efficacité, de sorte que le compresseur a été remplacé sous garantie le 12 janvier 2021. Selon le technicien de service, la cause était la surchauffe du convertisseur de fréquence. Le compresseur a donc longtemps fonctionné à bas régime, ce qui explique que le retour d'huile et la lubrification du disque de défilement n'étaient plus suffisants.

Dans l'installation 18, il a fallu remplacer une pompe de source défectueuse pour la sonde géothermique. En raison d'autres travaux de transformation et de l'occupation partielle du bâtiment, trop peu de données de mesure exploitables sont disponibles pour la période 2020/21.

3. Évaluations spéciales en détail

3.1 Eau chaude sanitaire – stratégies de régulation

En raison des différentes possibilités de stratégie de régulation pour la charge de l'eau chaude sanitaire, cette thématique doit être traitée plus précisément sur le plan quantitatif et qualitatif. Les 17 installations équipées d'une pompe à chaleur et d'un réservoir d'eau chaude sanitaire sont prises en compte. Les quatre chauffe-eaux pompe à chaleur sont analysés séparément dans le chapitre suivant.

Lors de l'examen des données, il convient de noter que l'analyse des concepts de régulation ne peut s'appuyer que sur les données de mesure des installations et qu'il existe donc une certaine incertitude résiduelle. Les réglages exacts du régulateur de la pompe à chaleur ne sont pas connus. Une documentation de ceux-ci ne serait que partiellement possible, car les modifications apportées par les habitants et les techniciens de service ne peuvent pas toujours être mises à jour dans leur intégralité.

Sur 11 installations, la recharge de l'eau chaude sanitaire en fonction des besoins est, selon le tableau 3, la stratégie de régulation la plus souvent définie. De ce fait, il peut également y avoir plusieurs recharges par jour. Seules deux pompes à chaleur air/eau effectuent la recharge à midi ou en début d'après-midi de manière ciblée. Pour les autres objets, cela n'est pas possible (réglage sur le régulateur, besoin) ou n'est généralement pas souhaité (confort toujours élevé, tarif de nuit de l'électricité plus avantageux), même après la mise en œuvre des optimisations.

Les installations dotées d'une commande temporelle présentent en général moins de recharges, à titre d'exemple selon le tableau 4, l'installation 20 avec exactement une recharge par jour. La température de l'eau chaude sanitaire prélevée juste avant la recharge suivante n'est clairement inférieure à la température moyenne de soutirage dans aucune installation. Ceci est également confirmé par l'évaluation de la quantité moyenne de soutirage par recharge. En moyenne, seul un quart du volume du réservoir est soutiré jusqu'à la prochaine recharge. Avec un volume de soutirage de seulement sept litres par recharge, l'installation 4 est un cas exceptionnel. L'installation 3 présente la meilleure utilisation du réservoir. L'évaluation de la variation de la quantité de chaleur chargée dans l'accumulateur par charge, évaluée à l'aide du coefficient de variation, est également intéressante. Celui-ci devrait être assez constant dans le cas d'une régulation en fonction des besoins, car celle-ci est toujours effectuée à une certaine température au niveau de la sonde de l'accumulateur. Il ne devrait augmenter qu'en cas de prélèvement d'eau simultané pendant la charge. En revanche, dans le cas d'une recharge programmée, la quantité de chaleur à recharger peut varier en fonction des besoins. Les évaluations issues des mesures sur le terrain ne fournissent toutefois pas de résultat concluant à ce sujet. Il faut également tenir compte de la nécessité d'une recharge en raison du refroidissement continu de l'accumulateur sans prélèvement d'eau. En particulier en cas d'absence pour cause de vacances, l'ensemble de l'accumulateur se refroidit et n'est pas stratifié de bas en haut par l'eau froide qui s'écoule, comme c'est le cas au quotidien.

En revanche, les pertes de chaleur moyennes par jour, comparées aux besoins quotidiens en eau chaude sanitaire et à la taille du réservoir, fournissent une évaluation claire. Elles se situent entre 1,28 et 3,35 kWh, alors que les installations avec circulation affichent des valeurs trois fois plus élevées, de 6 à 9 kWh par jour. Par exemple, dans l'installation 24, seul un tiers de l'énergie de charge est effectivement utilisé sous forme d'eau chaude sanitaire, les deux tiers étant perdus sous forme de chaleur.

Tableau 3 : Stratégies de régulation, valeurs mesurées et particularités de la charge de l'eau chaude sanitaire

Objet	Caractéristiques	Charge ECS selon température de consigne (T) ou charge sur horloge (ZS)	Programme anti-légionellose: non (n) - hebdomadaire (w) - journalier (t)	Programme anti-légionellose après compresseur(n), avec compresseur (m) ou purement temporisé (z)	Optimisation PV: avec la pompe à chaleur (WP) ou à travers un corps-de-chauffe électrique (HS)	PAC air/eau: Chargement à midi (en raison d'une température de source plus élevée)	Température de départ PAC maximum	Température ECS maximale	Température moyenne de l'ECS lors de la charge	Température ECS minimale avant la prochaine charge (Lecture manuelle)	Circulation (gravité (S), pompe intermittente (I), pompe continue(D))	Programme réduit pour vacances	Régulation de la charge de l'ECS: en fonction de la température de départ, vitesse fixe (kW), réglé (g)
12	LW, Sa, d	ZS	t	z		non	65	57	51.9			non	9
3	LW, Sa, d	T	non	non		non	63.1	56.5	51.8	49.8			10
20	LW, Sa, fix	ZS	w	n		non	59.6	52.9	49	46.9			
24	LW, Sa, d	ZS	w	n	non	oui	58.7	54.1	47.2	46.6	oui		8
11	LW, Sa, d	T	w	n		non	58.3	51.1	48.8	50.1		non	g
5	LW, NB, fix	T	w	m	HS ¹⁾	non	57.5	50.7	48.2	47.9		non	
1	LW, NB, fix	T	w	z		non	56.6	50.1	48.8	48.3			
16	LW, Sa, d	T	w	z		non	56	50.2	46.4	45.2		non	8,5 ³⁾
17	LW, Sa, d	T	w	z		non	55.7	48.8	44.4	43.3			g 7,5 ⁴⁾
15	LW, Sa, d	T	non	non	WP	oui	47.9	44.5	37.5	38.0			g
7	SW, Sa, fix	T	w	z			60.1	57.9	54.7	52.9			
10	SW, Sa, fix		non	non			58.9	53.9	49.3	51.2			
13	SW, Sa, d	T	w	z			57.4	52.2	47.7	51.8		non	4
22	SW, Sa, d	T	w	n			55.1	48.8	46.8	45.1			t
2	SW, NB, d	T	non	non			53.2	48.8	46.7	43.4	oui		10
21	SW, Sa, d	ZS	non				50.7	45.9	41.5	42.0		non	4,5
4	SW, Sa, d	T	non	non			46.2	41.9	40.3	37.6	S		5

LW = pompe à chaleur air/eau, SW = pompe à chaleur sol/eau, Sa = rénovation, NB = nouvelle construction, d = compresseur à vitesse variable, fix = compresseur on/off. 1) Élément de chauffage programme anti-légionellose à midi, 2) Puissance de charge décroissante de 4.5 à 3.5kW, 3) Puissance de charge décroissante de 10.5 à 8 kW, 4) D'abord puissance fixe de 7.5 kW, parfois nette réduction jusqu'à 4 kW. Période d'observation semaine d'hiver 01-07.03.2021.

