

Extraits du rapport final, octobre 2004

Analyse in situ d'installations de pompes à chaleur Anis 1996-2003

élaboré par

Markus Erb
Dr.EICHER+PAULI AG
Kasernenstrasse 21
4410 Liestal

Peter Hubacher
Hubacher Engineering
Tannenbergrasse 2
9032 Engelburg

Max Ehrbar
Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs
Werdenbergrasse 4
9471 Buchs

Mandant:

Office fédéral de l'énergie (OFEN), 3003 Berne, Section Energies renouvelables,

Domaine chaleur ambiante, cogénération, froid, représenté par
Fabrice Rognon

Pilotage du projet:

Madame Gaby Brugger, Présidente du GSP (jusqu'en 2001)

Fabrice Rognon, OFEN (depuis 2002)

Mandataires:

Dr.Eicher+Pauli AG, Kasernenstrasse 21, 4410 Liestal

Hubacher Engineering, Tannenbergrasse 2, 9032 Engelburg (Chef de projet)

Auteurs:

Markus Erb (markus.erb@eicher-pauli.ch)

Peter Hubacher (he-ko@bluewin.ch)

Max Ehrbar (ehrb@ntb.ch)

Groupe d'accompagnement:

Markus Real, Alpha Real AG (Direction)

Fabrice Rognon, OFEN

Max Ehrbar, Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs

Heinz Etter, Neukom Engineering AG

Emil Grüniger, Soltherm AG (jusqu'en 2001)

Marco Andreoli, CTA AG (depuis 2003)

Thomas Haldimann, Installateur

Peter Meyer, Meyer Energietechnik AG

Christoph Wehrli WPZ (jusqu'en 2001)

Wolfgang Rogg, WPZ (de 2002 à 2003)

Analyse in situ d'installations de pompes à chaleur - Anis

Résumé du rapport final, octobre 2004

Distribution: no d'article ENET 240017. Pour le rapport complet: 240016

La présente étude a été menée dans le cadre du programme chaleur ambiante, utilisation des rejets de chaleur, couplage chaleur-force de l'Office fédéral de l'énergie OFEN. Seul/e le/la mandataire répond de son contenu.

SuisseEnergie

Office fédéral de l'énergie OFEN, Worblentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen Adresse postale: CH-3003 Berne

Tél. 031 322 56 11, fax 031 323 25 00 · office@bfe.admin.ch · www.suisse-energie.ch

Table des matières

TABLE DES MATIÈRES	4
1. INTRODUCTION.....	I
2. OBJECTIFS ET PROCÉDURE	II
2.1 Critères de sélection des installations	1
2.2 Méthode de mesure	3
2.2.1 Mesures de longue durée	3
2.2.2 Enquête auprès des utilisateurs	4
2.3 Définitions et modèle	5
2.3.1 Période de chauffage	5
2.3.2 Température extérieure	5
2.3.3 Coefficient de performance et coefficient de performance annuel	5
3. VUE D'ENSEMBLE DES INSTALLATIONS	7
3.1 Bâtiments	7
3.2 Types d'installation	8
4. RÉSULTATS ET RECOMMANDATIONS	9
5. BIBLIOGRAPHIE	15
6. RÉPERTOIRE DES SYMBOLES ET GLOSSAIRE.....	16

1. Introduction

La présente publication (no d'article ENET 240017) constitue un extrait du rapport complet d'avril 2004 (no d'article ENET 240016). La numérotation des figures est restée comme dans le rapport final, ce qui explique les sauts entre les illustrations. Ainsi le lecteur peut les retrouver plus facilement dans la version intégrale.

Par contre, les chapitres ont été numérotés à neuf pour assurer une lecture plus fluide et une table des matières cohérente.

Les publications sur le projet Anis sont aussi disponibles auprès du groupement promotionnel des pompes à chaleur sous www.pac.ch.

L'équipe d'Anis aimerait remercier ici tous ceux qui ont contribué, d'une manière ou d'une autre, à la réussite de ce projet. Nous pensons en particulier aux propriétaires d'installations de pompes à chaleur qui ont relevé avec enthousiasme, et une grande persévérance, les données d'exploitation de leurs installations. Ces données constituent le fondement même du projet et revêtent donc une valeur inestimable.

2. Objectifs et procédure

Objectifs

À l'origine, l'objectif d'Anis (analyse in situ d'installations de pompes à chaleur) était de documenter sur site, à l'aide de méthodes statistiques, l'efficacité énergétique de petites pompes à chaleur d'une puissance thermique de 20 kW_{th} au maximum et d'identifier les potentiels d'amélioration. L'Office fédéral de l'énergie avait lancé ce projet en 1996 comme mesure d'accompagnement de la stratégie de promotion des pompes à chaleur.

Au cours du projet Anis, on a vu qu'il était possible, avec les données relevées, d'effectuer des analyses plus approfondies du comportement des installations sur une période relativement longue et d'établir des recommandations pour leur conception.

Anis décrit et analyse ainsi la réalité actuelle sur le terrain et donne des indications pour la planification. En raison du caractère statique des données, les résultats de cette analyse ne peuvent pas être considérés comme des règles de planification valables dans tous les cas.

Anis a donc pour objectif de présenter des données statistiques fiables sur la qualité in situ des installations de pompes à chaleur exploitées en Suisse d'une puissance thermique de 20 kW_{th} au maximum, notamment sur leur évolution au fil des ans. Par ailleurs, elle étudie tout paramètre pouvant provoquer des différences entre les installations, respectivement entre les catégories d'installations.

La méthode fondamentale consiste à enregistrer le plus d'installations possibles en relevant des données énergétiques et techniques. Tous les ans, 30 nouvelles installations de pompes à chaleur ont été intégrées au projet afin d'identifier les modifications technologiques apportées ces dernières années. Les installations font partie de l'échantillon aussi longtemps que leurs exploitants sont prêts à relever périodiquement les compteurs installés (cf. ci-dessous). Le nombre d'installations étudiées augmente donc d'année en année.

Procédure

Depuis le début du projet, 30 nouvelles installations venant d'être montées ont été intégrées dans Anis chaque année, les années 1994 et 1995 ayant été enregistrées rétroactivement.

Des coefficients de performance annuels (COPA) sont aujourd'hui disponibles pour 221 installations sur un total de 236. Celles-ci se répartissent en environ 45% d'installations air/eau et 45% d'installations sol/eau, le solde étant constitué d'installations eau/eau et d'installations à réseau de capteurs enterrés, pour lesquelles il n'est pas possible de tirer des conclusions statistiques sûres. À ce jour, 1,3 million d'heures d'exploitation, soient 740 années d'exploitation, ont été enregistrées. Anis peut ainsi être qualifiée d'enquête qualité sur un système de chaleur la plus importante et la mieux documentée au monde.

