

Jeannette Wapler, ingénieure diplômée HES; Sebastian Helmling, ingénieur diplômé
Département de l'efficacité énergétique des bâtiments; Technique du chaud et du froid
Institut Fraunhofer des systèmes énergétiques solaires ISE
Heidenhofstrasse 2, 79110 Freiburg, Germany
jeannette.wapler@ise.fraunhofer.de
<http://www.ise.fraunhofer.de>

Essai de terrain de cinq chauffe-eaux pompe à chaleur

Les analyses sur le terrain des chauffe-eaux pompe à chaleur donnent des indications sur la performance de ces équipements chez le client final. Alors que le volume de stockage de tous les appareils est à peu près le même, les besoins en eau chaude des utilisateurs varient parfois de manière considérable. De petites quantités d'énergie soutirée vont de pair avec une forte proportion de perte de chaleur. Dans le cas des quatre installations examinées du point de vue de la perte de chaleur, celle-ci a atteint entre un tiers jusqu'à plus du double de la quantité d'énergie qui était en fin de compte soutirée.

Il existe également d'importantes différences entre les appareils en ce qui concerne le concept de fonctionnement de la pompe à chaleur et de l'élément chauffant. La position du capteur de régulation et la valeur cible de stockage (en particulier ses possibles variations lors du cycle diurne) en sont deux d'entre elles. Ces points affectent les températures d'exploitation de la pompe à chaleur et donc l'efficacité de la production d'eau chaude sanitaire. D'autres aspects susceptibles d'avoir un impact sur l'efficacité de l'installation sont la position de l'élément chauffant, son concept opérationnel et le concept de la fonction anti-légionelle, si cette dernière est activée. Les études montrent des possibilités d'amélioration pour toutes les installations. Celles-ci vont de mesures faciles à mettre en œuvre (comme les modifications de paramétrage, par ex. le passage de la cible de stockage de constante à variable en fonction de l'heure de la journée) à des mesures au niveau de la fabrication (telles que par ex. des modifications de l'algorithme de contrôle pour le fonctionnement de l'élément chauffant).

Présentation du projet

Dans le cadre du projet «Essai de terrain de cinq chauffe-eaux pompe à chaleur», financé par l'Office fédéral de l'énergie, des données de mesure détaillées et à haute résolution portant sur le fonctionnement réel des installations dans des ménages de deux et/ou quatre personnes, sont identifiées et analysées sur une période de deux ans (période de mesure: 01/08/2016 - 30/06/2018). Cinq chauffe-eaux pompe à chaleur de fabricants différents ont été sélectionnés comme objets d'étude. Ils ont chacun été utilisés au moins dix fois et ont été installés après 2014 dans le cadre du programme «ProKilowatt». Les installations étudiées sont des chauffe-eaux pompe à chaleur typiques, avec condensation directe dans le tiers inférieur du réservoir d'eau sanitaire intégré (volume 270 ... 310 L) et élément chauffant complémentaire. Le tableau 1 donne un aperçu des caractéristiques techniques des appareils. L'air ambiant du local est utilisé comme source de chaleur pour toutes les installations.

Une installation photovoltaïque est présente dans l'un des bâtiments et le chauffe-eau pompe à chaleur est exploité en fonction de celle-là. Ainsi, le fonctionnement, les températures de stockage et les performances de cette installation ne peuvent être comparés à ceux des quatre autres installations de pompes à chaleur. Cette étude ne porte que sur l'analyse du comportement de soutirage de cette installation. Le rapport intermédiaire [1] comprend des commentaires sur le comportement et les performances de cette installation.

Installation	1	2	3	4	5
Volume nominal en litres	285	308	270	295	266
COP	3,2	3,11	2,94	2,9	3,3
Cond. marginales COP: Source T / puit; Profil de soutirage; Norme	A15/W15-45 k.A.; EN 255	A15/W10-55 XL; EN 16147	A15/W10-55 XL; EN 16147	A15/W10-55 XL; EN 16147	A20/W10-55 XL; EN 16147
Puissance calorifique en kW	1,7	1,7	1,7	1,6	1,4
Puissance de l'élément chauffant	1,5	1,5	1,8	1,5	1,5

Tableau 1: Caractéristiques des installations

La chaleur qui émane du réservoir d'eau sanitaire est mesurée à l'aide d'un compteur de chaleur. Le compteur de chaleur est constitué d'une paire de capteurs de température (directement immergés, PT500, classe B, dt_max 0,15 K), d'un générateur de débit volumétrique magnéto-inductif (résolution: 1 impulsion pour 5 ml de débit; incertitude de mesure: +/- 0,5 % de la valeur mesurée) et de l'unité de calcul. Dans l'ensemble, la marge d'erreur du compteur de chaleur selon la norme EN 1434 est de 3,5 %. L'énergie électrique absorbée par les appareils est mesurée au moyen de compteurs de courant alternatif (résolution: 10 impulsions/Wh; classe de précision 1/B (+/- 2 % de la valeur mesurée)). Afin de pouvoir déterminer l'énergie électrique consommée par les différents composants des chauffe-eaux pompe à chaleur, plusieurs compteurs électriques ont été mis en place (compresseur, ventilateur, élément chauffant)¹.

Deux voire parfois trois capteurs de température ont été montés sur les réservoirs d'eau sanitaire, le cas échéant, dans les sondes thermométriques existantes ou, à titre d'alternative, fixés en tant que sondes d'applique sur la surface du réservoir. Etant donné que la position des sondes thermométriques varie selon les dispositifs, les capteurs de température sont installés à des hauteurs différentes². De plus, la température et l'humidité de l'air sont mesurées dans le local d'installation. Toutes les données de mesure sont collectées et stockées dans une résolution temporelle de cinq secondes.

Selon le concept de mesure, l'évaluation de l'efficacité des installations se réfère à une limite de bilan «après» stockage, comme c'est le cas pour EN 16147 [2], la norme relative à la mesure

¹ Pour les appareils pour lesquels cette configuration standard ne peut être appliquée, l'affectation de l'énergie se fait à l'aide d'algorithmes d'évaluation.

² Les noms des capteurs utilisés dans ce rapport comprennent l'information concernant le taux. Par ex. TS1_15 % désigne un capteur de température qui est positionné à 15 % de la hauteur du réservoir au-dessus du fond du réservoir.

des pompes à chaleur pour la production d'eau chaude sanitaire. L'efficacité de l'énergie fournie par la pompe à chaleur et de l'élément chauffant n'est donc pas directement déterminée. L'efficacité spécifiée de l'installation est plutôt affectée par la quantité de perte de chaleur. Ceci doit toujours être pris en compte lors du classement des résultats. Ainsi, les valeurs de COP et les rendements saisonniers des pompes à chaleur (pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire) sont généralement indiqués avec une limite de bilan «avant» stockage, contrairement aux chauffe-eaux pompe à chaleur.