Tableau 4 : Valeurs caractéristiques relatives aux besoins et à la charge de l'eau chaude sanitaire.

Objet	Caractéristiques	Réservoir ECS [l]	Besoin journalier en ECS [l/jour]	Nbr de charge ECS [charge/jour]	Quantité moyenne de soutirage par charge ECS [l/charge]	Quantité moyenne de chaleur par charge ECS [kWh/charge]	Variation de la quantité de chaleur produite par la PAC [-]	Énergie électrique moyenne par charge ECS [kWh_el/charge]	Énergie moyenne de soutirage par jour [kWh/jour]	Pertes de chaleur moyenne par jour [kWh/jour]	Pertes de chaleur par rapport à l'énergie totale [%]
22	SW, Sa, d	925	527	2.0	268	14.9	12%	4.19	21.73	-8.16	-27%
1	LW, NB, fix	388	261	2.3	112	5.08	12%	1.84	11.11	-1.28	-10%
2	SW, NB, d		259	2.4	107	7.78	51%	1.94	9.81	-8.99	-48%
3	LW, Sa, d	495	240	1.1	211	10.45	15%	3.36	10.41	-1.51	-13%
5	LW, NB, fix	408	200	1.9	103	5.11	13%	1.7	8.02	-2.44	-23%
10	SW, Sa, fix	495	181	1.5	121	8.09	12%	2.55	8.89	-3.21	-26%
15	LW, Sa, d	300	156	1.9	82	3.15	27%	1.01	4.57	-1.43	-24%
21	SW, Sa, d	362	153	1.2	133	5.88	15%	1.25	5.34	-1.44	-21%
16	LW, Sa, d	476	134	1.1	121	6.94	24%	2.8	5.46	-3.35	-38%
11	LW, Sa, d	423	113	1.5	74	4.23	9%	1.7	4.95	-2.25	-31%
7	SW, Sa, fix	388	110	2.6	43	2.93	18%	0.93	5.07	-3.12	-38%
20	LW, Sa, fix	388	98	1.0	97	6.66	7%	2.42	4.18	-3.35	-45%
17	LW, Sa, d	344	96	0.9	101	5.13	13%	1.73	3.82	-2.34	-38%
24	LW, Sa, d	372	89	2.1	43	5.07	8%	2.35	3.15	-7.41	-70%
13	SW, Sa, d	362	83	1.3	62	3.72	12%	1.09	3.66	-1.90	-34%
12	LW, Sa, d	344	55	1.2	46	2.97	12%	1.11	2.58	-2.65	-51%
4	SW, Sa, d	276	11	1.6	7	3.97	5%	0.92	0.3	-6.02	-95%

LW = pompe à chaleur air/eau, SW = pompe à chaleur sol/eau, Sa = rénovation, NB = nouvelle construction, d = compresseur à vitesse variable, fix = compresseur on/off. Période d'observation SH 2020/21

Le programme anti-légionellose constitue une particularité de la charge. Il convient d'attirer l'attention sur les modifications apportées à la norme SIA 385/1:2020, qui ne recommandent plus les programmes de désinfection traditionnels (annexe B.2). La température à la sortie de l'accumulateur doit être garantie entre 52 et 55 °C au minimum, selon le système hydraulique. Lors des mesures sur le terrain, on a encore constaté une grande insécurité de la part des habitants ainsi que des spécialistes du service. Dans certaines installations, le programme anti-légionellose a été modifié à chaque entretien. Au cours de cette période d'observation, le réchauffement périodique plus élevé a été effectué dans onze installations, dont dix instal-

lations hebdomadaires et l'installation 12 quotidiennement. Pour réduire au maximum l'utilisation du chauffage, il faudrait procéder à un préchauffage avec le compresseur. Cela n'est cependant pratiqué que dans quatre installations, six d'entre elles effectuent la commutation uniquement en fonction du temps. Si le réservoir est nettement refroidi au préalable, le corps-de-chauffe électrique consomme beaucoup plus d'énergie électrique que nécessaire. Dans le cas de l'installation 12, le chauffage quotidien élevé par la résistance électrique a pour conséquence que la pompe à chaleur ne peut fournir que peu de chaleur de manière efficace. Dans six installations, on a constaté que tous les habitants étaient absents pour cause de vacances. Dans aucune de ces installations de pompe à chaleur, la charge du réservoir d'eau chaude sanitaire n'a été désactivée.

Pour les pompes à chaleur à puissance variable, différentes stratégies de charge peuvent être appliquées. Il s'agit principalement de la régulation ou de la fixation de la puissance ou du régime ainsi que de la régulation sur une température de départ de consigne de la pompe à chaleur. Si la vitesse de rotation est fixée, par exemple à 40 % ou à 3600 tr/min, la puissance de charge des pompes à chaleur air/eau est nettement plus élevée en été en raison de la température plus élevée de la source. Avec une puissance de charge régulée, par exemple 6 kW, la vitesse de rotation du compresseur est adaptée, la puissance électrique absorbée est donc plus faible en été. Pour des raisons d'efficacité, la stratégie de charge avec une puissance de charge limitée est à privilégier. Comme la surface de transfert de chaleur dans l'accumulateur (surface de chauffe du registre) reste inchangée, la température de départ de la pompe à chaleur augmente lorsque la puissance de charge est plus élevée. Dans le cas de la régulation de la température, la puissance de la pompe à chaleur est conduite au-dessus de la température de consigne du réservoir après une certaine température de charge. Ainsi, la puissance est nettement plus élevée au début qu'à la fin du processus de charge avec une efficacité plus élevée en début de charge.

Comme la stratégie de charge exacte des différents modèles de pompes à chaleur n'est pas connue, les différentes possibilités sont déterminées à l'aide des données de mesure en analysant les différents processus de charge ainsi que de manière quantitative par la comparaison été/hiver pour les pompes à chaleur air/eau.

L'annexe 11 montre clairement dans le tableau 5 une régulation selon une puissance de charge thermique constante d'environ 10,5 kW. De ce fait, la puissance électrique du compresseur est réduite d'environ 20 % en été. L'installation 16, en revanche, présente une autre stratégie de régulation, de sorte que la puissance thermique est supérieure de près de 50 % en été. Pour pouvoir fournir cette puissance de charge plus élevée à l'eau chaude sanitaire, la température de départ de la pompe à chaleur est plus élevée de presque 8 Kelvin qu'en hiver, avec une perte d'efficacité correspondante.