Les calculs COPA reposent sur le relevé des compteurs électriques et des compteurs de chaleur par les propriétaires des installations. Outre les quantités d'énergie, on a aussi étudié les températures des systèmes dans la moitié des installations. Sur cette base, on a également vérifié dans quelle mesure les groupes réels différaient, en ce qui concerne les coefficients de performance et la production de chaleur, des données calculées lors d'un éventuel contrôle selon la norme EN 255 (Centre de test de pompes à chaleur), respectivement des indications du fabricant.

2.1 Critères de sélection des installations

Au début du projet, il n'existait aucune donnée sur la répartition statistique (écart type) des coefficients de performance annuels (COPA) sur le terrain. Il n'était par conséquent pas possible de déterminer combien d'installations étaient nécessaires pour obtenir, par exemple, une valeur moyenne des COPA par année avec un intervalle de confiance donné (CI, cf. [chap. 6](#)). Le nombre d'installations intégrées chaque année dans le projet a été fixé à 30, notamment en raison des contraintes budgétaires.

Lors de la sélection concrète des installations, on essaie de remplir le plus grand nombre possible de critères suivants:

Puissance thermique

Les installations de pompes à chaleur devraient avoir une puissance thermique d'au maximum 20 kW_{th}. En effet, c'est cette catégorie d'installations qui est la plus fréquente sur le marché.

Sources de chaleur

Installations air/eau, sol/eau ou eau/eau. Cependant, conformément au marché, la priorité est donnée à l'air, puis au sol.

Mode de production

Appareils de série, sans équipements spéciaux.

Mode d'exploitation

Monovalent, monoénergie ou bivalent avec production de chaleur secondaire enregistrable.

Implantation

Différentes situations géographiques.

Objets

Les installations se trouvent dans des nouvelles constructions ou dans des bâtiments rénovés. Un bâtiment est qualifié de rénové lorsqu'il est plus ancien que l'installation de la pompe à chaleur, ce qui signifie qu'elle a remplacé une autre installation.

Eau chaude sanitaire

La proportion d'installations avec production d'eau chaude sanitaire au moyen d'une PAC doit correspondre à la proportion effective de systèmes de ce genre en exploitation.

Rapport de propriété

Seules les installations privées sont prises en considération, pas les publiques.

Contrôle

Les groupes des pompes à chaleur sont, autant que possible, testés selon la norme européenne EN 255.

Équipement

Les installations sont, si possible, déjà équipées de compteurs électriques et de compteurs de chaleur de manière à ce que la consommation d'électricité et la quantité de chaleur produite par la PAC soient enregistrés. Autrement, les installations doivent pouvoir être équipées à peu de frais.

Raccordement hydraulique

Les groupes des pompes à chaleur sont en général raccordés de manière hydraulique, une méthode qui a fait ses preuves.

Un critère très important est la source de chaleur, donc l'air, le sous-sol (saumure) et l'eau. Au cours du projet, on a constaté qu'il est impossible, avec un échantillon de 30 installations par année, de tirer des conclusions statistiques valables sur les coefficients de performance annuels pour les trois catégories d'installations. Le groupe d'accompagnement a par conséquent décidé fin 2000 de ne plus intégrer de nouveaux systèmes eau/eau et de nouveaux systèmes avec réseau de capteurs terrestres dans le programme de mesure car ces derniers ne représentent en Suisse qu'une très petite part de marché. À partir de là, on a choisi chaque année 15 installations air/eau et 15 installations sol/eau. Aujourd'hui, nous savons aussi que la répartition des COPA des installations sol est bien plus dispersée que celle des installations air. L'illustration 1 présente la situation observée par Anis pour les installations air/eau et pour les installations sol/eau. Par exemple, pour atteindre un IC des COPA de $\pm 10\%$ ($\pm 5\%$) pour chaque année, il faudrait intégrer tous les ans 9 (35) installations air/eau et 14 (55) installations sol/eau dans le programme. C'est pourquoi, dans la perspective d'une poursuite d'Anis, la part des installations air/eau est réduite au profit de celle des installations sol/eau.

Taille des échantillons versus intervalle de confiance COPA

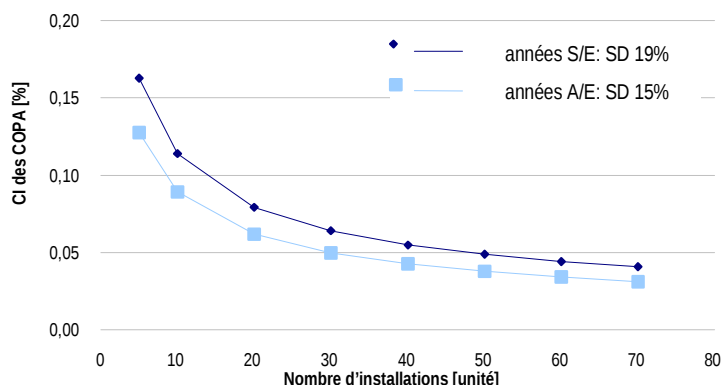


Illustration 1: Selon l'écart type (SD, cf. [chap. 6](#)) et l'interval de confiance voulu (IC), la taille des échantillons nécessaire varie considérablement.

2.2 Méthode de mesure

Pour les installations sélectionnées dans le cadre d'Anis, on relève dans un premier temps toutes les données des installations pertinentes pour le projet. Par là, on entend tous les paramètres qui ne varient pas pendant leur fonctionnement ou qui ne varient qu'avec des manipulations (p. ex. réglage de la régulation). Elles comprennent, d'une part, le bâtiment chauffé par la pompe à chaleur et, d'autre part, l'installation de pompe à chaleur proprement dite.

2.2.1 Mesures de longue durée

Pour effectuer le relevé des données de fonctionnement sur l'ensemble de la période pendant laquelle l'installation est intégrée au projet Anis, les installations sont équipées des compteurs décrits ci-dessous, qui sont relevés par les maîtres d'ouvrage idéalement toutes les semaines, mais parfois aussi seulement toutes les trois à quatre semaines.

Consommation d'électricité: un compteur électrique enregistre la consommation d'électricité de l'installation de pompe à chaleur. Selon les limites du système, la quantité d'énergie relevée est corrigée mathématiquement. Par exemple, si le compteur inclut un chauffage d'appoint électrique, sa consommation peut être calculée avec la puissance du raccordement et sa durée de fonctionnement et, si nécessaire (limites du système), déduite.