Les résultats ci-dessous sont donnés en UTC (heure d'hiver).

Comportement de soutirage

Schéma 1 illustre la répartition de fréquence du volume d'eau chaude soutiré par jour. L'histogramme est divisé en intervalles de classe de 10 litres/jour. Les jours durant lesquels aucun soutirage n'a eu lieu sont inclus dans la classe 1 (0-10 litres/jour). Les besoins en eau chaude des utilisateurs sont considérablement différents. Dans les deux bâtiments habités par des familles de quatre personnes, le volume moyen de distribution quotidien est de 145 litres/jour (installation 1) et 191 litres/jour (installation 5). Pour ces deux installations, le volume soutiré (léger) n'a que rarement dépassé la capacité nominale de réserve de 285 litres ou 266 litres. Pour les ménages de deux personnes, un volume moyen de 54 litres/jour (installation 2), 71 litres/jour (installation 3) ou 37 litres/jours (installation 4) a été soutiré. Pour les indications moyennes de l'installation 4, il importe de noter que la proportion, sans ou avec très peu d'eau chaude soutirée, est très élevée; ainsi, moins de 3 litres/jour ont été soutirés sur 25 % des jours. Dans ces trois ménages, moins d'un tiers du volume nominal de réserve respectif a été soutiré la plupart des jours.

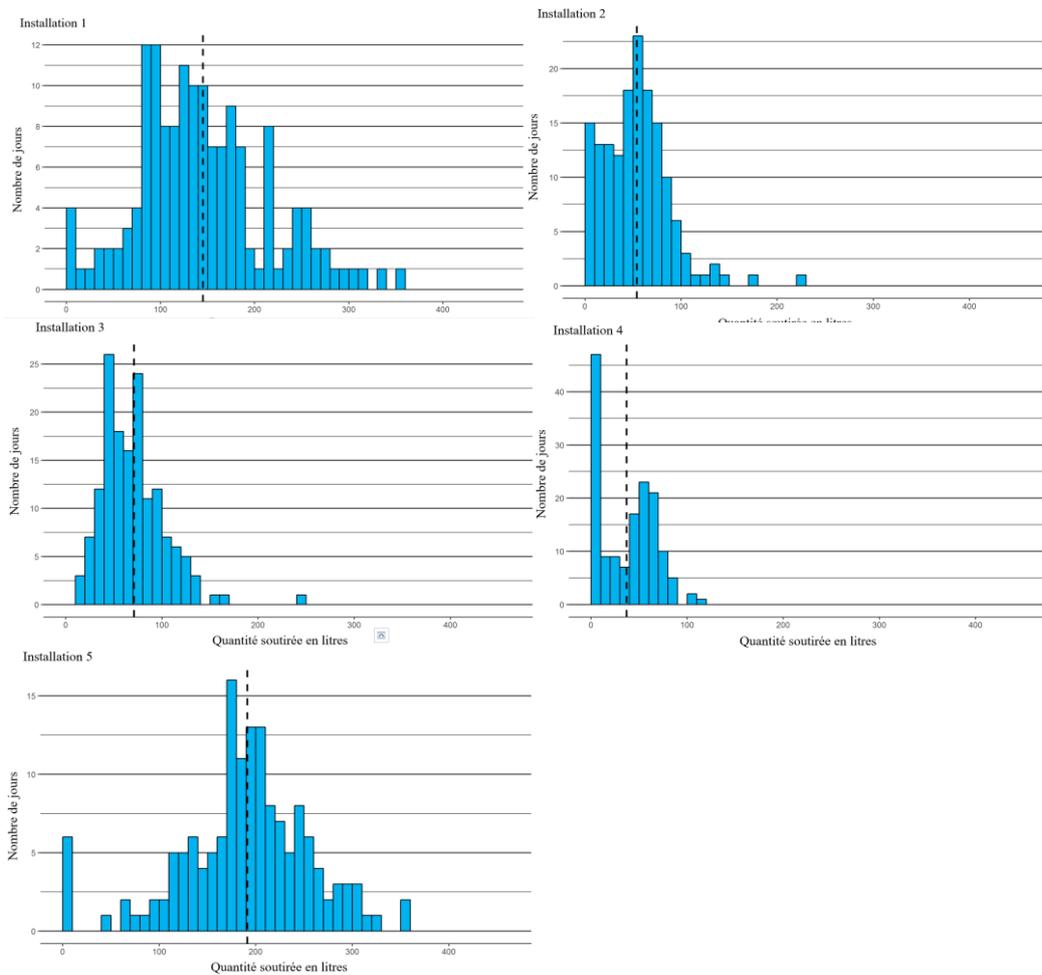


Schéma 1: Volume quotidien soutiré des cinq installations

Les valeurs de COP indiquées par les fabricants sont basées sur des mesures de laboratoire selon la norme EN 16147 [2]. Cette norme définit différents profils de soutirage (voir le Tableau 2). Les chauffe-eaux pompe à chaleur ayant une capacité de réserve d'environ 300 litres sont essentiellement mesurés avec le profil XL (19,7 kWh). Afin de comparer les besoins en eau chaude des cinq ménages étudiés avec les profils de soutirage de la norme EN 16147, les valeurs quotidiennes de l'énergie soutirée sont réparties en classes. La classe «XL» comprend, par ex. la fourchette de 15,4 kWh/jour à 21,8 kWh/jour. Les résultats sont présentés dans l'histogramme Schéma 2 suivant.

Profil de soutirage	3XS	S	M	L	XL
Chaleur soutirée	0.345 kWh	2.1 kWh	5.845 kWh	11.655 kWh	19.7 kWh

Tableau 2: Profils de soutirage selon la norme DIN EN 16147

Dans le Schéma 2, le bleu représente la classification respective des besoins en chaleur de l'eau sanitaire des trois ménages de 2 personnes (installations 2, 3 et 4) dans les classes de

soutirage définies. Les soutirages de ces utilisateurs font presque exclusivement partie des classes «0» à «M». L'accent principal est à chaque fois mis sur la classe «S». Dans le cas des deux ménages de 4 personnes (représentés en orange), des soutirages de la classe «XL» se sont également produits pendant quelques jours. L'accent principal du soutirage est mis sur la classe «M» (installation 1) ou la classe «L» (installation 5).