Tableau 5 : Comparaison de la charge d'eau chaude sanitaire pour les pompes à chaleur air/eau à puissance réglable entre l'hiver et l'été

Objet	Été/Hiver			Janvier 2021				Juin 2021			
	P_élec.	P_therm.	Différence de température été/hiver [K]	P_élec.	P_therm.	T_départ	T_départ (max)	P_élec.	P_therm.	T_départ	T_départ (max)
	[%]	[%]		[W]	[W]	[°C]	[°C]	[W]	[W]	[°C]	[°C]
3	51%	79%	2.08	4607	11790	50.07	60.04	2333	9272	49.40	62.12
11	79%	102%	0.84	4754	10322	49.43	57.57	3744	10561	51.26	58.41
12	67%	83%	0.41	3893	9453	56.20	63.09	2615	7805	56.00	63.50
15	54%	111%	0.56	1337	3103	42.41	47.80	717	3451	42.10	48.36
16	148%	146%	2.04	3544	10398	45.07	55.71	5238	15186	52.90	57.75
17	127%	119%	0.13	2694	7100	43.80	55.50	3416	8484	45.33	55.63
24	71%	113%	0.43	3304	6837	51.97	57.97	2354	7747	52.11	58.40

L'influence importante de la puissance de charge sur l'efficacité a pu être mesurée lors d'une optimisation de l'installation fin août 2021. La puissance thermique a été réduite d'environ 7,5 à 6 kW. Le COP mesuré est ainsi passé de 3,2 à 3,6 pour des températures de source comparables (18-19 °C). Cette augmentation de l'efficacité d'environ 12 % s'explique d'une part par l'efficacité plus élevée de la pompe à chaleur selon la fiche technique du fabricant (7 %) et d'autre part par une température de départ de la pompe à chaleur

inférieure de 2 K (5 %). En hiver, le nombre de dégivrages peut en outre être réduit grâce à une température d'évaporation plus élevée, ce qui augmente encore l'efficacité.

Ce simple exemple montre le potentiel d'optimisation de l'efficacité des pompes à chaleur à puissance variable grâce au réglage de la stratégie de régulation appropriée, sans restriction notable du confort pour les habitants (une durée de charge légèrement plus longue ne devrait pas avoir d'influence sur le confort). La condition préalable est que le régulateur mette cette possibilité à disposition. Les pompes à chaleur air/eau à régulation de puissance présentent une différence de COP d'environ 40 % entre la puissance maximale et le régime le plus efficace lorsque les températures extérieures sont douces.

3.2 Chauffe-eau pompe à chaleur

Dans ce sous-chapitre, nous nous intéressons aux pompes à chaleur pour eau chaude sanitaire (chauffe-eau pompe à chaleur), comme le montre la figure 23. Une comparaison détaillée n'est possible que de manière limitée en raison des différences d'installation et du comportement des utilisateurs.

Les installations 8, 19 et 23 sont placées dans le bâtiment et tirent la chaleur nécessaire de la cave ou de la chaufferie. En revanche, l'installation 14 fonctionne avec l'air extérieur direct, ce qui explique son efficacité nettement inférieure à celle des autres appareils. Cette différence d'efficacité est nettement plus importante durant cette saison de chauffage que durant les périodes précédentes en raison des températures extérieures plus basses. En raison d'un défaut, le chauffe-eau pompe à chaleur de l'installation 14 a été remplacé en hiver 2019. Le nouveau chauffe-eau PAC dispose d'un corps-de-chauffe électrique de 700 W, mais présente malheureusement aussi une puissance électrique d'environ 700 W en mode compression. Ainsi, une mesure globale de la puissance de la PAC ne permet plus de faire la distinction entre le fonctionnement du corps-de-chauffe électrique et celui du compresseur. C'est pourquoi ces grandeurs ne peuvent plus être représentées depuis le remplacement de la PAC.

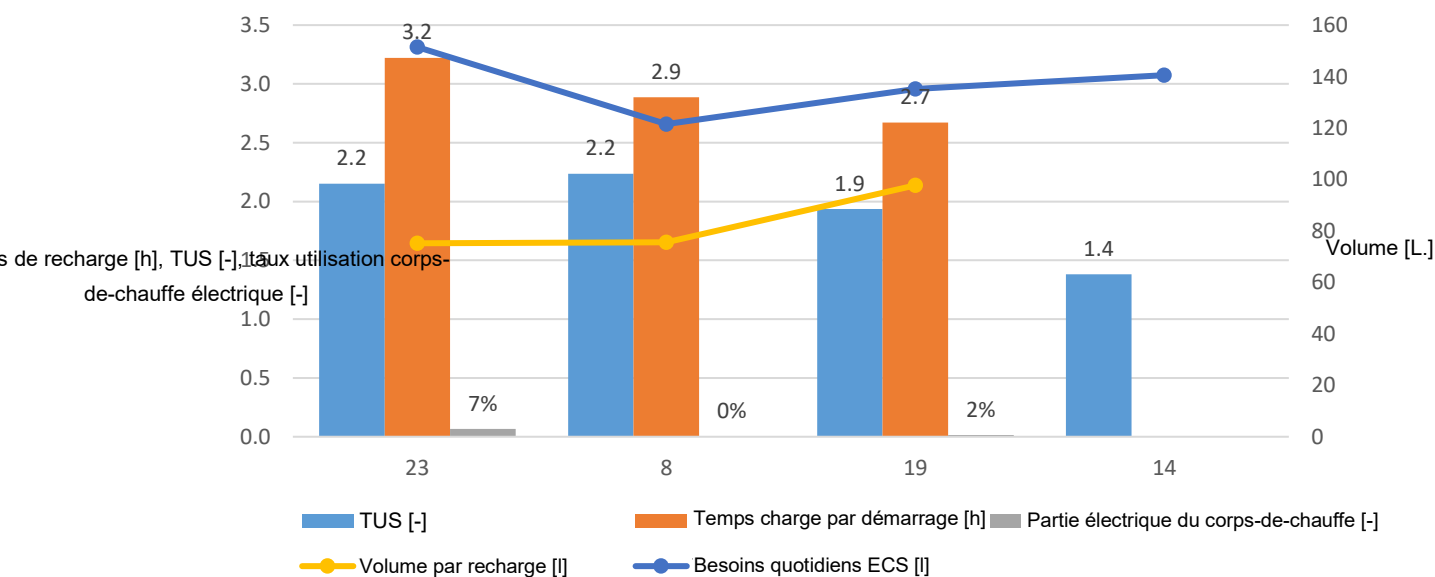


Figure 23 : Vue d'ensemble des chauffe-eaux pompe à chaleur, période de chauffage 2020/21. L'élément chauffant de l'installation 14 ne peut pas être mesuré séparément, mais il est souvent en service.