Appareils de mesure: on utilise des compteurs à induction Ferraris de la classe de précision 2 (non étalonnés) avec une imprécision de mesure de $\pm 2\%$ mais aussi des compteurs à induction modernes (Electrex, Ulrich Matter AG) avec une imprécision de mesure de $\pm 0,5\%$.

Production de chaleur: un compteur de chaleur (appareil à ultrason) enregistre la quantité de chaleur produite par la pompe à chaleur. Lorsqu'il y a un accumulateur et la place nécessaire, le compteur de chaleur est installé entre la pompe à chaleur et l'accumulateur. On procède à des corrections mathématiques relatives aux limites du système déterminées comme indiqué pour les compteurs électriques.

Appareils de mesure: à peu d'exceptions près, on utilise des compteurs de chaleur qui mesurent le débit avec un capteur à ultrasons. Les sondes de température sont placées directement dans le fluide (pas de douille d'immersion). Outre la quantité de chaleur, les compteurs de chaleur indiquent aussi le débit volumique au niveau du condenseur. Dans 75% des cas, les compteurs de chaleur ont été fournis et installés par Anis, qui a utilisé des appareils Neovac (Siemens) des séries 2WR3 à 2WR5. Ils ont été choisis car la perte de charge qu'ils provoquent ne réduit pas de manière significative le débit volumique. L'imprécision de mesure de ces compteurs est, d'après les calculs d'erreur, de maximum $\pm 2,2\%$.

Durée de fonctionnement et démarrage: lorsqu'ils ne sont pas déjà enregistrés par la régulation de la pompe à chaleur, la durée de fonctionnement et le nombre de démarrages du compresseur sont relevés par l'intermédiaire d'un compteur mécanique. Pour les installations avec deux compresseurs, ceux-ci sont enregistrés séparément.

Appareils de mesure: on utilise des appareils analogiques d'EHS Schaffhouse (type 920) qui se composent d'un compteur temporel et d'un compteur à impulsions. Il n'existe aucune indication sur l'imprécision des mesures.

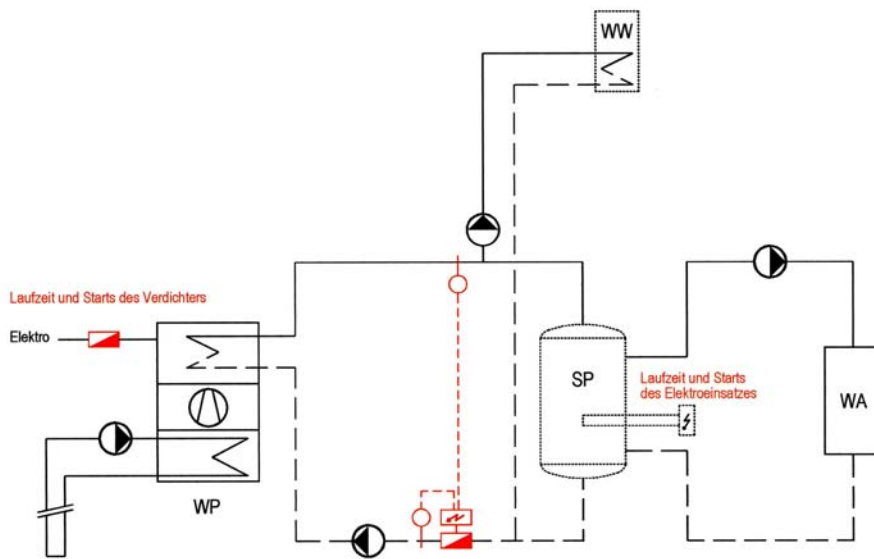


Illustration 2: Schéma de mesure Anis pour l'étude de longue durée. Les exploitants des installations relèvent périodiquement les compteurs de chaleur, les compteurs électriques, les durées de fonctionnement et le nombre de démarrages.

2.2.2 Enquête auprès des utilisateurs

Un premier sondage avait été réalisé par le bureau de marketing MKR Consulting AG, Berne, en collaboration avec Polyquest AG, Berne. Il s'agissait d'identifier la place de la pompe à chaleur dans le marché du chauffage en général. Le public cible était composé d'exploitants de pompes à chaleur installées dans des nouveaux bâtiments ou après coup, lors d'une rénovation. Deux discussions de groupe, de chacune deux heures avec 18 participants, ont eu lieu en 1996 pour définir les informations qualitatives nécessaires.

Un questionnaire pour un sondage par téléphone représentatif a été élaboré sur la base des conclusions des discussions de groupe mentionnées ci-dessus. La taille de l'échantillon pour ce sondage représentatif était de 218 interviews. 113 personnes qui avaient directement installé une pompe à chaleur lors de la construction de leur maison et 105 personnes qui avaient remplacé leur système de chauffage par une pompe à chaleur lors d'une rénovation ont été interrogées. Ce sondage a été effectué en 1997.

Quelques années plus tard, on a profité du contrôle des instruments de mesure (notamment des compteurs de chaleur) pour poser aux propriétaires des installations quelques questions sur leur pompe à chaleur, son fonctionnement, sa fonction et sa puissance ainsi que sur leur satisfaction. Pour neuf questions, il était possible de choisir deux ou trois réponses succinctes et ciblées. La dixième question concernait les éventuelles pannes ainsi que leur réparation. Les propriétaires avaient été sélectionnés en raison d'une action de contrôle des compteurs de chaleur, seules les installations les plus anciennes (année de construction < 1998) ayant été retenues.

2.3 Définitions et modèle

2.3.1 Période de chauffage

La période de chauffage utilisée par Anis commence le 1^{er} octobre et se termine le 30 avril. Cette période a été choisie car, d'une part, elle couvre la majeure partie des jours de chauffage (de locaux) et, d'autre part, parce que les jours sans chauffage y sont très rares. Ainsi, on peut exclure dans une large mesure des périodes (points de données) dans lesquelles la consommation d'énergie auxiliaire (pompe de distribution) et les pertes d'accumulation prédominent.

2.3.2 Température extérieure

La température extérieure moyenne entre deux relevés par les maîtres d'ouvrage est calculée sur la base des données de la station météorologique la plus proche. Pour ce faire, on effectue une correction relative à la différence d'altitude entre l'objet concerné et la station météorologique en comptant -0.5 K par 100 m de dénivelé.