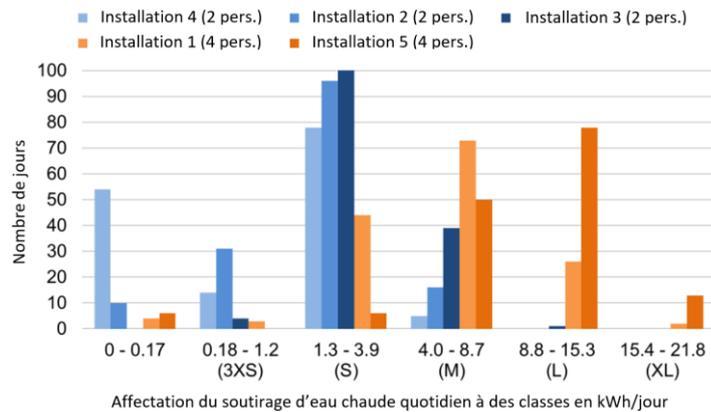


Schéma 2: Répartition de la quantité de chaleur soutirée quotidiennement pour les cinq installations mesurées (la classe «0» comprend également les jours où (en raison d'une absence) aucune quantité d'eau chaude n'a été soutirée).

Dans le Schéma 3, les températures moyennes à l'entrée et à la sortie du réservoir sont indiquées à la fin de chaque soutirage. Ici, seuls les soutirages d'un volume minimum de 2 litres sont pris en compte, car la température de soutirages plus petits est encore fortement influencée par la température de stagnation de l'eau dans les tuyaux. Puisque, dans le cas de l'installation qui utilise un système photovoltaïque, la valeur cible de la réserve est parfois considérablement augmentée, cette installation n'est pas prise en compte dans la présentation comparative.

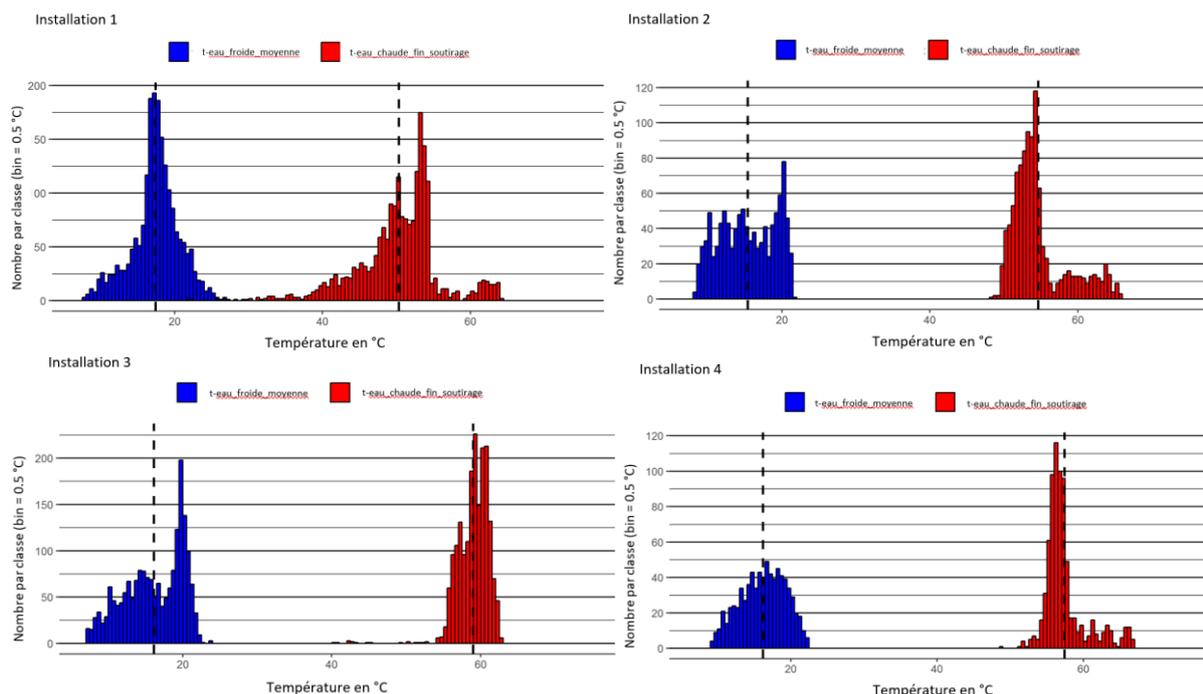


Schéma 3: Température de l'afflux et du prélèvement du réservoir à la fin de soutirages d'un volume d'au moins 2 litres

Mode de fonctionnement et efficacité

Dans le cas des installations 1 à 4 (sans système photovoltaïque), des concepts différents pour le fonctionnement de la pompe à chaleur et de l'élément chauffant ont été suivis. Ici, les concepts individuels diffèrent les uns des autres, en particulier au niveau des aspects suivants:

- Position du capteur de température utilisé pour la régulation
- Valeur cible de la température de stockage et hystérèse pour le fonctionnement de la pompe à chaleur; varie éventuellement en cours de journée
- Position de l'élément chauffant
- Concept de la fonction anti-légionelle
- Concept de fonctionnement pour l'élément chauffant (en dehors de la fonction anti-légionelle)

Les points cités ont une influence tant sur l'efficacité du système que sur le confort de l'utilisateur. L'efficacité du système est déterminée par deux points centraux: la température de stockage (avec influence sur la température du condenseur et donc sur le COP ainsi que sur les pertes de chaleur) et le fonctionnement de l'élément chauffant (et sa synchronisation avec le fonctionnement de la pompe à chaleur). Les chapitres suivants présentent une analyse du comportement de fonctionnement des installations individuelles et leur efficacité. Dans le tableau 3, les valeurs caractéristiques essentielles de régulation de chaque installation ont été répertoriées.

Installation	1	2	3	4
Position du capteur de contrôle (en % de la hauteur du réservoir au-dessus du fond du réservoir)	~ 15 %	~ 63 %	~ 10 %	~ 29 %
Mode standard (Plage horaire valeur cible et hystérèse)	Paramètres changeants ⁽¹⁾ ; par ex. 8h40 – 15h40 53 °C – 5 K	22h00 – 7h00 55 °C – 4 K	21h15 – 4h15 54 °C – x K	continu 54 °C – ~5 K
Utilisation en dehors de la plage horaire du mode standard	Pompe à chaleur désactivée	48°C – 4K	Pompe à chaleur désactivée	-
Position de l'élément chauffant (volume au-dessus de l'élément chauffant)	~ 121 L (58 % du V _{réservoir})	~ 138 L (45 % du V _{réservoir})	~ 125 L (46 % du V _{réservoir})	~ 186 L (63 % du V _{réservoir})
Commutateur anti-légionelle	65 °C; une fois par semaine	65 °C; une fois par semaine	désactivé	66,6 °C; une fois par semaine
Fonctionnement de l'élément chauffant, en complément au commutateur anti-légionelle	désactivé	libéré	libéré	néant
Informations complémentaires: Certains paramètres ne sont pas connus; les valeurs et les informations dans les cas non connus ont été dérivées/estimées à partir des données de suivi (1): les paramètres ont été modifiés à plusieurs reprises au cours de la période d'évaluation; jusqu'au début du mois de décembre, la plage horaire allait toujours du début de matinée au début d'après-midi (ici aussi, différentes heures de début et de durée (généralement 7 h, parfois 4 h) sont choisies; depuis le début du mois de décembre, en semaine, de l'après-midi jusqu'à la nuit, et le week-end, de la fin de la nuit jusqu'en début d'après-midi				

