



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement,  
des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
Office fédéral de l'énergie OFEN

Rapport final, 25 août 2015

---

# **AQ-PAC (ASSURANCE-QUALITÉ/POMPES À CHALEUR): SUITE DES MESURES IN SITU (2011-2014)**

---

## **Impressum**

Date: 25 août 2015

### **Mandant:**

Office fédéral de l'énergie OFEN, CH-3003 Berne  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

Responsable de domaine OFEN: Rita Kobler [Rita.Kobler@bfe.admin.ch](mailto:Rita.Kobler@bfe.admin.ch)

### **Mandataire:**

Hubacher Engineering  
Tannenbergrasse 2  
9032 Engelburg

### **Projet:**

Contrat n° SI/400065-04

### **Auteurs:**

Peter Hubacher, ing. dipl. ETS, Hubacher Engineering, [he-ko@bluewin.ch](mailto:he-ko@bluewin.ch)  
Carlos Bernal, technicien, Hubacher Engineering

### **Groupe de suivi:**

Rita Kobler, Office fédéral de l'énergie OFEN  
Gerold Truniger, Office fédéral de l'énergie OFEN

Le contenu et les conclusions du présent rapport n'engagent que son auteur.

## Table des matières

|   | page      |
|---|-----------|
| <b>Résumé</b>   | <b>4</b>  |
| <b>Abstract</b>   | <b>5</b>  |
| <b>1. Objectifs du projet</b>   | <b>6</b>  |
| 1.1 Informations générales  | 6         |
| 1.2 Déroulement du projet   | 6         |
| 1.2.1 Concept de mesure   | 6         |
| 1.2.2 Couverture du marché  | 6         |
| 1.2.3 Contacts avec les propriétaires des installations                     | 6         |
| 1.3 Echantillon d'installations   | 7         |
| 1.4 Evaluation des installations  | 10        |
| 1.5 Relevé des données  | 11        |
| 1.6 Statistiques des pompes à chaleur                                       | 11        |
| <b>2. Analyse et résultats</b>  | <b>12</b> |
| 2.1 Analyse des coefficients de performance COPA                            | 12        |
| 2.1.1 Comparaison en fonction des années de fonctionnement                  | 12        |
| 2.1.2 Comparaison en fonction du calendrier                                 | 14        |
| 2.1.3 Comparaison des nouvelles constructions et des rénovations            | 15        |
| 2.1.4 Influence de la température de planification                          | 15        |
| 2.2 Comparaison des heures de fonctionnement                                | 16        |
| 2.3 Analyse de la production de chaleur                                     | 18        |
| 2.4 Analyse de la consommation d'énergie électrique                         | 19        |
| 2.5 Amélioration de l'efficacité – comparaison des meilleures installations | 19        |
| 2.6 Comparaison des COP sur la base de la méthode de calcul PACesti         | 20        |
| 2.7 Analyse des pannes (disponibilité des pompes à chaleur)                 | 22        |
| <b>3. Observations et expériences</b>                                       | <b>22</b> |
| 3.1 Distribution de chaleur optimisée                                       | 22        |
| 3.2 Installation fonctionnant au propane                                    | 23        |
| 3.3 Installation fortement surdimensionnée                                  | 23        |
| 3.4 Installation avec collecteurs de chaleur enterrés                       | 24        |
| 3.5 Pompe à chaleur à régulation de puissance avec sondes géothermiques     | 24        |
| 3.6 Optimisation de l'installation  | 25        |
| 3.7 Installation remplacée par un nouveau système de pompe à chaleur        | 25        |
| <b>4. Maintenance et réparations</b>  | <b>25</b> |
| 4.1 Maintenance des petites pompes à chaleur                                | 26        |
| 4.2 Réparation des petites pompes à chaleur                                 | 26        |
| 4.3 Total des coûts de maintenance et de réparation                         | 28        |
| <b>5. Collaboration au niveau national</b>                                  | <b>28</b> |
| <b>6. Collaboration au niveau international</b>                             | <b>28</b> |
| <b>7. Conclusions</b>   | <b>28</b> |
| <b>8. Références bibliographiques</b>                                       | <b>29</b> |

## Résumé

Le projet d'analyses in situ de petites pompes à chaleur se poursuit depuis maintenant 18 ans sur plus de 260 installations soigneusement choisies, équipées et suivies sur le plan technique. Les données ont été directement relevées par les propriétaires, reportées dans un journal, et transmises à Hubacher Engineering à intervalles réguliers pour analyse. Cette méthodologie simple a permis, au fil des années, de constituer et d'analyser un échantillon d'installations considérable.