Une comparaison de l'efficacité de la recharge entre les chauffe-eaux pompes à chaleur et air/eau n'est pas possible en raison de la grande variabilité des températures et des quantités prélevées lors des mesures sur le terrain. L'évaluation est d'autant plus difficile car la puissance de charge thermique des pompes à chaleur pour eau chaude sanitaire ne peut pas être mesurée facilement (intervention dans le circuit de refroidissement, perte de garantie). C'est pourquoi il ne reste que le TUS, fortement influencé par le débit de soutirage, comme seul chiffre caractéristique pour une comparaison de l'efficacité des systèmes.

L'installation d'une pompe à chaleur séparée pour l'eau chaude sanitaire dépend des conditions individuelles. Les pompes à chaleur pour eau chaude sanitaire utilisant l'air intérieur présentent l'avantage d'être

compactes et de ne pas nécessiter de système hydraulique externe supplémentaire. Ainsi, les pertes de chaleur ne dépendent pas de la qualité du montage sur place. De plus, la fonction de déshumidification de ces appareils, inhérente au système, peut être un avantage dans les caves ou les buanderies humides. D'autre part, il faut tenir compte d'un éventuel vol de chaleur, de sorte que la quantité de chaleur extraite doit éventuellement être fournie par le système de chauffage des locaux. Les chauffe-eaux PAC utilisant l'air intérieur doivent donc être installés dans des pièces suffisamment grandes et non chauffées, en dehors du périmètre d'isolation. Dans les bâtiments existants, il suffit souvent d'isoler le plafond de la cave. Si une pompe à chaleur pour eau chaude sanitaire ne peut fonctionner qu'avec l'air extérieur, l'efficacité possible est nettement plus faible qu'avec une pompe à chaleur air/eau en raison de la température de fonctionnement minimale limitée (souvent entre 3 et -5 °C seulement).

3.3 Périodes de froid

Dans ce chapitre, nous allons examiner le mode de fonctionnement des installations de pompes à chaleur pendant les périodes de froid de la saison de chauffage précédente. Le tableau 6 présente le 14 février 2021. Il s'agit du jour le plus froid de la saison de chauffage dans une grande partie de la Suisse, avec des températures minimales de l'ordre de deux chiffres en dessous de zéro, qui succède à deux jours déjà très froids. Les mesures des bâtiments étaient donc déjà adaptées au froid et les besoins de chauffage étaient les plus élevés de l'hiver. Pour l'analyse d'une période de froid plus longue, la période entre le 6 et le 19 janvier est représentée dans le tableau 7. Ces 14 jours présentent en moyenne les températures extérieures les plus basses, mais ne contiennent pas de minimums aussi extrêmes qu'en février.

En cas de températures extérieures très basses, les pompes à chaleur sol/eau ne doivent fournir que les besoins en chaleur de chauffage plus élevés avec une température de départ plus élevée. Les températures de source de la sonde géothermique ne baissent alors que très peu. En revanche, les pompes à chaleur air/eau doivent travailler avec une température de source nettement plus basse. Leur puissance de chauffage maximale est ainsi réduite, ce qui va à l'encontre des besoins de chauffage plus élevés du bâtiment. Pour la première fois depuis le début des mesures sur le terrain, une courte durée de fonctionnement du corps-de-chauffe électrique a pu être détectée dans quelques installations. Dans l'installation 8, celle-ci est activée tôt le matin après les dégivrages pour atteindre la température de départ de consigne, pour des raisons de confort préventif (il ne s'agit cependant pas d'une fonction de protection contre le gel due à une température de départ trop froide pendant le dégivrage). L'après-midi, la pompe à chaleur on/off s'est remise à fonctionner et a atteint ce jour-là un total de 22,8 heures de fonctionnement (sur 24 heures possibles, pas de délestage actif). L'utilisation d'un corps-de-chauffe électrique n'aurait donc pas été nécessaire d'un point de vue énergétique, en raison de l'inertie du chauffage au sol. Néanmoins, cette installation est ici très proche de son point de bivalence. Dans l'installation 16, seul l'appoint électrique fonctionne en janvier en raison de la panne de compression (explication au chapitre 2.7). Le 14 février, jour beaucoup plus froid, les besoins en chaleur de cette installation ont été couverts en grande partie par le nouveau compresseur (17,7 h de fonctionnement). Cependant, le corps-de-chauffe électrique a été utilisé pendant près de 10 minutes, ce qui n'aurait pas non plus été nécessaire si la régulation avait été adaptée.

Pour les trois pompes à chaleur sol/eau à puissance réglable 4, 13 et 14 ainsi que pour la pompe à chaleur air/eau 23, 24 heures de fonctionnement ont été enregistrées, ce qui signifie que le compresseur fonctionne en permanence. Comme la puissance de chauffage mesurée pour tous les appareils n'est pas encore à son maximum, ces appareils modulent finement les besoins de chaleur nécessaires, sans interruption. Pour l'installation 23 en particulier, il s'agit d'un très bon comportement de régulation, mais aussi d'une surprise positive. Avant l'optimisation de la commande, cette pompe à chaleur présentait encore un comportement cyclique très fort avec des interruptions fréquentes. Les détails à ce sujet sont décrits dans le rapport annuel précédent 2019/20, chapitre 3. D'autre part, il faut mentionner les installations 10, 19 et 20. Avec seulement 8,0 à 11,3 heures de fonctionnement du compresseur, les pompes à chaleur sont nettement surdimensionnées.

L'indice des besoins en chaleur de chauffage ($Q_{\text{chauffage}}$ [kWh/m²]) permet de mettre en évidence les différences impressionnantes d'isolation des bâtiments dans les objets mesurés sur le terrain. Si les bâtiments bien isolés ne consomment que 0,3 kWh/m² le jour le plus froid, le besoin de chaleur spécifique du bâtiment

existant non rénové est quatre fois plus élevé. Malgré une température de départ très élevée de 54,1 °C en moyenne journalière, la pompe à chaleur air/eau à modulation de puissance du bâtiment existant non rénové 12 atteint encore un TUC de 2,0 en mode chauffage (moyenne annuelle 3,0) et est donc plus efficace que l'installation du bâtiment existant très bien rénové 24. Dans ce dernier, les températures de départ de 52,8 °C sont aussi élevées, mais cette installation 24 n'est pas encore optimisée par rapport à l'installation 12 et l'hydraulique avec accumulateur et circuit de chauffage mélangé devrait générer une majoration de la température de départ.

Les valeurs d'efficacité présentées dans ce chapitre ne doivent toutefois pas être généralisées. En moyenne annuelle, les besoins en chaleur sont les plus importants lorsque les températures hivernales sont douces. Les détails à ce sujet sont décrits en détail dans le dernier rapport annuel au chapitre 2.5.

Tableau 6 : Données mesurées en moyenne journalière le 14 février 2021, le jour le plus froid de la période de chauffage 2020/21.