Tableau 3: Paramètres de contrôle des installations 1 à 4

Fonctionnement de la pompe à chaleur au cours de la journée

La valeur cible de la température de stockage pour le fonctionnement de la pompe à chaleur n'est pas constante pour trois des quatre installations (installations 1 à 3) au cours de la journée. Dans chaque cas, une plage horaire, durant laquelle le «mode standard» est activé, est définie quotidiennement. Pour les périodes en dehors de cette plage horaire (appelées «mode en baisse» ou «mode off»), soit la valeur cible est réduite, soit la pompe à chaleur est désactivée. Dans le cas de l'installation 4, la valeur cible est constante tout au long de la journée. Les diagrammes du Schéma 4 montrent le déroulement quotidien du fonctionnement de la pompe à chaleur en vert (uniquement la pompe à chaleur) et en rouge (pompe à chaleur et élément chauffant) pendant la période d'évaluation allant d'août à décembre 2016.

Pour l'**installation 1**, les paramètres de réglage de la pompe à chaleur ont été modifiés à plusieurs reprises par l'utilisateur au cours de la période étudiée. Au cours de la période allant du mois d'août au début du mois de décembre 2016, le «mode standard» est activé pendant la journée (du matin au début de l'après-midi), à partir de décembre, pendant la nuit en semaine et pendant la journée le week-end. En dehors de cette période, la pompe à chaleur est désactivée. Du fait que le capteur de contrôle ci-dessous est placé dans le réservoir (TS1_15 %) et qu'une hystérèse de 5 K est configurée, la température de stockage TS1_15 % au début de la «plage horaire standard» est toujours inférieure à la valeur d'activation (valeur cible moins l'hystérèse); ainsi, le début de la plage horaire est bien lisible sur le diagramme par l'intermédiaire du fonctionnement de la pompe à chaleur. La pompe à chaleur démarre au début de la «plage horaire standard» et fonctionne généralement deux à six heures sans interruption.

La caractéristique de fonctionnement de la pompe à chaleur (nombre de démarrages par jour, durée respective, ...) dépend à la fois du comportement de soutirage de l'utilisateur selon le jour et du moment de la journée du «mode standard». Le fonctionnement des installations pour trois paramètres différents de la «plage horaire standard» est décrit ci-dessous.

- Plage horaire commençant à 7h40 / 8h40 / 9h40 et durée de 7 heures:
La plupart du temps, la pompe à chaleur ne fonctionne qu'une seule fois par jour. La raison est que le soutirage, pendant la période suivant la fin de la première activation de la pompe à chaleur et précédant la fin de la plage horaire (donc midi / (début d') après-midi), est généralement faible. Durant environ 30 % des jours, la pompe à chaleur fonctionne une deuxième fois; de quelques minutes (si le début de l'activation de la pompe à chaleur se situe juste avant la fin de la plage et met donc un terme non à la température de stockage, mais à l'activation en «mode standard») à 2 heures.
- Plage horaire commençant à 5h40 et d'une durée de 12h ou 9h (uniquement les week-ends):
La pompe à chaleur est en marche deux à quatre fois au cours de la plage horaire. Par rapport à la plage horaire décrite précédemment, cela s'explique, d'une part, par une durée plus longue de la plage horaire ainsi que par un démarrage plus précoce, et d'autre part, le cas échéant, par le profil de soutirage du week-end.
- Plage horaire du soir et de la nuit (début à 19h40 ou 15h40, fin à 3h40):
Si la plage horaire commence déjà à 15h40, les utilisateurs ont en principe encore accès à une quantité significative d'eau chaude après la première activation de la pompe; la pompe à chaleur fonctionne deux ou trois fois au cours de la période. Si la période débute seulement à 19h40, la pompe à chaleur n'est, dans la plupart des cas, pas activée une deuxième fois.



Schéma 4: Déroulement chronologique du fonctionnement de la pompe à chaleur et de l'élément chauffant pour les installations 1 à 4

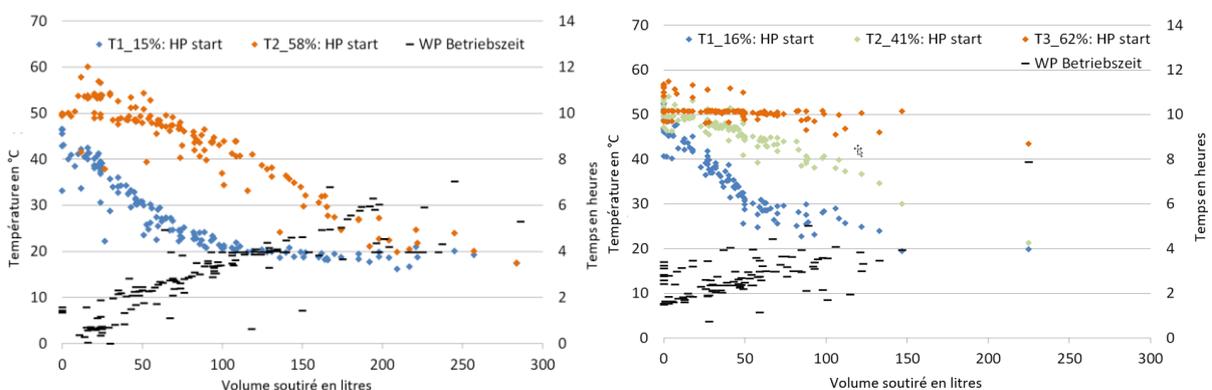
Pour les **installations 2 et 3**, le mode standard est activé pendant la nuit: de 22h00 à 7h00 pour l'installation 2 et de 21h15 à probablement 4h15 pour l'installation 3. En dehors de cette plage horaire, la valeur cible est réduite de 7 K (pour l'installation 2) ou le fonctionnement de la pompe à chaleur est désactivé (installation 3). Selon la position temporelle du mode standard, la pompe à chaleur fonctionne seulement une fois par jour pour l'installation 3. Dans le cas de l'installation 2, le soutirage matinal a, la plupart du temps, encore lieu durant la «plage horaire standard». Cependant, cela ne provoque pas le démarrage de la pompe à chaleur, puisque le capteur de contrôle est positionné dans la partie supérieure du réservoir et le volume de soutirage matinal est, en règle générale, inférieur à 50 L. (Certains jours, la pompe à chaleur est activée au cours de la deuxième partie de la nuit).