Les résultats obtenus sont contrastés. Si certaines installations ont montré de bons, voire de très bons résultats et ont rempli toutes les conditions, on serait en droit d'attendre de meilleurs résultats en matière d'efficacité. Alors qu'il était en progression durant les années initiales, le coefficient de performance annuel stagne depuis 2000. Durant les années qui ont suivi, aucune tendance à l'amélioration, même mineure, n'a été détectée.

Un autre aspect de l'analyse a porté sur la durée annuelle de fonctionnement. Il a permis de vérifier si les directives de l'Office fédéral de l'énergie OFEN en matière de dimensionnement («Garantie de performance - Installations techniques») et la norme SIA 384/6 relative aux sondes géothermiques ont été respectées. Avec 1700 heures par an en moyenne pour les pompes à chaleur air-eau et 1900 heures par an en moyenne pour les pompes à chaleur sol-eau, la durée de fonctionnement des installations analysées est légèrement inférieure à la directive, qui recommande 2000 à 2300 heures par an, avec ou sans production d'eau chaude sanitaire (ECS). Cette observation indique que les installations ont tendance à être surdimensionnées, ce qui a pourtant un effet positif sur le dimensionnement des sondes géothermiques comme sur l'efficacité. Dans le cas des pompes à chaleur sol-eau, il est très important que la durée de fonctionnement n'excède par le nombre d'heures indiqué, par crainte qu'un soutirage excessif d'énergie du sous-sol ne conduise à un refroidissement du terrain autour de la sonde.

Les expériences et observations recueillies dans le cadre de ce projet à long terme sont considérables et ont été régulièrement communiquées aux professionnels de la branche. A l'aide de quelques exemples, le présent rapport montre comment et dans quelles circonstances il est possible d'obtenir de telles informations.

L'analyse complémentaire des pannes fournit elle aussi des résultats très réjouissants. La disponibilité moyenne dépasse 99,5% et soutient facilement la comparaison avec tous les autres systèmes de production de chaleur. Un autre examen approfondi a consisté à analyser les coûts de maintenance et de réparation de 61 installations; il a lui aussi débouché sur des résultats plus que réjouissants. Les coûts de maintenance pour le service et l'entretien de ces petites pompes à chaleur atteignent en moyenne 21,60 [fr./an], et les coûts de réparation se situent à 84,40 [fr./an], soit une moyenne annuelle de 106,00 [fr./an] par pompe à chaleur. Pour une durée de fonctionnement de 1000 heures, les coûts de maintenance et de réparation peuvent ainsi être évalués à environ 51,00 [fr.]. L'analyse des 61 installations retenues repose tout de même sur un total de 1,32 million d'heures de fonctionnement. A noter que comme ces petites installations contiennent pour la plupart moins de 3kg de fluide frigorigène, elles ne nécessitent aucun contrôle d'étanchéité.

Suites aux différentes analyses in situ réalisées (ANIS et AQ-PAC 2007-2008; réf. 1 et 2), nous pouvons affirmer que les petites pompes à chaleur restent malgré tout relativement performantes dans l'ensemble. Si l'efficacité est plutôt inférieure aux attentes et peut encore être améliorée, la sécurité et les coûts d'exploitation en revanche s'avèrent très encourageants.

Dans un souci d'anticipation à long terme, la Suisse avait chargé l'OFEN d'un premier projet d'analyses in situ sur de petites pompes à chaleur en 1995 déjà (analyse ANIS [1] et projets suivants AQ-PAC [2]). Elle bénéficie ainsi d'une belle longueur d'avance en matière d'expériences et de résultats.