Numéro d'objet	Caractéristiques	Température		Qs_chauffage [Wh/m2]	Energie			TUC_chauffage [-]	Appoint_électrique [kWh]	Pertes				Appoint_électrique [kWh]	t_fonct_compresseur [h/jour]
		T_extérieure [°C]	T_départ_chauffage [°C]		Q_chauffage [kWh]	E_chauffage [kWh_el]	Pth_chauffage [W]			Q_charge_ESC [kWh]	E_charge_ECS [kWh_el]	Pth_charge_ECS [kWh]	TUS_ECS [-]		
15	LW, Sa, d	-5.6	32.0	297	66	24	3 329	2.8	-	5.4	2.5	3 102	2.1	-	16.2
17	LW, Sa, d	-8.7	32.9	561	105	39	4 762	2.7	-	7.0	7.0	-	1.0	7.0	20.2
1	LW, NB, fix	-4.6	33.8	297	82	31	5 691	2.7	-	16.6	6.3	6 744	2.6	-	22.0
8	LW, Sa, fix	-0.9	35.8	617	141	53	6 325	2.7	9.1	-	3.6	-	-	-	22.4
20	LW, Sa, fix	-6.0	37.8	721	101	39	9 911	2.6	-	7.7	3.3	10 662	2.3	-	17.7
23	LW, Sa, d	-6.0	40.6	874	210	83	8 736	2.5	-	-	12.1	-	-	10.8	18.2
3	LW, Sa, d	-3.3	45.5	789	142	57	9 360	2.5	-	12.6	4.8	12 207	2.6	-	21.8
5	LW, NB, fix	-0.2	38.2	349	88	36	6 100	2.5	-	10.8	7.6	10 745	1.4	4.4	15.9
11	LW, Sa, d	-3.8	41.5	578	127	52	6 510	2.4	-	7.8	3.5	10 532	2.2	-	10.9
16	LW, Sa, d	-6.3	44.2	704	158	76	9 724	2.1	0.5	12.2	5.0	8 473	2.4	-	15.4
12	LW, Sa, d	-5.4	54.1	1 405	169	83	9 373	2.0	-	4.2	3.0	8 826	1.4	1.7	24.0
24	LW, Sa, d	-5.6	52.8	346	60	33	4 494	1.8	-	11.8	5.8	6 521	2.0	-	15.1
21	SW, Sa, d	-8.6	32.3	212	59	12	4 663	5.1	-	11.0	2.2	4 312	5.0	-	15.2
13	SW, Sa, d	-3.3	33.8	619	118	25	5 373	4.7	-	7.4	2.3	3 465	3.2	-	24.0
10	SW, Sa, fix	-6.8	33.4	385	97	22	12 906	4.4	4.6	6.5	2.5	9 707	2.6	-	8.0
7	SW, Sa, fix	0.7*)	43.1	737	173	41	11 463	4.2	-	9.2	3.0	10 220	3.1	-	16.0
19	SW, Sa, fix	-8.7	47.5	716	140	33	12 323	4.2	-	-	5.5	-	-	-	11.3
22	SW, Sa, d	-7.2	43.1	579	270	68	14 022	4.0	-	45.1	12.7	18 397	3.5	-	21.6
4	SW, Sa, d	-4.2	44.9	645	148	38	6 576	3.9	-	8.9	2.0	6 168	4.6	-	24.0
14	SW, Sa, d	-5.2	42.4	552	90	27	3 750	3.3	-	-	6.1	-	-	0.0	24.0
6	SW, Sa, d	-7.7	50.4	603	145	47	8 075	3.1	-	15.9	7.0	3 819	2.3	0.5	21.9
18	SW, Sa, fix	-2.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18.6
2	SW, NB, d	-4.8	33.0	x	x	31	x	x	-	15.1	5.3	9 454	2.9	-	22.9

LW = pompe à chaleur air/eau, SW = pompe à chaleur sol/eau, Sa = rénovation, NB = nouvelle construction, d = compresseur à vitesse variable, fix = compresseur on/off. *) Le capteur de température extérieure mesure les températures de l'air trop élevées. Valeurs comparatives Station météo Berne : -5,6 °C

Le chauffage électrique d'appoint de l'installation 10 (pompe à chaleur sol/eau on/off) est intéressant. Comme le compresseur n'a que huit heures de fonctionnement et qu'il bat donc nettement la mesure même le jour le plus froid, l'utilisation d'un corps-de-chauffe électrique n'est pas justifiée par une puissance de chauffage durablement trop faible. La saisie de toutes les grandeurs de mesure en moyenne sur 10s permet, lors des mesures sur le terrain, d'examiner en détail les événements exacts selon la figure 24 et révèle ici aussi une stratégie de régulation orientée vers le confort. Après le démarrage, le compresseur n'atteint pas immédiatement la zone de la température de départ de consigne. Au bout de cinq minutes seulement, le premier étage du corps-de-chauffe électrique est activé, et au bout de 10 minutes supplémentaires, le deuxième étage est activé parallèlement au fonctionnement du compresseur. Après seulement 40 minutes, le compresseur s'arrête à nouveau lorsque la température extérieure mesurée est d'environ - 11 °C.

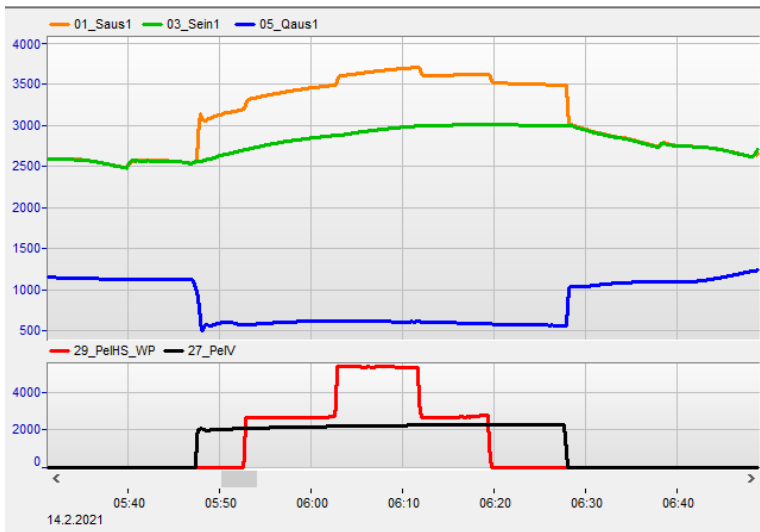


Figure 24 : Comportement de régulation de la pompe à chaleur sol/eau On/Off de l'installation 10 en mode chauffage avec activation à deux niveaux du corps-de-chauffe électrique. 01_Saus1 = température de départ, 03_Sein1 = température de retour, 05_Qaus1 = température d'entrée de la sonde, 29_PelHS_WP = puissance du corps-de-chauffe et 27_PelV puissance du compresseur en watts, représentation avec Green Eye - Writer Standard.