L'**installation 4** montre une caractéristique de fonctionnement sensiblement différente de celle des installations 1 à 3. La pompe à chaleur fonctionne deux ou trois fois par jour pendant environ 1h (à l'exception des jours avec un très faible soutirage de volume ou les jours présentant une température de stockage accrue, en raison du cycle anti-légionelle). Pour cela, deux aspects sont décisifs. Tout d'abord, le mode standard est activé pendant l'ensemble de la journée et ensuite, le capteur de contrôle est positionné dans le tiers inférieur du réservoir. La pompe à chaleur démarre déjà après que moins de 30 litres n'aient été soutirés depuis la fin de la dernière phase de fonctionnement de la pompe à chaleur.

Durée de fonctionnement des pompes à chaleur et températures de stockage en fonction du débit de soutirage

Les quatre graphiques du Schéma 5 donnent une vision plus proche des cycles de fonctionnement individuels de la PAC (période d'évaluation d'août à novembre 2016). Pour chaque installation de pompe à chaleur, la durée de chaque phase de fonctionnement des pompes à chaleur (axe des y droit) par rapport au volume d'eau sanitaire soutiré depuis la fin de la dernière phase de fonctionnement de la PAC ou, éventuellement (encore) pendant la phase considérée de fonctionnement de la PAC (axe des x), est présentée séparément. La durée des phases de fonctionnement de la PAC montre la corrélation attendue avec le volume soutiré. Si par ex. un volume d'environ 100 L a été soutiré à partir de la fin de l'activation précédente de la pompe à chaleur, la durée de fonctionnement de la PAC est généralement de 3,5 à 4 heures pour cette installation. Un écart par rapport à la corrélation se produit dans les cycles d'opération de PAC où la réserve a été chauffée lors de la précédente phase de fonctionnement de la PAC au-dessus de la valeur cible standard (fonction anti-légionelle), ou lorsque le fonctionnement considéré de la PAC prend fin avant d'atteindre la valeur cible à la fin du mode «standard». En outre, l'utilisation de l'élément chauffant raccourcit les durées de fonctionnement de la PAC.

En complément des durées de fonctionnement des PAC, la température est présentée, dans les quatre graphiques, à différents niveaux de stockage, au début de chaque phase de fonctionnement de la PAC (axe des y gauche). La température est, dans ce cas, appliquée par rapport au volume d'eau sanitaire soutiré durant la période entre la fin de la phase précédente et le début de la phase suivante de fonctionnement de la PAC. On peut entre autres constater dans les graphiques dans quelle mesure la capacité de stockage peut être «exploitée» (à savoir dans quelle mesure la température peut chuter) avant que la PAC ne se remette à fonctionner, quelle est la température dans la zone du condenseur au début de la phase de fonctionnement de la PAC et dans quelle mesure la zone supérieure du réservoir se situe toujours dans la fourchette de température cible. Pour les installations avec «mode standard» dont l'activation est limitée dans le temps (installations 1 à 3), les températures peuvent fortement baisser dans les zones de stockage inférieures et médianes au cours du «mode en baisse ou mode off», en fonction du volume soutiré au cours de cette période. Ensuite, la pompe à chaleur fonctionne, du moins au début de sa phase opérationnelle, avec un niveau de température faible et donc avantageux du côté du dissipateur thermique.



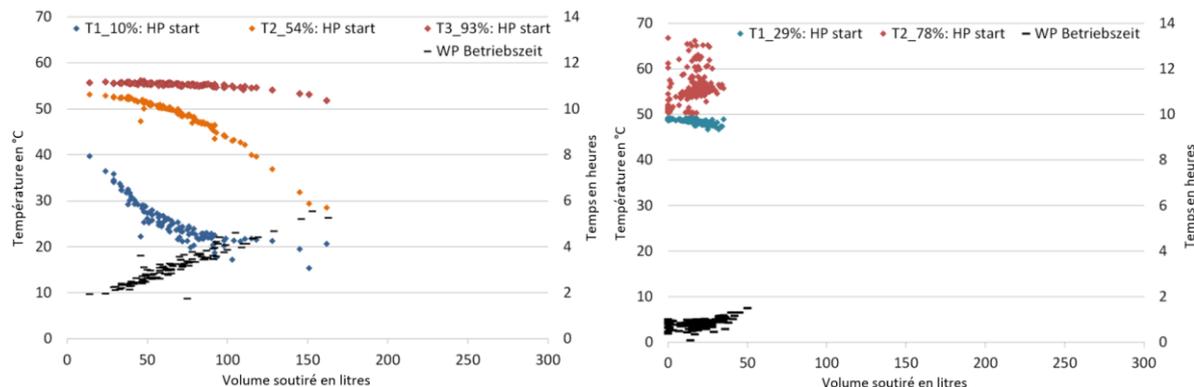


Schéma 5: Installations 1 à 4, température de stockage à des niveaux différents au début de chaque phase de fonctionnement de la PAC (axe des Y gauche), ainsi que la durée de fonctionnement de la PAC (axe des Y droit) relative au volume d'eau sanitaire soutiré depuis la fin de la phase précédente de fonctionnement de la PAC ou éventuellement (encore) pendant la phase de fonctionnement examinée de la PAC (température de stockage uniquement relative au volume soutiré avant le début de la phase de fonctionnement prise en compte)

Si, par ex., environ 100 L sont soutirés pendant le «mode off» pour **l'installation 1**, la température de stockage dans la zone inférieure (TS1_15 %) se situe à environ 20 °C au début du «mode standard» et à environ 45 °C dans la partie centrale (TS2_58 %). Dans la zone supérieure, la température se situe dans la fourchette de la valeur cible. Si de plus grandes quantités d'eau sont soutirées, en découlent des températures basses dans les zones intermédiaire et supérieure du réservoir. Par conséquent, des températures de soutirage inférieures à 40 °C peuvent également être observées. Ainsi, pour l'installation 1, par ex., la durée de la «plage horaire standard» de seulement 4 heures en octobre/novembre était trop courte pendant de nombreux jours pour permettre au réservoir de chauffer jusqu'à atteindre la valeur cible. Ainsi, ici la capacité «utilisable» du réservoir était inférieure à celle désirée et insuffisante pour de grandes quantités de soutirage «en dehors de la plage horaire». Sur quelques rares jours (avec «chargement complet du réservoir»), (bien) plus de 200 L ont été soutirés «en dehors de la plage horaire», entraînant ainsi une réduction (significative) des températures dans la zone supérieure du réservoir. Les pertes de confort d'utilisation (températures de soutirage trop basses) peuvent être évitées en choisissant un début et une fin de «plage horaire standard» adaptée au profil de l'utilisateur.

Pour les **installations 2 et 3**, des températures de stockage similaires ont été observées au cours de la période d'évaluation en fonction des volumes soutirés respectifs. Pour les deux installations, la température de stockage au niveau du raccordement de la conduite d'eau chaude est toujours supérieure à 45 °C, puisque le volume soutiré en «mode off» ou «mode en baisse» (et, de manière générale, le volume de soutirage quotidien) n'est jamais aussi élevé que certains jours dans le cas de l'installation 1.