Il est essentiel de poursuivre les mesures in situ durant les prochaines années en vue de couvrir la durée de vie présumée des petites pompes à chaleur, estimée à vingt ans. En effet, il reste à démontrer que ces installations fonctionnent pendant vingt ans et plus sans multiplication des problèmes ni augmentation des coûts d'entretien.

## Abstract

The long term project "field monitoring of heat pumps " has been running for the last 18 years. Over this period more than 260 installations have been visited, measured and recorded. The measurements were directly recorded and documented by the owners of the heat pumps, who passed on the resulting data to us at regular intervals for evaluation. It is only thanks to this simple measurement procedure that it has been possible for us to collect and evaluate such a large volume of data .

The findings vary: from the point of view of efficiency, we would have expected a better result. While in the first few years up to 2000 we noted increases in efficiency, in the years thereafter there were no signs at all of a trend towards improved seasonal performance factor.

Another analysis focused on annual operating hours. Here the degree of compliance with the criterion specified in the dimensioning guidelines of the Swiss Federal Office of Energy (SFOE) for the performance guarantee for household systems, and with SIA standard 384/6 for geothermal sensors, was examined. The operating hours of the studied heat pumps were as follows: air/water heat pumps, approximately 1'700 hours, and brine/water heat pumps, approximately 1'900 hours, i.e. in both cases close to the specified range of 2'000 to 2'300 hours per annum, with or without hot water production. This analysis indicates that the installation tend towards being over dimensioned, this has a positive effect on the size of the geothermal probe systems and its efficiency. In the case of brine/water heat pump systems it is essential that the figures regarding annual operating hours are accurate, otherwise concerns could arise relating to longer-term problems associated with cooled geothermal probes.

The experience and knowledge gained from this long-term project are immense and have been continuously communicated to the professional industry. With some examples shown in this report, how and in which contexts such information may be obtained.

The resulting analysis of faults produced a very positive picture. The average degree of availability is above 99.5 percent, which is extremely favourable in comparison with any other heat production system. This resulted in excellent performance figures from the analyse of 61 heat pumps. For these small heat pumps the average servicing and maintenance costs are 21.60 Swiss francs p.a., and the average repair costs amount to 84.40 Swiss francs p.a. This results in an average outlay per heat pump of 106.00 Swiss francs p.a. On the basis of 1,000 operating hours, the costs for maintenance and repairs therefore amount to approximately 51.00 Swiss francs. This analysis of the 61 heat pumps is based on a total of 1.32 million operating hours. Further it should be noted that the coolant mass in most cases is under 3kg, which means no gasket testing is required.

From the findings obtained from this research (FAWA and QS-WP/QP 2007-2008; Lit. 1 and 2) it may be stated that the performance of small heat pumps is generally very good. The degree of efficiency is less than expected, and there is room for improvement, but the picture with respect to reliability and operating costs is very positive.

It is important to continue with this programme of field measurements of small heat pumps, since the studies need to be carried out during the next few years until the completion of the anticipated service life of these heat pumps (around 20 years). Confirmation still needs to be made that small heat pumps have a service life of 20 years or more without causing increasing problems and maintenance costs.

# 1 OBJECTIFS DU PROJET

## 1.1 Informations générales

Les objectifs de ce projet s'alignent sur la stratégie d'assurance-qualité suivie par l'OFEN et le Groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur (GSP). Les pays environnants (Allemagne, Autriche et Angleterre) ont eux aussi perçu le besoin de réunir des observations aussi importantes que nécessaires à l'aide d'analyses in situ, puis de les publier en vue de créer un climat de confiance et de compléter les informations disponibles sur le marché. La Suisse a pris une avance considérable avec ce projet, puisqu'elle est le seul pays à pouvoir répertorier, analyser et évaluer les résultats portant sur 19 années d'exploitation.