Tableau 7 : Données mesurées en moyenne journalière sur la période de chauffage (14 jours) du 6 au 19 janvier 2021

Numéro d'objet	Caractéristiques	T_extérieure [°C]	T_départ_chauffage [°C]	Qs_chauffage [Wh/m2]	Q_chauffage [kWh]	E_chauffage [kWh_el]	Pth_chauffage [W]	TUC_chauffage [-]	Appoint_électrique [kWh]	Q_charge_ESC[kWh]	E_charge_ECS [kWh_el]	Pth_charge_ECS [kWh]	TUS_ECS [-]	Appoint_électrique [kWh]	t_fonct_compresseur [h/jour]
15	LW, Sa, d	-0.7	31.1	117	59	18	2 973	3.2	-	7.7	3.5	2 918	2.2	-	23.0
17	LW, Sa, d	-0.9	31.8	85	77	25	4 809	3.1	-	7.2	3.7	5 873	2.0	1.3	15.9
8	LW, Sa, fix	1.9	35.5	-	126	41	6 166	3.1	0.2	-	3.3	-	-	-	20.7
1	LW, NB, fix	-0.2	31.5	209	64	22	5 299	3.0	0.0	16.6	7.2	7 008	2.4	0.6	11.9
20	LW, Sa, fix	-0.2	36.4	85	86	30	11 371	2.9	-	8.2	3.7	11 434	2.3	0.6	8.3
3	LW, Sa, d	-0.5	42.8	107	124	44	8 280	2.8	-	15.1	5.8	11 721	2.6	0.0	16.3
5	LW, NB, fix	0.9	36.8	163	80	29	6 815	2.8	-	15.6	6.3	7 773	2.5	0.5	13.8
11	LW, Sa, d	0.8	39.5	80	114	41	6 923	2.8	-	10.1	5.1	9 830	2.1	0.7	17.2
23	LW, Sa, d	-0.5	38.4	-	175	64	7 285	2.8	-	-	-	-	-	0.8	24.0
12	LW, Sa, d	0.4	53.9	31	148	67	9 011	2.2	-	4.8	2.8	9 238	1.7	1.3	16.7
24	LW, Sa, d	0.9	47.3	148	56	26	4 335	2.2	-	9.7	4.6	6 814	2.1	-	14.4
16	LW, Sa, d	-0.5	40.3	89	130	68	8 101	2.1	4.0	12.6	9.7	7 051	1.8	3.1	18.5
10	SW, Sa, fix	-0.3	31.3	141	82	15	12 384	5.5	-	13.7	4.5	10 238	2.9	-	7.8
21	SW, Sa, d	-0.3	31.2	81	90	18	4 830	5.1	0.0	7.5	1.7	4 216	4.4	0.1	20.3
13	SW, Sa, d	1.5	32.6	69	100	20	4 697	5.1	-	7.4	2.5	3 321	3.1	0.5	23.2
7	SW, Sa, fix	4.6*)	40.6	67	118	26	11 944	4.6	-	8.3	3.2	10 173	2.8	0.7	10.6
22	SW, Sa, d	-0.7	39.8	143	202	47	15 023	4.4	-	33.5	9.9	17 341	3.4	0.6	15.2
4	SW, Sa, d	1.0	42.9	62	127	31	5 611	4.1	-	8.3	1.8	6 022	4.6	-	24.0
19	SW, Sa, fix	-0.5	48.2	-	132	32	12 368	4.1	-	-	3.1	-	-	-	10.7
14	SW, Sa, d	0.3	39.6	-	73	19	3 034	3.8	-	-	8.4	-	-	0.0	24.0
6	SW, Sa, d	-0.2	50.0	71	163	54	7 786	3.0	0.0	12.5	7.0	4 332	2.0	2.7	23.6
18	SW, Sa, fix	0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13.8
2	SW, NB, d	-0.5	32.6	x	x	25	x	x	-	17.8	6.0	9 332	3.0	-	22.9

LW = pompe à chaleur air/eau, SW = pompe à chaleur sol/eau, Sa = rénovation, NB = nouvelle construction, d = compresseur à vitesse variable, fix = compresseur on/off

*) La sonde de température extérieure mesure des températures d'air nettement trop élevées.

3.4 Mode silencieux

Parmi les stratégies de régulation possibles pour un fonctionnement nocturne silencieux, il convient de distinguer les pompes à chaleur on/off et les pompes à chaleur à modulation de puissance. Les premières ne peuvent réduire les émissions sonores qu'en abaissant la vitesse de rotation du ventilateur. Cette réduction a un effet direct sur une température d'évaporation plus basse avec une diminution de l'efficacité qui en résulte, une chute de la puissance de chauffage et un givrage plus rapide de l'évaporateur pendant la période de transition. Dans le cas des pompes à chaleur Inverter, il est possible de limiter la puissance du compresseur en mode silencieux, en plus du ventilateur. Cette stratégie de régulation n'entraîne aucune perte d'efficacité et de confort, en particulier pendant les périodes de transition où les besoins en chauffage sont moindres. Dans ce cas, même en cas de mauvais comportement de régulation, l'efficacité peut être améliorée par la limitation de la vitesse et le comportement de la cadence peut être réduit. Toutefois, en cas de périodes de froid intense, la puissance de chauffage dans ce mode de fonctionnement limité peut ne plus être suffisante et il faudrait alors, selon la commande et le dimensionnement de la pompe à chaleur, procéder à un chauffage électrique supplémentaire. Outre ces stratégies de régulation, un abaissement nocturne classique avec une réduction de la température de départ pendant la nuit peut également minimiser le bruit grâce à une demande de puissance de chauffage plus faible. Dans les bâtiments bien isolés, la masse de stockage du bâtiment pourrait également être utilisée à l'avenir pour l'optimisation de l'autoconsommation du courant photovoltaïque. Le nouveau terme "augmentation de jour" représente l'utilisation de la masse de stockage jusqu'après le lever du soleil et la production d'électricité solaire à nouveau possible. Une telle stratégie de régulation permettrait également de réduire le bruit pendant la période de transition vers la saison de chauffage. Comme les mesures sur le terrain ne permettent pas de connaître les réglages du régulateur de la pompe à chaleur ni la logique de régulation exacte des différents fabricants, les valeurs mesurées ne permettent de tirer que des conclusions limitées sur l'utilisation du mode silencieux.

Le comportement de l'installation des huit pompes à chaleur air/eau à modulation de puissance est réparti et représenté entre le fonctionnement de jour (7-19 heures) et le fonctionnement de nuit (19-7 heures). Pour aucune installation, on ne constate de post-chauffage électrique en mode de chauffage hivernal normal (exceptions voir chapitre 3.3).

Pour trois installations (3, 17 et 23), aucune différence n'est visible entre le jour et la nuit. La puissance de chauffage, l'efficacité et la température de départ sont identiques en fonction de la température extérieure (température de la source de l'évaporateur). De même, le refroidissement de l'air entre l'entrée et la sortie de l'évaporateur ne change pas, de sorte qu'il n'y a pas de réduction de la vitesse de rotation des ventilateurs. Dans quatre installations (12, 15, 16 et 24), le chauffage est effectué la nuit avec une température de départ plus basse et donc avec une puissance de chauffage plus faible. A titre d'exemple, l'illustration 25 et l'illustration 26 montrent le comportement de l'installation 24.