En raison du concept sensiblement différent de fonctionnement de la PAC, les températures de stockage diffèrent de manière significative dans **l'installation 4** par rapport aux autres installations. Comme décrit ci-dessus, la pompe à chaleur se met toujours en marche lorsque

la température de la zone inférieure du réservoir (TS1_29 %) tombe à 5 K en dessous de la valeur cible. Ainsi, la température se maintient toujours dans la fourchette allant de 47,5 °C à 49,0 °C au début du fonctionnement de la pompe à chaleur. La pompe à chaleur n'est donc pas en mesure de travailler temporairement avec une faible température de dissipateur thermique.

Efficacité et perte de chaleur

Voici les résultats de l'analyse des pertes de chaleur de l'installation 1. Au cours de la période d'évaluation sélectionnée (aucun soutirage, trois cycles de fonctionnement en série de la pompe à chaleur, durée respective de 23,9 h), la température de stockage moyenne pondérée de surface (TS12_{avg, surf*}) est de 50,7 °C et la température ambiante moyenne de 24,5 °C. Dans ces conditions marginales, une consommation électrique moyenne $P_{\text{stand-by}}$ de 31 W est nécessaire pour compenser les pertes de chaleur. Cette valeur comprend, outre la consommation d'énergie du compresseur et du ventilateur, la consommation d'énergie de la régulation au cours de la période d'évaluation. Un taux de perte de chaleur de 3,2 W / K est déterminé au moyen de la diminution de température dans le réservoir. Ensuite, la perte de chaleur peut être estimée sur la base du taux de perte de chaleur, des valeurs mesurées de température ambiante et de stockage pendant l'ensemble de la période de mesure. Il s'avère que l'énergie qui n'est pas utilisée en raison des pertes de chaleur, est à peu près aussi élevée que l'énergie de soutirage (énergie utile) lorsque le soutirage quotidien est d'environ 50 L/jour. Les jours durant lesquels quelque 150 L/jour sont soutirés, les pertes ne s'élèvent plus qu'à un quart de l'énergie utile, selon ces calculs.

Schéma 6 montre les valeurs de l'efficacité du $\text{COP}_{\text{installation,cycle}}$ «après stockage» (carrés pleins), qui ont été déterminées sur un cycle défini de la pompe à chaleur³, en fonction de la quantité d'énergie exploitée pendant ce cycle de pompe à chaleur. Ce graphique montre le contexte attendu et illustre une nouvelle fois l'impact des pertes de chaleur. Le $\text{COP}_{\text{installation,cycle}}$ est d'environ 2,5 lorsque 5 kWh/cycle sont prélevés au cours des périodes respectives. Si les prélèvements s'additionnent, pendant le cycle, pour atteindre seulement 2 kWh/cycle, l'efficacité de l'installation de l'ordre d'environ 1,5 est alors nettement plus faible.

³ Les cycles de la pompe à chaleur sélectionnés répondent aux critères suivants:

Fin de la mise en service de la pompe à chaleur jusqu'à la fin de la mise en service suivante de la pompe à chaleur; aucune opération de l'élément chauffant; différence de la température du réservoir au début et à la fin inférieure à 0,5 K; durée de cycle: min. 23 h, max. 25 h

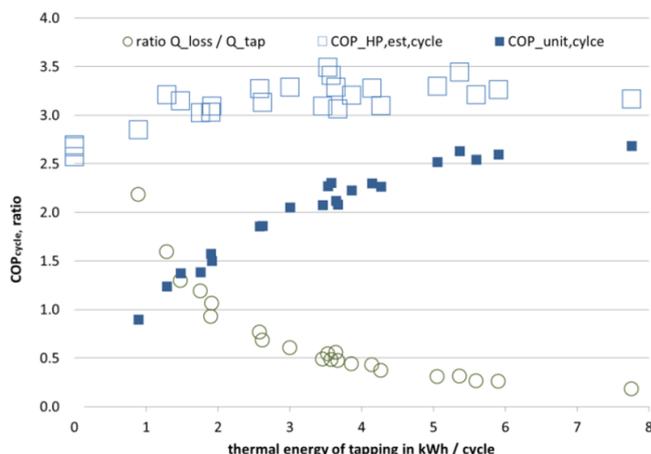


Schéma 6: COP de l'installation, cycle et COP pompe à chaleur, est, cycle de chaque cycle de pompe à chaleur

En outre, un COP fictif $COP_{pompe,est,cycle}$ est déterminé selon la formule suivante. Le $COP_{pompe,est,cycle}$ estime l'efficacité de la pompe à chaleur seule, et fait donc référence à la limite de bilan «fictive» (pas directement mesurable) lors du transfert de chaleur du condenseur au réservoir.

$$COP_{WP,est,Zyklus} = \frac{Q_{tab} + Q_{loss,est}}{E_{compressor} + E_{fan} + E_{controller}}$$

L'efficacité de la pompe à chaleur «avant réservoir» ($COP_{pompe,est,cycle}$) se situe entre 3,0 et 3,5 (voir Schéma 6); en dehors des jours durant lesquels très peu d'eau chaude est soutirée. Ces jours-là, avec une influence minimale de l'eau froide dans le réservoir, la température dans la zone inférieure du réservoir (à hauteur du condenseur) n'est pas autant réduite, avant le prochain fonctionnement de la pompe à chaleur, que lorsque de plus grandes quantités d'eau froide sont présentes. Ainsi, on obtient des conditions de températures plus favorables du côté du dissipateur thermique pour le fonctionnement de la pompe à chaleur après une «forte réduction du stockage» lors de la mise en opération.

Enfin, il convient encore de noter que la méthode utilisée pour déterminer les pertes de chaleur, et donc aussi le $COP_{pompe,est,cycle}$, est liée à des incertitudes importantes.