Comme ce projet a été systématiquement poursuivi jusqu'ici, nous sommes en mesure de transmettre ces expériences et observations essentielles aux professionnels de la branche. Aucune autre étude in situ au monde n'a jamais porté sur une période aussi longue ni fourni des résultats aussi complets:

Relevé des données depuis le début de l'analyse sur plus de 260 installations, dont 159 font jusqu'à ce jour partie de l'échantillon des installations actives;

Chaque année depuis 2008, intégration de dix nouvelles pompes à chaleur dans le but d'établir l'état actuel de la technologie et de le comparer avec celui des installations anciennes;

Observation du vieillissement à long terme: détermination du coefficient de performance annuel et comparaison avec les résultats constatés jusqu'ici;

Disponibilité (analyse des pannes): détermination et comparaison des valeurs annuelles liées au fonctionnement;

Relevé de données visant à déterminer le coefficient de performance annuel au moyen des valeurs effectives mesurées, en vue d'alimenter les statistiques de l'OFEN sur les pompes à chaleur et les statistiques globales de l'énergie.

## 1.2 Déroulement du projet

### 1.2.1 Concept de mesure

Le présent projet porte sur les petites pompes à chaleur ayant une puissance de chauffage maximale de 20 kW. Il n'inclut pas de systèmes «exotiques», que ce soit sur le plan de l'hydraulique ou de la régulation.

Afin de pouvoir déterminer le coefficient de performance annuel, chaque installation a été équipée de compteurs de chaleur, de compteurs électriques et de compteurs horaires; les propriétaires étaient chargés de relever les données à intervalles réguliers (d'hebdomadaire à mensuel) et de les communiquer à Hubacher Engineering. Les mécanismes directement entraînés par la pompe à chaleur ont été pris en compte, de même que les pertes d'accumulation, selon la limite du bilan. Par contre, les équipements auxiliaires tels que les circulateurs de chauffage, etc. qui ne sont pas directement sollicités par le fonctionnement des pompes à chaleur et qui n'ont pas pu être enregistrés, ont été clairement exclus.

### 1.2.2 Couverture du marché

Nous entretenons d'excellentes relations avec tous les principaux fabricants et fournisseurs actifs sur le marché. Ces contacts ont leur importance: en effet, si l'on veut obtenir une vue d'ensemble réaliste du marché, les nouveaux produits lancés doivent être également pris en compte. Tous ont réservé un bon accueil au projet et ont apporté leur soutien.

### 1.2.3 Contacts avec les propriétaires des installations

Il n'a pas toujours été facile d'obtenir à temps toutes les données mesurées pour effectuer les analyses convenues par contrat et présenter les résultats. Afin de pouvoir garantir la qualité de l'évaluation des données et sa significativité sur le plan statistique, au moins dix relevés (intervalles entre les mesures) ont été nécessaires chaque année.

Dans le souci d'éviter toute lacune majeure dans les relevés, les propriétaires ont été régulièrement contactés et motivés. Un à deux contacts par année ont été nécessaires pour éviter qu'ils n'oublient de relever les données. En contrepartie, ils pouvaient bénéficier de conseils pour leur installation. D'autre part, nous leur avons fait parvenir chaque année les données de leur propre installation avec un bref commentaire.

### 1.3 Echantillon d'installations

Depuis longtemps déjà, les pompes à chaleur occupent une place prédominante dans la construction de maisons individuelles, puisque plus de 85% des maisons familiales construites en Suisse sont équipées d'un système de chauffage avec pompe à chaleur. Les rénovations ayant fortement progressé sur le marché suisse, le choix de ce type d'installation a été examiné plus en profondeur dans ce secteur également. Comme les conditions en cas de rénovations sont moins propices, l'installation d'une pompe à chaleur représente un défi plus important dans ce contexte. De même, la production d'ECS au moyen d'une pompe à chaleur s'est largement imposée ces dernières années, d'où la progression de ces équipements dans l'échantillon d'installations.