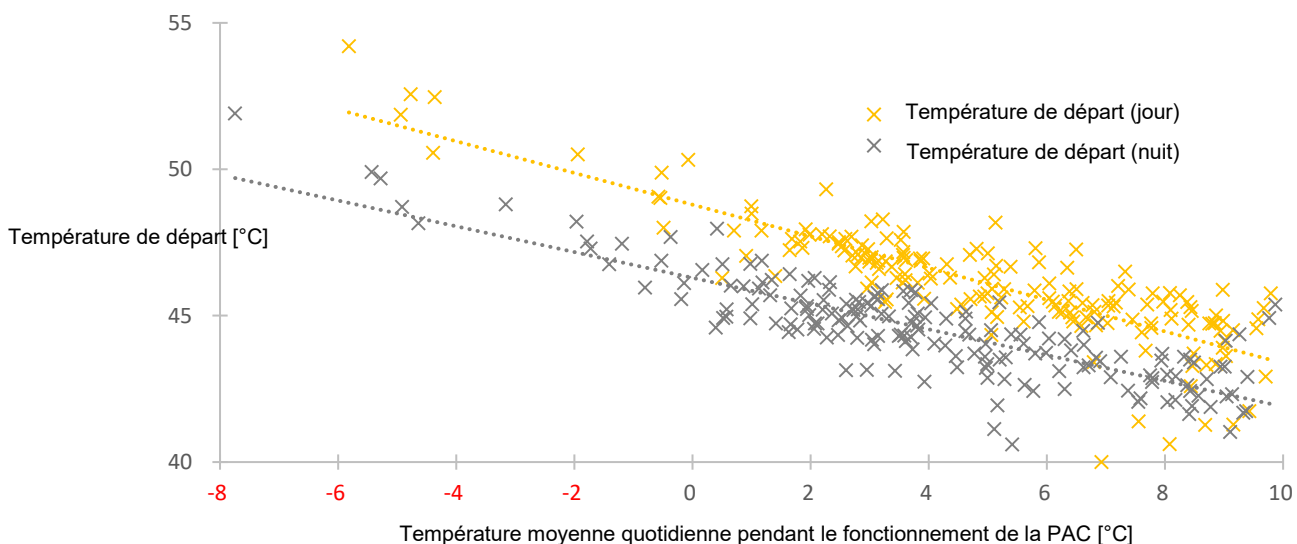


Figure 25 : Courbe de chauffe de l'installation 24 le jour (jaune) et la nuit (gris)

Comme l'étalement de la température sur l'évaporateur de ces pompes à chaleur diminue également avec une puissance d'extraction de la source plus faible, les ventilateurs ne sont pas réduits, ou pas de manière mesurable, et il devrait s'agir pour ces installations d'un abaissement nocturne classique et non d'un mode silencieux.

La Figure 26 montre que la puissance absorbée par le ventilateur de l'évaporateur reste pratiquement inchangée entre le fonctionnement de jour et le fonctionnement de nuit (voir "Puissance du ventilateur (jour/nuit)"). Le compresseur à régulation de puissance fonctionne à une vitesse plus faible et consomme donc moins de puissance en raison de la pression de condensation plus faible (température de départ plus basse) (voir "Puissance du compresseur (jour/nuit)").

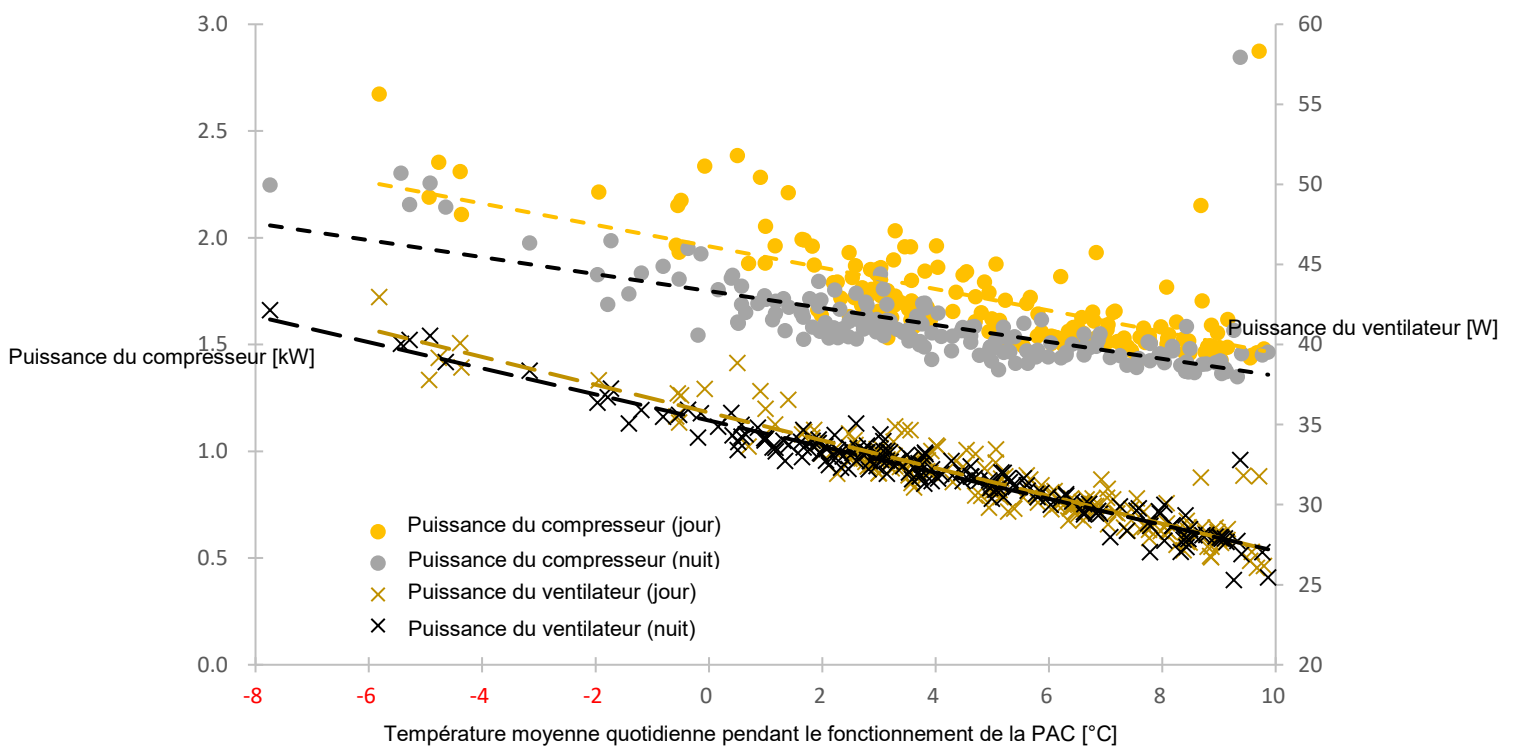


Figure 26 : Puissance absorbée du compresseur (points) et du ventilateur de l'évaporateur (croix) en mode jour (jaune) et en mode nuit (gris).