Fonction anti-légionelle

Pour trois des installations examinées, une fonction anti-légionelle est activée et le réservoir est chauffé une fois par semaine à 65 °C (installations 1 et 2) ou 67,5 °C (installation 4). Les différences de conception des installations et le concept de régulation des trois installations impliquent différentes caractéristiques opérationnelles de la fonction anti-légionelle. Trois aspects doivent être essentiellement mentionnés, aspects qui ont un impact significatif sur la consommation d'énergie causée par la fonction anti-légionelle, et qui diffèrent d'une installation à l'autre:

- Température de stockage au début du cycle anti-légionelle et température finale
- Volume de stockage chauffé au cours du cycle anti-légionelle

- Générateur de chaleur utilisé (élément chauffant et/ou pompe à chaleur)

Dans le cas de l'**installation 1**, le cycle anti-légionelle est lancé tous les lundis à 11h40. L'élément chauffant chauffe le réservoir à 65 °C. Pendant la période allant jusqu'à début décembre 2016, durant laquelle le «mode standard» était activé en début de matinée (à 8h40 ou 9h40), la pompe à chaleur est toujours en fonction lorsque l'élément chauffant est activé au début du cycle anti-légionelle (15 des 19 jours; voir Schéma 4). Par conséquent, l'élément chauffant remplace (inutilement) une partie de l'opération de la pompe à chaleur. Lorsque la pompe à chaleur cesse de fonctionner juste au début de la mise en marche de l'élément chauffant, ce dernier est en opération pendant environ 65 minutes et consomme environ 1,6 kWh_{el} pendant que l'eau est chauffée sur et autour de l'élément chauffant d'environ 12 K (TS2_58 % augmente de 54 °C à 66 °C). Les jours où la pompe à chaleur n'avait pas préalablement chauffé le réservoir jusqu'à atteindre la valeur cible, la durée de fonctionnement de l'élément chauffant était parfois nettement plus longue. Ainsi, la consommation totale d'énergie de l'élément chauffant était deux fois plus élevée au cours du cycle anti-légionelle pendant les mois de juillet à octobre 2016 que si un concept de régulation optimisé permettant d'activer le commutateur anti-légionelle directement après la fin de l'opération de la pompe à chaleur avait été mis en œuvre. Dans l'hypothèse d'⁴ un COP_{compresseur,ventilateur} de 2,7, le coefficient de performance de cette période d'évaluation pourrait être amélioré d'environ 6 %. Étant donné que la plage horaire du «mode standard» a été déplacée pendant la nuit en décembre, une autre caractéristique de la fonction anti-légionelle a été démontrée. Le fonctionnement de l'élément chauffant et celui de la pompe à chaleur ne se chevauchent désormais plus dans le temps. Cependant, les soutirages du matin et de la matinée ont lieu entre le déclenchement de la pompe à chaleur et l'activation de l'élément chauffant. Lors de la mise en marche de l'élément chauffant, la température de stockage TS2_58 % pour les trois installations était de 46 °C, 48 °C et 34 °C. Ainsi, la consommation d'énergie de l'élément chauffant était de 50 % et 100 % plus élevée que dans le cas d'une mise en marche de la fonction anti-légionelle directement après la fin du cycle de fonctionnement de la pompe à chaleur.

Pour l'**installation 2**, la fonction anti-légionelle est activée une fois par semaine à des heures différentes de la journée; respectivement 7 jours et entre 2 à 5 heures après le début du cycle anti-légionelle précédent (dans quelques cas, l'intervalle de temps est un peu plus court ou plus long que celui indiqué ici). Au début du cycle anti-légionelle, la pompe à chaleur est en opération tout comme l'élément chauffant; plus précisément, la pompe à chaleur est activée 2 minutes après l'élément chauffant. Tandis que l'élément chauffant est désactivé à 61 °C (TS3_62 %), la pompe à chaleur chauffe le réservoir jusqu'à 65 °C. La raison de ce concept opérationnel de la fonction anti-légionelle n'est pas évidente. L'élément chauffant fonctionne alors que la température de stockage est comprise dans une zone, qui peut également être utilisée par cette pompe à chaleur. De plus, il n'existe aucune raison évidente pour laquelle le réservoir devrait être chauffé rapidement. Dans l'hypothèse⁵ d'un COP_{compresseur,ventilateur} de 2,0,

⁴ La valeur fixée du COP tient compte de deux indices: la température du dissipateur de chaleur, disponible pendant le fonctionnement simultané de l'élément chauffant, et le COP déterminé (grossièrement) pour les périodes d'inactivité.

⁵ Cette valeur est une estimation du COP qui est établi selon les conditions de fonctionnement en vigueur pendant le fonctionnement simultané de l'élément chauffant.

le rendement pourrait être amélioré d'environ 6 % si l'élément chauffant n'était pas utilisé pendant le cycle anti-légionelle.

Contrairement aux autres installations, pour lesquelles le chauffage du réservoir dans le cadre de la fonction anti-légionelle n'a lieu que par le biais de l'élément chauffant, le réservoir est ici chauffé non seulement au niveau de la zone médiane et supérieure, mais également vers le bas, où se trouve le condenseur.

Dans le cas de l'**installation 4**, la fonction anti-légionelle est activée toutes les 160 heures (6 jours et 16 heures). L'élément chauffant réchauffe le réservoir de 12 K en moyenne à 66,5 °C (TS2_54 %). La pompe à chaleur ne fonctionne généralement pas en même temps (un chevauchement temporel se produit accidentellement sur 3 des 23 jours). La consommation d'énergie de l'élément chauffant se situe dans une fourchette de 2,1 kWh à 3,3 kWh, en fonction de la température du réservoir au début de la mise en service de l'élément chauffant. Étant donné que le «mode standard» est continuellement activé pour ces installations et que le capteur de contrôle est placé dans la zone inférieure du réservoir, la température lors du déclenchement du cycle anti-légionelle se situe entre 51 °C et 57 °C. Une comparaison avec l'installation 1 illustre l'impact des différences de volume du réservoir chauffé (voir Tableau 3). A cet effet, on prend en considération les cycles anti-légionelle de l'installation 1 qui ne présentent aucun chevauchement avec le fonctionnement de la pompe à chaleur, mais qui démarrent lorsque cette dernière s'est arrêtée peu de temps au préalable (max. 1 à 2 heures). L'augmentation de la température est en moyenne dans le même ordre de grandeur, la consommation d'énergie de l'installation 4 est par contre environ 60 % plus élevée en raison d'un volume de réservoir plus important.

Fonctionnement de l'élément chauffant en dehors du cycle anti-légionelle

Dans deux des quatre installations (installations 2 et 3), l'élément chauffant fonctionne également en dehors du cycle anti-légionelle.

L'élément chauffant est utilisé dans l'**installation 2** lorsque la température au niveau du capteur TS3_62 % diminue pendant le fonctionnement de la pompe à chaleur de 11 K à 12 K en dessous de la valeur cible de la pompe à chaleur (que ce soit suite à un soutirage ou à un refroidissement). Au cours de la période d'évaluation d'août à décembre 2016, ce cas s'est produit sept fois, et la consommation d'énergie électrique équivalait à moins de 1 % de l'énergie totale consommée par l'installation.