2.3.3 Coefficient de performance et coefficient de performance annuel

Le coefficient de performance (COP) est le rapport entre la quantité de chaleur produite et la quantité d'électricité consommée pendant un intervalle de temps donné. Lorsque ce rapport est calculé pour une année, la valeur trouvée s'appelle coefficient de performance annuel (COPA). Pour Anis, on a défini trois limites de systèmes, correspondant à trois COP ou COPA.

COPA 1 Rapport entre la quantité de chaleur produite par la PAC, sans les pertes d'accumulation (pour autant qu'elles existent) et les besoins en électricité spécifiques à la PAC, y compris les groupes auxiliaires tels que les pompes de circulation et le chauffage du carter. Côté distribution, on enregistre seulement la consommation d'électricité pour compenser la perte de pression par le condenseur (débit volume selon mesure du compteur de chaleur). Concrètement, pour les installations avec accumulateur branché en parallèle, on tient compte intégralement de la consommation d'électricité de la pompe de charge. Pour les autres installations, la consommation d'électricité des pompes du condenseur est estimée à l'aide de sa courbe caractéristique de perte de pression, du débit volume réel et du degré d'efficacité supposé de la pompe (15%).

COPA 2 Rapport entre la quantité de chaleur produite par la PAC, resp. à partir de l'accumulateur (pour autant qu'il existe) et les besoins en électricité spécifiques à la PAC, y compris les groupes auxiliaires tels que les pompes de circulation (côté distribution seulement perte de pression par le condenseur) et le chauffage du carter. Pour les installations sans accumulateur, le COPA 1 correspond donc au COPA 2.

COPA 3 Rapport entre la quantité de chaleur produite par la PAC resp. à partir de l'accumulateur (pour autant qu'il existe) y compris les chauffages électriques d'appoint (pour le chauffage des locaux et la production d'eau chaude sanitaire, cette dernière seulement si cette possibilité est intégrée à l'installation PAC) et les besoins en électricité spécifiques à la PAC, y compris tous les groupes auxiliaires tels que les pompes de circulation (total) et le chauffage du carter.

Les dépouillements actuels se font sur la base du COPA 2. Seules les valeurs de planification reposent sur les limites de systèmes du COPA 1.

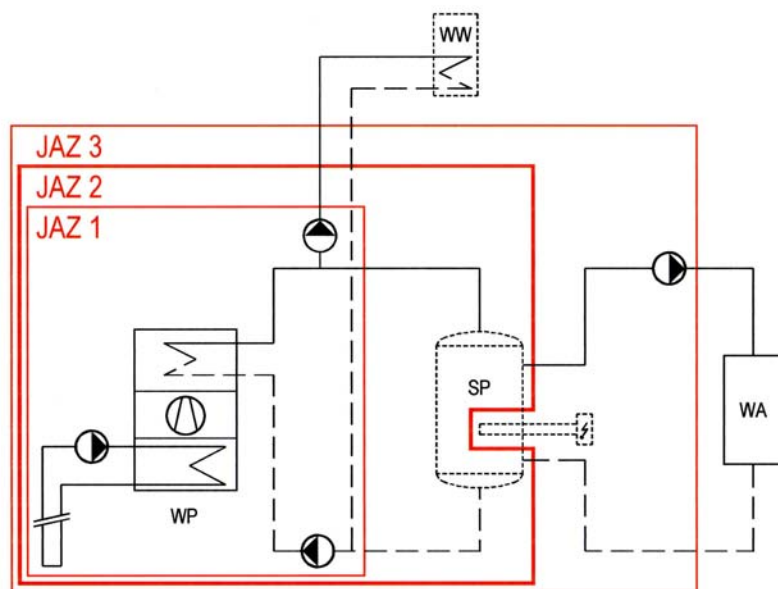


Illustration 6: Limites de systèmes utilisées par Anis pour calculer les COPA 1, 2 et 3. Dans la plupart des cas, on utilise le COPA 2 qui prend en compte d'éventuelles pertes d'accumulation. Pour les installations sans accumulateur, la consommation d'électricité des pompes de circulation coté distribution est prise en considération avec la perte de pression par le condenseur dans le COPA 1 et le COPA 2.

3. Vue d'ensemble des installations

3.1 Bâtiments

Les 236 installations étudiées actuellement par Anis se trouvent à 60% dans des nouvelles constructions et à 40% dans des bâtiments rénovés, la part de ces derniers ayant été choisie afin qu'il y ait suffisamment d'installations dans cette catégorie pour pouvoir tirer des conclusions statistiques sûres.

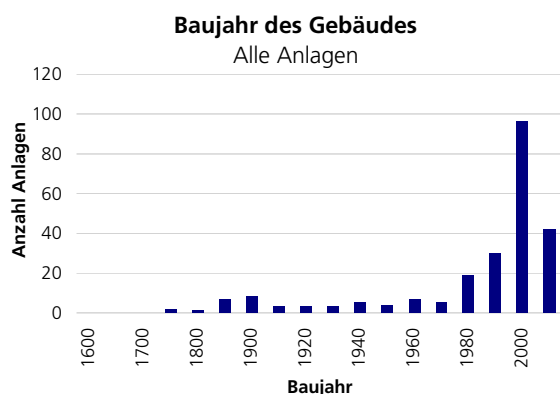


Illustration 21: Répartition par année de construction du bâtiment de toutes les installations analysées dans Anis.

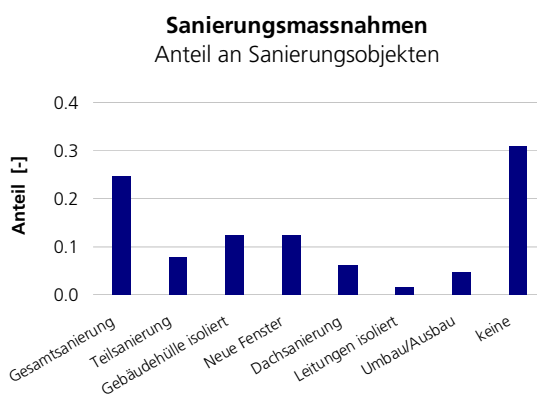


Illustration 22: part des différentes mesures de rénovation. De gauche à droite: rénovation totale, rénovation partielle, isolation de l'enveloppe, nouvelles fenêtres, isolation du toit, isolation des conduites, rénovation/extension, aucune.

Pour les bâtiments rénovés, il faut relever que la moitié d'entre eux ont été construits après 1970 et que des mesures d'assainissement énergétique ont été prises dans 70% de ces bâtiments. Dans 25% des cas, le bâtiment a même fait l'objet d'un assainissement intégral avant l'installation de la pompe à chaleur.