Tableau 1: Liste des nouvelles installations prises en compte

|                          | N°   | Abréviation      | Secteur      | Objet      | Source de chaleur | Prod. ECS | COPA | Début relevés |
|--------------------------|------|------------------|--------------|------------|-------------------|-----------|------|---------------|
| Liste installations 2011 | 1235 | <b>STEFGS03</b>  | Nvle constr. | Villa      | Air extérieur     | oui       | 3.30 | 03.11.11      |
|                          | 1236 | <b>ZÜBWEI09</b>  | Rénovation   | Villa      | Sonde géoth.      | oui       | 3.06 | 15.07.11      |
|                          | 1237 | <b>RIESAL16</b>  | Rénovation   | Villa      | Sonde géoth.      | non       | 3.47 | 01.09.11      |
|                          | 1238 | <b>UETBER05</b>  | Rénovation   | Villa      | Air extérieur     | oui       | 3.09 | 22.12.11      |
|                          | 1239 | <b>TRIMMIS</b>   | Rénovation   | Villa      | Air extérieur     | oui       | 2.41 | 28.11.11      |
|                          | 1240 | <b>ESCOBE09</b>  | Rénovation   | Villa      | Air extérieur     | oui       | 2.20 | 29.12.11      |
|                          | 1241 | <b>MÖRFAH24</b>  | Rénovation   | V. jumelée | Air extérieur     | oui       | 3.23 | 04.06.12      |
|                          | 1242 | <b>FRASCH04</b>  | Nvle constr. | Villa      | Sonde géoth.      | oui       | 4.42 | 06.01.12      |
|                          | 1243 | <b>SCUSPL00</b>  | Nvle constr. | Villa      | Sonde géoth.      | oui       | 4.40 | 11.11.10      |
|                          | 1244 | <b>HEROWI04</b>  | Rénovation   | Villa      | Sonde géoth.      | non       | 4.45 | 04.10.11      |
| Liste installations 2012 | 1245 | <b>BRESEF21</b>  | Rénovation   | Villa      | Sonde géoth.      | oui       | 3.91 | 11.09.12      |
|                          | 1246 | <b>WÄGGRO04</b>  | Rénovation   | Villa      | Sonde géoth.      | oui       | 4.47 | 30.08.12      |
|                          | 1247 | <b>UETARV15</b>  | Rénovation   | Villa      | Sonde géoth.      | oui       | 3.68 | 25.09.12      |
|                          | 1248 | <b>BETBIL11</b>  | Nvle constr. | Villa      | Sonde géoth.      | oui       | 4.26 | 12.09.12      |
|                          | 1249 | <b>ZÜRFAR12</b>  | Rénovation   | Villa      | Sonde géoth.      | oui       | 4.00 | 18.10.12      |
|                          | 1250 | <b>SCHGRO00</b>  | Nvle constr. | Villa      | Air extérieur     | oui       | 3.31 | 20.12.12      |
|                          | 1251 | <b>WEGRIC58</b>  | Rénovation   | Villa      | Air extérieur     | oui       | 3.35 | 01.12.12      |
|                          | 1252 | <b>REBBAH61</b>  | Rénovation   | V. jumelée | Air extérieur     | oui       | 3.62 | 01.12.12      |
|                          | 1253 | <b>RHETRU26</b>  | Nvle constr. | Villa      | Air extérieur     | oui       | 3.49 | 07.03.13      |
|                          | 1254 | <b>ALTRÜE16</b>  | Rénovation   | Villa      | Air extérieur     | non       | 3.70 | 08.02.13      |
| Liste installations 2013 | 1255 | <b>SIRMAT04</b>  | Rénovation   | Villa      | Sonde géoth.      | oui       | 3.82 | 20.03.2013    |
|                          | 1256 | <b>HEROBE16</b>  | Rénovation   | Villa      | Sonde géoth.      | oui       | 4.38 | 31.05.2013    |
|                          | 1257 | <b>WILLIR37</b>  | Rénovation   | Villa      | Sonde géoth.      | oui       | 4.61 | 01.09.2013    |
|                          | 1258 | <b>KOLRINO5</b>  | Rénovation   | Villa      | Sonde géoth.      | oui       | 4.32 | 14.10.2013    |
|                          | 1259 | <b>WILMAGO4</b>  | Rénovation   | Villa      | Sonde géoth.      | oui       | 4.36 | 01.09.2013    |
|                          | 1260 | <b>WEIBUR15</b>  | Rénovation   | Villa      | Air extérieur     | oui       | 2.53 | 29.04.2014    |
|                          | 1261 | <b>KOPSCH24</b>  | Rénovation   | Villa      | Air extérieur     | oui       | 2.59 | 31.08.2013    |
|                          | 1262 | <b>ALTOBER04</b> | Rénovation   | Villa      | Air extérieur     | oui       | 2.71 | 01.10.2013    |
|                          | 1263 | <b>GANGAL12</b>  | Rénovation   | Villa      | Air extérieur     | oui       | 3.41 | 01.10.2013    |
|                          | 1264 | <b>BISHÖH13</b>  | Rénovation   | Villa      | Air extérieur     | oui       | 2.96 | 21.01.2014    |
| Liste installations 2014 | 1265 | <b>LANLUE05</b>  | Rénovation   | Villa      | Sonde géoth.      | oui       | 4.66 | 06.02.2014    |
|                          | 1266 | <b>NIESCH19</b>  | Rénovation   | Villa      | Sonde géoth.      | oui       | 4.68 | 18.12.2014    |
|                          | 1267 | <b>STEHEI10</b>  | Rénovation   | Villa      | Air extérieur     | oui       | 3.15 | 15.12.2014    |
|                          | 1268 | <b>ROSOBE06</b>  | Rénovation   | Villa      | Air extérieur     | oui       | 3.18 | 10.12.2014    |
|                          | 1269 | <b>WALBÜN11</b>  | Rénovation   | Villa      | Air extérieur     | non       | 3.69 | 03.02.2015    |
|                          | 1270 | <b>EINSTE08</b>  | Rénovation   | Villa      | Air extérieur     | oui       | 2.84 | 19.12.2014    |
|                          | 1271 | <b>NEUSCH08</b>  | Rénovation   | Villa      | Air extérieur     | non       | 2.88 | 23.10.2014    |
|                          | 1272 | <b>WITHAL10</b>  | Rénovation   | Villa      | Air extérieur     | oui       | 2.34 | 12.01.2015    |
|                          | 1273 | <b>WANKIN09</b>  | Rénovation   | Villa      | Air extérieur     | oui       | 3.29 | 16.12.2014    |
|                          | 1274 | <b>BROSON10</b>  | Rénovation   | Villa      | Air extérieur     | oui       | 2.46 | 03.12.2014    |