Dans le cas de l'**installation 3**, l'élément chauffant est en opération quotidiennement, le plus souvent pour une courte période de 12 à 18 minutes, un peu plus longtemps certains jours. Contexte: l'élément chauffant est toujours mis en marche 5 heures après la mise en action de la pompe à chaleur, ce qui correspond au début de la «plage horaire standard» (21h15). La plupart des jours, le fonctionnement de la pompe à chaleur prend fin avant la mise en route de l'élément chauffant (de quelques minutes à 3 heures). L'élément chauffant réchauffe le réservoir (en fonction de l'intervalle par rapport à la fin du fonctionnement de la pompe à chaleur) en moyenne de 1,7 K. La pompe à chaleur est encore en fonction pendant environ 10 % des jours, lorsque l'élément chauffant démarre, et les deux fonctionnent simultanément. Il n'existe aucune nécessité évidente pour cette approche réglementaire: la pompe à chaleur peut

réchauffer le réservoir pendant la nuit avec une durée de fonctionnement appropriée. On estime que l'amélioration de l'efficacité des installations pourrait être de l'ordre de 10 % si on évitait l'utilisation de cet élément chauffant.

Energie électrique, thermique et efficacité des installations

La section suivante décrit le coefficient de performance (déterminé sur la période d'août à novembre 2016) des quatre installations comparées les unes aux autres dans le contexte des facteurs étudiés ci-dessus. Au moment de la première période d'analyse, les données ne sont pas suffisantes pour toutes les installations afin d'évaluer le facteur de perte de chaleur spécifique aux installations (parfois pas de période de plusieurs jours sans soutirage). Par conséquent, une seule valeur UA de 3,2 W/K est ici définie pour visualiser l'ordre de grandeur des pertes de chaleur respectives. Celle-ci est basée sur l'analyse de l'installation 1. Lors de l'évaluation des températures présentées sur le Schéma 7, il convient d'observer que les capteurs ne sont pas tous situés à la même hauteur.

Le coefficient de performance de l'**installation 1** s'élève à 2,1, la valeur la plus élevée (meilleure) des installations étudiées. La consommation d'eau chaude des résidents est, avec une moyenne de 145 litres par jour, nettement supérieure à celle des autres bâtiments. En conséquence, l'effet de réduction d'efficacité de la perte de chaleur est nettement plus faible par rapport aux autres installations. Cependant, les pertes de chaleur correspondent toujours à environ un tiers de l'énergie de l'eau chaude soutirée. La température de stockage constitue un autre facteur d'influence sur l'efficacité, qui est un peu à fortement plus favorable pour cette installation par rapport aux autres. La grande quantité d'eau chaude soutirée, en association avec la répartition choisie du «mode standard» et du «mode off» pendant la journée, entraîne une diminution considérable de la température de stockage dans la partie inférieure et médiane. Ceci est favorable, d'une part, à l'efficacité du fonctionnement de la pompe à chaleur et, d'autre part, à la réduction des pertes de réserve. L'élément chauffant représente 20 % de la consommation totale d'énergie de l'installation.

Dans le cas de l'**installation 2**, l'indice de rendement pour la période d'évaluation est de 1,1. L'efficacité nettement diminuée en comparaison avec l'installation 1 est principalement due au volume de soutirage plus faible. La valeur moyenne du volume d'eau chaude soutiré quotidiennement est de 54 litres par jour, et donc de près de 40 % par rapport à l'installation 1. En conséquence, les pertes de chaleur sont probablement légèrement supérieures à l'énergie de l'eau chaude soutirée. En outre, des températures de stockage plus élevées sont enregistrées en moyenne en raison du volume de soutirage réduit, même si les températures maximales de stockage sont dans le même ordre de grandeur. Pour cette installation, la part de l'élément chauffant dans le total de la consommation d'énergie est, avec 12 %, la plus faible parmi les installations examinées sans intervention photovoltaïque.

Pour l'**installation 3**, l'indice de performance est de 1,4. En moyenne, le volume quotidien de soutirage correspond, avec 71 litres par jour, à environ la moitié de celui de l'installation 1 et est d'environ 30 % supérieur à celui de l'installation 2. Outre le comportement de l'utilisateur, l'installation 3 se différencie de l'installation 1 encore à d'autres égards. Ainsi, le réservoir est réchauffé à des températures plus élevées d'environ 5 K, ce qui a un effet réducteur sur

l'efficacité de l'installation. La part d'énergie électrique de l'élément chauffant atteint les 20 %, tout comme pour l'installation 1. Les raisons de fonctionnement de l'élément chauffant sont cependant différentes. Dans le cas de l'installation 3, la fonction anti-légionelle n'est pas activée; la consommation d'énergie est donc due au fonctionnement quotidien (apparemment superflu) de l'élément chauffant (voir explications ci-dessus).

Les utilisateurs de **l'installation 4** présentent les besoins en eau chaude les plus faibles, par rapport aux utilisateurs d'autres installations (en moyenne 37 litres par jour). Ceci est associé aux conséquences décrites ci-dessus d'un rapport défavorable entre l'énergie thermique utile et la perte d'énergie thermique. Un autre facteur de réduction de l'efficacité résulte du concept de régulation de cette installation (capteur de contrôle dans la partie inférieure du réservoir et valeur cible constante pendant toute la journée). Les températures de stockage dans la zone inférieure et médiane plus élevées par rapport aux autres installations entraînent une réduction de l'efficacité de la pompe à chaleur et une augmentation des pertes dans le réservoir.

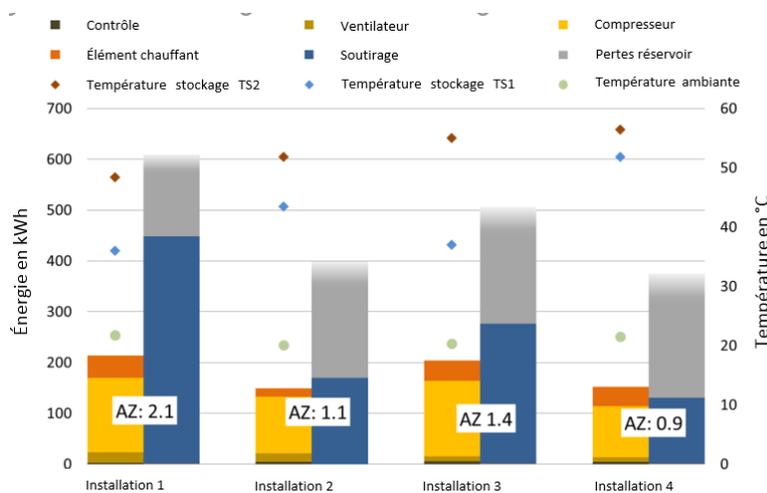


Schéma 7: Coefficient de performance, énergie thermique et électrique, et températures moyennes (période d'évaluation: 01/08/2016 - 30/11/2016)

Sources

- [1] Essai de terrain de cinq chauffe-eaux pompe à chaleur, rapport intermédiaire, Energie Suisse, Berne 2017 (seulement en allemand)
- [2] EN 16147 Heat pumps with electrically driven compressors - Testing and requirements for marking of domestic hot water units, EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, Bruxelles 2016