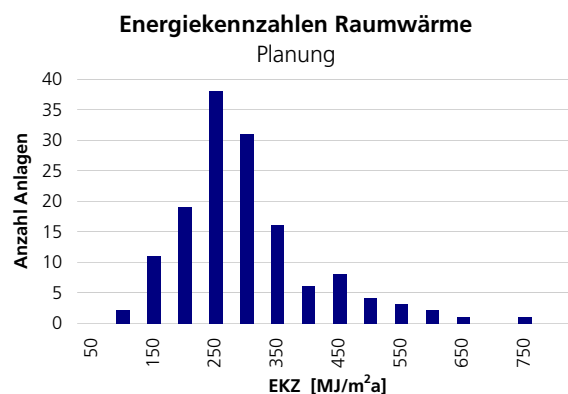


Illustration 23: répartition de l'indice énergétique de chauffage IDE (EKZ en allemand) en MJ/m²a, de toutes les installations, valeurs de planification.

Les valeurs de planification des indices énergétiques (IDE) des objets étudiés sont réparties dans un large spectre. Elles sont de l'ordre de 270 MJ/m² en moyenne (écart type 40%).

Dans Anis, les objets rénovés et les nouvelles constructions présentent de nettes différences en ce qui concerne le type de système de distribution. Les nouvelles constructions ont dans 92% des cas un chauffage au sol, qui est complété en partie par des radiateurs. Pour les bâtiments rénovés, la part de systèmes de chauffage au sol est d'environ 53%.

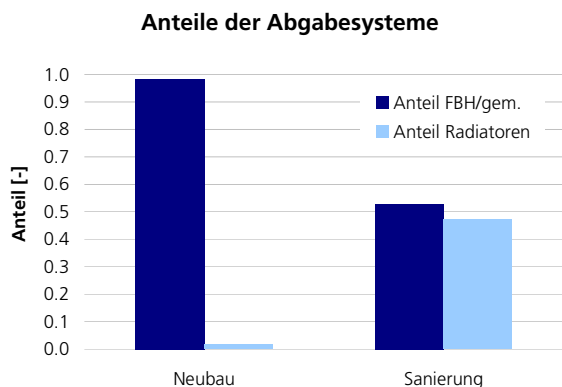


Illustration 24: Répartition des installations par type de distribution du chauffage.

FBH = chauffage de sol, Radiatoren = radiateurs, Neubau = construction neuve, Sanierung = rénovation).

Les nouvelles constructions ont presque exclusivement des chauffages au sol ou des systèmes mixtes alors que dans les objets rénovés, il existe un chauffage uniquement par radiateurs dans presque la moitié des cas.

3.2 Types d'installation

Aujourd'hui, les coefficients de performances annuels de 221 installations sont disponibles. Ces installations se répartissent comme suit: 105 PAC air/eau (AW), 94 PAC sol/eau (SW), 10 PAC eau/eau (WW), 8 PAC avec réseau de capteurs terrestres/eau, 3 PAC avec pieux énergétiques et une installation avec évaporateur direct.

Dans 50% des cas, la pompe à chaleur participe à la production d'eau chaude sanitaire. Dans 22%, l'eau chaude sanitaire est chauffée uniquement par l'intermédiaire de la pompe à chaleur. Les autres installations (50%) ont un chauffe-eau séparé.

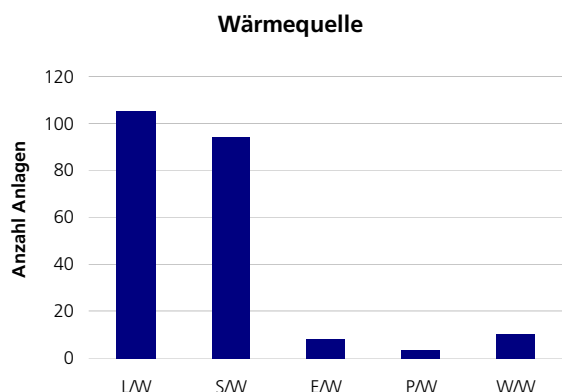


Illustration 25: Répartition des installations par source de chaleur ambiante.

LW: air/eau; SW: sonde géothermique/eau; EW: réseau de capteurs terrestres horizontaux/eau; PW: pieux énergétiques/eau; WW: eau/eau

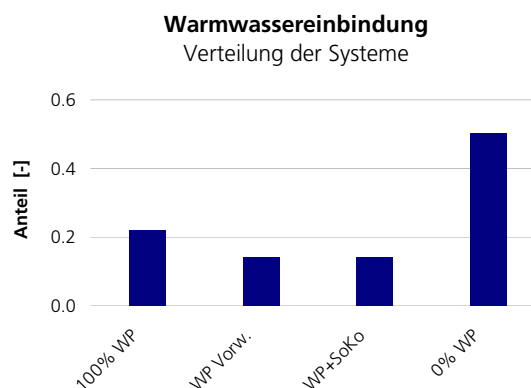


Illustration 26: Parts des différents systèmes pour produire de l'eau chaude sanitaire (ECS ou WW en allemand).

100% PAC: l'ECS est chauffée seulement avec la PAC;
PAC préch. (Vorw.): la PAC préchauffe l'ECS;
PAC+CapSo (SoKo): combinaison de PAC et de capteurs solaires;
0% PAC: l'ECS est chauffée à 100% par le chauffe-eau électrique.

4. Résultats et recommandations

Objets et températures de départ

Les installations dans de nouvelles constructions ou celles montées lors de travaux de rénovation se distinguent seulement par les températures de départ en ce qui concerne les valeurs relatives aux COPA. En moyenne, ces dernières sont plus élevées de 5K pour les installations montées lors d'une rénovation, par conséquent les COPA sont inférieurs de 9%.

Au point de dimensionnement, les valeurs de planification et les valeurs mesurées de la température de départ se recoupent bien. Cependant, on a trouvé deux éléments importants indiquant des potentiels d'optimisation. Tous deux concernent la planification. Il a été constaté que les indices de dépense d'énergie ou « indices énergétiques » des objets n'étaient pas corrélés avec les températures de départ correspondantes. Un indice énergétique bas permettrait cependant souvent des températures de départ moins élevées. Or, il n'en est guère tenu compte lors de la planification. Par ailleurs, on a découvert que les températures de départ réglées sur la régulation (courbes de chauffage) correspondaient certes bien aux valeurs de planification, mais qu'elles étaient fréquemment supérieures à la valeur réellement nécessaire.