Pour l'objet 11, les données de mesure disponibles n'ont malheureusement pas permis de tirer des conclusions claires.

Sur la base de l'évaluation des données de mesure, aucun mode silencieux ne devrait être activé sur aucune des huit installations considérées. Dans le cas contraire, les effets sur le mode de fonctionnement de la pompe à chaleur sont faibles et ne sont pas enregistrés malgré une technique de mesure étendue et précise.

4. Conclusion et perspectives

Dans l'ensemble, la saison de chauffage 2020/21, avec un hiver nettement plus froid et une période de froid prolongée de plusieurs jours en janvier ainsi que les trois jours les plus froids en février, entraîne des valeurs d'efficacité légèrement inférieures à celles des années précédentes pour les pompes à chaleur air/eau. Pour la première fois, l'utilisation d'un corps-de-chauffe électrique pour le chauffage a pu être constatée dans trois installations. A l'exception d'une installation avec un compresseur endommagé, ces éléments chauffantes n'étaient cependant pas nécessaires pour les besoins en chaleur du bâtiment et sont uniquement dues à la stratégie de régulation de la pompe à chaleur.

Les installations équipées d'une sonde géothermique présentent même un rendement global plus élevé pendant la saison de chauffage 2020/21, car le chauffage a été effectué plus longtemps avec une température de départ basse pendant le printemps froid. Pour les pompes à chaleur air/eau, un rendement moyen de 3,0 (plage de rendement de 2,2 pour l'objet 24 à 3,9 pour l'objet 15) a été mesuré au cours de la dernière saison de chauffage, les pompes à chaleur sol/eau dépassent nettement ces valeurs d'efficacité avec une moyenne de 4,5 (plage de rendement de 3,1 pour l'objet 6 à 5,2 pour les objets 18 et 21).

La charge de l'eau chaude sanitaire offre un potentiel d'optimisation simple pour les pompes à chaleur à régulation de puissance en adaptant la puissance de charge. Le fonctionnement de la thématique très discutée du mode silencieux pour les pompes à chaleur air/eau ne peut pas être prouvé lors des mesures sur le terrain à l'aide des données de mesure. Dans certains bâtiments, un abaissement nocturne est réglé, mais celui-ci ne devrait pas avoir d'effet sur les émissions sonores.

Les principales conclusions peuvent être reprises de l'année précédente : Les possibilités les plus simples d'économiser de l'énergie apparaissent lors de la mise en service avec le réglage de la régulation de la pompe à chaleur. Par ailleurs, le manque de connaissances ou d'intérêt des exploitants ou des habitants ne permet pas d'exploiter le potentiel d'économie lié au réglage fin de la courbe de chauffe. Les réglages ou installations défectueuses ne sont pas détectés après la mise en service sans surveillance, dans la mesure où le confort des habitants n'est pas affecté.

Grâce à la technique de mesure précise et à haute résolution, il a été possible d'analyser en détail le comportement exact de l'installation pendant les périodes de froid. En outre, seules des données de mesure complètes et à haute résolution permettent d'analyser le comportement de régulation des pompes à chaleur.

Les principaux constats tirés des données de mesure de la saison de chauffage 2020/21 sont :

- Le chauffage électrique d'appoint pendant la période de froid était faible et inutile (les réglages du régulateur devraient être vérifiés et adaptés).
- Les pompes à chaleur air/eau ont couvert les besoins en chaleur sans problème, même pendant les journées très froides de l'hiver.
- Une installation hydraulique correcte est importante : conduite courte entre la PAC et le ballon d'eau chaude sanitaire, isolation des conduites et des raccords au ballon, thermosiphon.
- Révision de la SIA 385/1 - pas de recommandation de programme anti-légionellose.
- Limitation de la puissance de la production d'eau chaude sanitaire judicieuse pour les PAC à puissance régulée.
- Dans la mesure du possible, ne pas faire fonctionner les chauffe-eaux pompe à chaleur avec de l'air extérieur froid (problématique de l'essai de dégivrage et donc nombreux démarrages et utilisation fréquente du corps-de-chauffe électrique).
- Chauffage de l'eau chaude sanitaire commandé par un indicateur, pour les PAC air/eau : des températures de source plus élevées l'après-midi augmentent l'efficacité (ainsi que la consommation propre pour les installations solaires photovoltaïques).
- Mode silencieux non détectable dans les mesures sur le terrain.
- Les PAC sol/eau avec de nouvelles sondes géothermiques atteignent durablement les valeurs d'efficacité les plus élevées.

La dernière pompe à chaleur a été installée dans une maison individuelle à l'automne 2020. En raison du retard dans l'emménagement dans le nouveau bâtiment, des données de mesure exploitables ne seront disponibles qu'à partir de la période d'observation 2021/22. Toutes les installations de pompes à chaleur existantes continueront à être mesurées. Cela permettra d'analyser et d'évaluer le mode de fonctionnement ainsi que les mesures d'optimisation mises en œuvre. De même, l'enregistrement de plusieurs années d'exploitation permet d'observer le comportement de l'installation et de détecter d'éventuelles modifications (programme anti-légionellose, modifications des réglages, mises à jour de logiciels, défauts, etc.)

L'année dernière, quatre publications sur les résultats des mesures de terrain ont pu être publiées dans la revue spécialisée "planer + installateur" sous les titres :

- "Quelle est la performance des pompes à chaleur actuelles sur le terrain ?", édition 11/12-2020
- "Production d'eau chaude sanitaire avec des pompes à chaleur", édition 1-2021
- "Pompes à chaleur dans les bâtiments existants chauffés aux énergies fossiles", édition 2-2021
- "Procédure pour les mesures sur le terrain", édition 3-2021

Du côté scientifique, les mesures sur le terrain ont pu être présentées à un public de spécialistes lors du congrès DKV à Magdebourg (Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein) ainsi que lors de la 18ème conférence internationale sur la réfrigération et le conditionnement de l'air à Purdue. Les expériences ont également été partagées dans une vidéo de formation destinée aux conseillers en énergie.

A partir de 2020, des immeubles collectifs encore plus petits, avec une charge calorifique d'environ 20-30 kW, seront inclus chaque année dans la campagne de mesure. Un très grand immeuble (installation 26) d'une surface de 4270 m² et comptant 44 habitants est déjà mesuré pour la période de chauffage 2021/22. Les personnes ayant un petit immeuble et qui souhaiteraient participer gratuitement à la mesure sur le terrain avec leur installation de pompe à chaleur pas encore montée sont volontiers priées de s'adresser au responsable du centre d'essai des pompes à chaleur, Mick Eschmann mick.eschmann@ost.ch / www.wpz.ch, pour de plus amples informations.

5. Annexe

5.1 Méthodologie et équipement de mesure

Pour une description détaillée de la méthodologie et de l'équipement de mesure utilisé, veuillez-vous référer à l'exécution dans les rapports précédents.