CONSTATATION

Il existe un potentiel d'optimisation énergétique considérable lors du dimensionnement du système de distribution.
Les courbes de chauffage réglées pour les installations sol/eau sont souvent, dans la présente étude, supérieures au niveau nécessaire en technique de chauffage, ce qui présente des désavantages en termes énergétiques.

RECOMMANDATION

La température de départ influence beaucoup l'efficacité énergétique d'une installation, c'est pourquoi elle devrait être prévue la plus basse possible. Il faut aussi tenir compte des exigences du client en matière de confort (température à la surface supérieure du sol).
Pour de nombreuses installations étudiées, une amélioration énergétique peut facilement être obtenue par un réglage adéquat de la régulation.

Evolution COPA

Les installations sol/eau se situent, avec un COPA moyen de 3,5, 32% au-dessus de la valeur des installations air/eau qui est de 2,7. Il a aussi été constaté, en raison des performances très différentes des sondes géothermiques, que les COPA des installations sol/eau sont beaucoup plus dispersés que ceux des installations air/eau. Les deux groupes présentent des améliorations d'env. 15% depuis 1994/95. Les coefficients de performance annuels estimés du parc d'installations suisses, qui sont de 59% pour les installations air/eau et de 41% pour les installations sol/eau, ont enregistré depuis le début du projet une augmentation de 20%, passant de 2,5 à 3,0. Cette hausse recoupe très bien les résultats du Centre de test de pompes à chaleur (Töss). Le résultat d'Anis montrant que les COPA n'ont pratiquement pas changé depuis 1999 correspond aussi aux données du Centre de test.

CONSTATATION	Les COPA moyens des installations mesurées s'améliorent au fil des ans. Les évolutions constatées au Centre de test de pompes à chaleur se retrouvent également dans l'exploitation sur le terrain. Les améliorations mesurées in situ sont principalement dues à de meilleures machines.
--------------	---

Satisfaction des clients

Lors d'une enquête réalisée en 1997, 78% des propriétaires de pompes à chaleur (PAC) interrogés étaient très contents de leur installation, 17% étaient assez contents, seuls 3% émettaient des réserves et 2% n'étaient pas du tout contents. Ce résultat réjouissant dans l'ensemble est sûrement lié au haut degré de disponibilité des installations, qui se monte à 99,5%, comme l'a constaté Anis.

CONSTATATION	Les installations de pompes à chaleur tombent très très peu en panne. Ce sont les installations sol/eau et les installations sans accumulateur technique qui ont le moins de pannes.
--------------	--

Vieillessement

De même, les installations vieillissent bien mieux qu'on le pensait. Pendant les huit années de fonctionnement analysées, aucune réduction significative des COPA n'a pu être constatée, que ce soit pour les installations air/eau ou les installations sol/eau.

CONSTATATION	En huit ans de mesures, il n'a été constaté à ce jour aucune détérioration des COPA. On ne peut donc pas parler jusqu'ici d'obstruction de l'évaporateur et de refroidissement des sondes géothermiques.
--------------	--

Régulateur

Les installations équipées d'une régulation avec compensation de la température ambiante présentent des résultats supérieurs à la moyenne. L'effet positif de quelque 8% constaté sur les COPA peut être expliqué au maximum pour moitié par la compensation des charges externes (p. ex. temps ensoleillé). C'est pourquoi il faut supposer que les régulations ont corrigé les courbes de chauffage qui avaient été réglées trop haut dans un premier temps.

CONSTATATION	Des régulations avec compensation de la température ambiante induisent des températures de départ plus basses et, par conséquent, des économies d'énergie sans réduire le confort.
RECOMMANDATION	Il est recommandé d'utiliser des régulations tenant compte de la température ambiante des locaux chauffés.

Chauffages d'appoint

L'exploitation réelle d'installations air/eau a montré que les chauffages d'appoint électriques n'étaient pas nécessaires pour un fonctionnement normal du chauffage. Ainsi, même en cas de températures extérieures basses, la pompe à chaleur peut couvrir tous les besoins thermiques. Cependant, des chauffages d'appoint électriques peuvent être utiles pour la mise en service et pour le séchage du bâtiment. Sur la base des charges mesurées pour les conditions au point de dimensionnement, on doit constater dans la présente étude que les groupes sol/eau sont souvent surdimensionnés, ce qui présente surtout des désavantages économiques.

CONSTATATION	Sur le Plateau suisse (Mittelland), on peut sans problème exploiter des PAC air/eau monovalentes. Un fonctionnement normal du chauffage ne nécessite aucun chauffage d'appoint électrique. Un corps de chauffe électrique peut être utile pour la mise en service et le séchage du bâtiment. On prévoit souvent des PAC sol/eau surdimensionnées, ce qui a des répercussions négatives sur les coûts.
RECOMMANDATION	Éviter les marges de sécurité, les réserves de puissance lors du dimensionnement de PAC sol/eau.

Intégration de la production d'eau chaude sanitaire

Anis montre qu'intégrer la production d'eau chaude sanitaire présente des avantages énergétiques et écologiques considérables par rapport aux chauffe-eau électriques. Des différences notables ont pu être constatées aussi en ce qui concerne les différentes manières d'intégrer la production d'eau chaude sanitaire. La meilleure efficacité énergétique est obtenue avec un chauffe-eau séparé avec échangeur de chaleur interne, juste dimensionné pour couvrir les besoins d'une journée.

CONSTATATION	Produire de l'eau chaude sanitaire avec une pompe à chaleur présente des avantages énergétiques et écologiques considérables par rapport aux chauffe-eau électriques.
RECOMMANDATION	Intégrer la production d'eau chaude sanitaire dans l'installation PAC. La meilleure solution, qui a fait ses preuves, est un chauffe-eau simple avec échangeur de chaleur interne. N'utiliser des accumulateurs combinés qu'avec une autre source d'énergie (soleil, bois).

Accumulateurs techniques

Les accumulateurs techniques n'ont aucun effet positif sur les COPA. Par contre, ils sont chers, prennent de la place et compliquent les installations. C'est pourquoi ils ne devraient être utilisés que là où ils sont vraiment nécessaires.

CONSTATATION	Les accumulateurs techniques n'influencent pas les COPA.
RECOMMANDATION	Les accumulateurs techniques renchérissent et compliquent les installations. Ne les utiliser que lorsqu'ils sont vraiment nécessaires.

Sondes géothermiques

Comme nous l'avons déjà mentionné, on a constaté que les installations sol/eau présentent des COPA très différents. La supposition que ces différences proviennent principalement des caractéristiques très diverses du système partiel complexe sous-sol – sondes géothermiques – circuits des sondes géothermiques s'est confirmée. Les températures de la saumure mesurées se situent certes en moyenne avec un petit 5°C dans la bonne fourchette, cependant les écarts entre elles (leur dispersion) sont très importants. Les températures de la saumure mesurées ne peuvent être expliquées que partiellement par les données géologiques. Il ne s'est pas confirmé que la règle générale utilisée aujourd'hui pour le dimensionnement des sondes de 50 W/m assure un bon résultat. Comme valeur pour le dimensionnement, il vaudrait mieux prendre l'énergie extraite annuellement par longueur de sonde.

Un grand potentiel d'optimisation, relativement simple à obtenir, a été identifié dans les pompes de circulation du circuit de saumure. Le surdimensionnement des pompes de saumure a des répercussions très négatives sur les COPA des installations sol.

CONSTATATION	Les pompes à chaleur sol/eau sont fréquemment surdimensionnées. Si la sonde géothermique est dimensionnée selon la puissance de la pompe à chaleur, elle est aussi souvent trop longue. La température de la saumure dépend de différents facteurs, dans la présente étude de facteurs géologiques. Comme aucune information détaillée n'est disponible à ce sujet, il existe un potentiel d'incertitudes considérable. Les pompes du circuit de saumure sont souvent surdimensionnées, ce qui a une influence négative sur l'efficacité énergétique des installations.
RECOMMANDATION	Seul un dimensionnement de la sonde géothermique adapté aux besoins permet d'obtenir un résultat économique et énergétique optimal. Les entreprises de forage devraient s'engager davantage au moment du dimensionnement. Veiller à un dimensionnement approprié de la pompe du circuit de saumure.

Groupes des pompes à chaleur (machines seules)

L'analyse de la qualité énergétique des groupes des pompes à chaleur sur site a donné un résultat très réjouissant. Sur la base des mesures effectuées lors des essais, on avait fait des prévisions sur le coefficient de performance des machines sol/eau et comparé ces dernières avec les mesures effectuées sur le terrain. Ces calculs montrent en moyenne un écart de seulement -4% par rapport aux valeurs du banc d'essai, ce qui confirme que les améliorations des groupes des pompes à chaleur constatées au Centre de test influencent directement l'efficacité énergétique des installations. Il est ainsi prouvé que les machines soumises au Centre de test correspondent à un produit moyen de la série de fabrication du fabricant.

CONSTATATION	En exploitation réelle, l'efficacité énergétique des groupes des pompes à chaleur correspond à celle à laquelle on peut s'attendre avec les mesures effectuées au banc d'essai (Centre de test de pompes à chaleur ou indications du fabricant).
--------------	--

Avenir d'Anis

Anis se poursuivra avec un champ d'action réduit. Faute de moyens, il n'est plus possible d'intégrer de nouvelles installations tous les ans. C'est la raison pour laquelle les activités se concentreront sur l'enregistrement des données du parc d'installations existant dans le but d'étudier de manière approfondie le vieillissement et la durée de vie des pompes à chaleur.

5. Bibliographie

- [1] Rognon, S. (Hrsg.). 1999. *Wärmepumpen – heute und morgen*. Tagung des Forschungsprogramms Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW) des Bundesamt für Energie, Bern. ENET-Art. Nr. 30931.
- [2] Gabathuler, H.R.; H. Mayer, T. Afjei. 2002. *Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen; Teil 1: STASCH-Planungshilfen*. Bundesamt für Energie, Bern. ENET-Nr. 220216.
- [3] Afjei, Th. et al.. 1998. Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe, Phase 2: Ökologischer und ökonomischer Vergleich, Systemoptimierung, intelligente Regelung, Versuche. Bundesamt für Energie 1998. Anhang 7.2. ENET-Nr. 194994.
- [4] BFE. 1998. Geothermie – Praktische Nutzung von Erdwärme; Leitfaden für Planer, Bauherren, Investoren und Entscheidungsträger. Bundesamt für Energie, Bern. ENET-Nr. 190388.
- [5] Hellström, G., B. Sanner. 1994. *PC-Programm zur Auslegung von Erdwärmesonden*. IZW-Bericht 1/94. S. 341 - 350, Karlsruhe.
- [6] Huber, A.; O. Schuler. 1997. *Berechnungsmodul für Erdwärmesonden*. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie, Bern. ENET-Nr. 9658807/1.
- [7] Erb, M.; P. Hubacher. 2001. *Erfahrungen an Retrofit-Anlagen im Betrieb*. Tagungsband zur 8. Tagung des Forschungsprogramms Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW). Bundesamt für Energie, Bern.
- [8] FWS, Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz. 2001. *Gütesiegel für Erdwärmesonden – Bohrfirmen*. Version Juni 2001.
- [9] Weber, H.; M. Brack; J.-M. Suter. 1982. Energetische Optimierung eines Warmwasserspeichers in Theorie und Praxis: Wärmeverluste, Schichtung und Auswirkungen der Zirkulation. Tagungsband des 2. ‚Statusseminar Wärmeschutzforschung im Hochbau‘. ETH-Zürich, 19.-20. Oktober 1982.
- [10] Hubacher, B.; M. Ehrbar. 2001. *Dynamischer Wärmepumpentest. Entwicklung und Validierung einer Prüfprozedur für den Prüfstand WPZ in Töss*. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie, Bern.
- [11] Gabathuler, H.R.; H. Mayer, E. Shafai. 2002. *Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpen, Phase 2: Erprobung in einem Wohnhaus*. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie, Bern. ENET-Nr. 220186.
- [12] Huber, A. 1999. *Hydraulische Auslegung von Erdwärmesondenkreisläufen*. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie, Bern. ENET-Nr. 9934023.

6. Répertoire des symboles et glossaire

a/: avec (m/ mit)

A/W: Installations air/eau (abréviation anglaise: air/water)

Bivalent: Pour couvrir les besoins thermiques des locaux, on a recours à un deuxième générateur de chaleur non électrique (p. ex. chaudière à bois, à gaz ou à mazout).

B/W: Installations sol/eau (abréviation anglaise: Brine/Water)

ChS (BHZ ou FBH): Chauffage au sol (Fussbodenheizung ou Bodenheizung). Système de distribution comprenant uniquement un chauffage au sol ou un chauffage au sol mixte avec radiateurs

COP Coefficient de performance

Rapport entre la capacité de chauffage et la puissance électrique absorbée par le compresseur, par le dispositif de dégivrage et par les pompes de circulation (cf. EN 255)

Il correspond à la définition du coefficient de performance annuel (COPA, cf. ci-dessous) à la différence que la période considérée est inférieure à une année.

COPA 1 (JAZ 1)

Rapport entre la quantité de chaleur produite par la PAC, sans les pertes d'accumulation (pour autant qu'elles existent) et les besoins en électricité spécifiques à la PAC, y compris les groupes auxiliaires tels que les pompes de circulation et le chauffage du carter. Côté distribution, on enregistre seulement la consommation d'électricité pour compenser la perte de pression par le condenseur. Concrètement, pour les installations avec accumulateur branché en parallèle, on tient compte intégralement de la consommation d'électricité de la pompe de charge. Pour les autres installations, la consommation d'électricité des pompes du condenseur est estimée à l'aide de sa courbe caractéristique de perte de pression, du débit volume réel et du degré d'efficacité supposé de la pompe (15%).

COPA 2 (JAZ 2)

Rapport entre la quantité de chaleur produite par la PAC, resp. à partir de l'accumulateur (pour autant qu'il existe) et les besoins en électricité spécifiques à la PAC, y compris les groupes auxiliaires tels que les pompes de circulation (côté distribution seulement perte de pression par le condenseur) et le chauffage du carter. Pour les installations sans accumulateur, le COPA 1 correspond donc au COPA 2.

COPA 3 (JAZ 3)

Rapport entre la quantité de chaleur produite par la PAC resp. à partir de l'accumulateur (pour autant qu'il existe) y compris les chauffages électriques d'appoint (pour le chauffage des locaux et la production d'eau chaude sanitaire, cette dernière seulement si cette possibilité est intégrée à l'installation PAC) et les besoins en électricité spécifiques à la PAC, y compris les groupes auxiliaires tels que les pompes de circulation (total) et le chauffage du carter.

ECS (WW): Eau chaude sanitaire (Brauchwarmwasser).

>0 %: eau chaude sanitaire produite partiellement ou totalement par PAC

Hiv_o_Eté (Wi_o_So) 100 % PAC: la PAC produit de l'ECS en hiver ou en été à 100%

PAC préch. (Vorw.): uniquement préchauffage de l'ECS par la PAC

PAC+CapSo (SoKo): ECS produite par une PAC et des capteurs solaires

SD (SD) Ecart type (Standardabweichung): C'est une mesure de la dispersion des distributions d'un critère autour d'une valeur moyenne. Les calculs de l'écart type sur la base d'un échantillon ($n < N$) ne représentent toujours que des estimations de la valeur réelle, et par conséquent également de toutes les grandeurs basées sur cet échantillonnage (p. ex. l'intervalle de confiance).

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$$

y_i : valeur du point de données i

$\bar{y}$: valeur moyenne de la série de données y

Groupe: désigne la pompe à chaleur proprement dite, y c. la régulation.

IDE (EKZ ou Energiekennzahl): Indice de dépense d'énergie ou « indice énergétique » (chaleur des locaux): besoins en énergie de chauffage par m^2 de surface de référence énergétique.

Installation: Comprend l'ensemble de l'installation de technique de chauffage, dans la présente étude la source de chaleur, le groupe de la pompe à chaleur (cf. groupe), l'accumulateur, le chauffe-eau, la diffusion de la chaleur et les entraînements auxiliaires.

Intervalle de confiance IC (CI):

$$CI = \hat{M} \pm z \sqrt{\widehat{Var}(\hat{M})}$$

Désigne l'intervalle dans lequel se situe la valeur réelle, donc la moyenne de la caractéristique concernée (p. ex. COPA) présentant une probabilité d'erreur de α (ici $\alpha = 5\%$). La valeur moyenne réelle désigne la moyenne de l'ensemble de base, donc, dans le cadre du projet Anis, la moyenne de toutes les PAC de la catégorie concernée installées en Suisse (p. ex. air/eau ou sol/eau). Il se calcule avec $\hat{M}$: moyenne estimée, z : quantile supérieur (alpha divisé par deux) de

la répartition normale, Var : variance (estimation de la valeur réelle), n : volume de l'échantillon, N : volume de l'ensemble, SD : écart type et:

$$Var(\hat{M}) = (1 - \frac{n}{N}) \frac{SD^2}{n}$$

λ_{ER} : Conductibilité thermique du sous-sol

λ_{HF} : Conductibilité thermique du remplissage autour d'une sonde géothermique

Machine: cf. groupe

Monoénergétique: Pour couvrir les besoins thermiques des locaux, on utilise un deuxième générateur de chaleur électrique (corps de chauffe électrique).

Monovalent: Le groupe de la PAC couvre l'ensemble des besoins thermiques des locaux.

nCOPA 2: COPA 2 normé en fonction de données climatologiques. Autrement dit: l'influence du climat sur le COPA 2 est éliminée dans le nCOPA 2. Valeur de régression ($T_e = 4^\circ\text{C}$) issue de coefficients de performance obtenus en périodes de températures extérieures moyennes variables.

Par.: Parallèle

Q: Quantité de chaleur

R: Coefficient de corrélation de Pearson. Ce coefficient est un indice sans dimension dans le domaine de valeurs $-1,0 \leq r \leq 1,0$ et mesure jusqu'à quel point il existe une dépendance linéaire entre deux jeux de données.

Valeur (absolue)	Taux de corrélation
0,00	Aucune relation
de > 0,00 à 0,40	relation faible
de 0,40 à 0,70	relation moyenne
de 0,70 à < 1,00	relation élevée
1,00	relation parfaite

Rad.: Système de distribution comprenant des radiateurs

RCoL (TRkp.): Régulateur avec compensation de la température des locaux

RGS (SNG): Rendement global du système (Systemnutzungsgrad): quantité de chaleur produite pour le chauffage des locaux et la production d'eau chaude sanitaire en relation avec la consommation électrique totale de l'installation (y c. chauffe-eau électrique).

$$SNG = \frac{Q_{\text{Heiz}} + Q_{\text{WW}}}{\sum E_{\text{el}}}$$

s/: sans (o/ ohne)

Ser.: sériel, en série

Système: cf. installation

ϑ_g : Température de source à l'entrée de la pompe à chaleur

ϑ_s : Température de distribution à la sortie de la pompe à chaleur

T_{dé} (dim.) (TVL (dim.)): Température de départ (Vorlauftemperatur) en conditions de dimensionnement (généralement T_e -8 °C)

T_e: Température extérieure

TF (LZ): Temps de fonctionnement ou b (bêta) (Laufzeit)

T_{sa} (T_{Sole}): Température de la saumure à l'entrée de la pompe à chaleur (Temperatur der Sole).

V. th. (Th.v.): Vanne thermostatique (Thermostatventile)