Remarques:

\* Seuls les coefficients de performance annuels des installations de 2013 sont basés sur un cycle de mesure complet

\*\* Certains coefficients de performance annuels des installations 2014 ont été relevés et extrapolés pendant quelques mois seulement.

Tableau 2: Echantillon complet des installations aujourd'hui encore prises en compte pour l'analyse

| Année de mise en service MES | Nombre total | PAC sol-eau | PAC air-eau | Catégories de l'échantillon |                      |                               |                                   |
|------------------------------|--------------|-------------|-------------|-----------------------------|----------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
|                              |              |             |             | SGV avec eau                | avec préparation ECS | Installations pour rénovation | Années de fonctionnem. depuis MES |
| 1995                         | 6            | 5           | 1           |                             | 1                    | 6                             | 19                                |
| 1996                         | 7            | 4           | 3           |                             | 3                    | 7                             | 18                                |
| 1997                         | 7            | 2           | 5           |                             | 5                    | 3                             | 17                                |
| 1998                         | 7            | 6           | 1           |                             | 5                    | 2                             | 16                                |
| 1999                         | 9            | 6           | 3           |                             | 6                    | 6                             | 15                                |
| 2000                         | 10           | 6           | 4           |                             | 6                    | 5                             | 14                                |
| 2001                         | 13           | 7           | 5           | 1                           | 6                    | 6                             | 13                                |
| 2002                         | 12           | 7           | 5           |                             | 7                    | 5                             | 12                                |
| 2003                         | 17           | 12          | 5           |                             | 12                   | 9                             | 11                                |
| 2004                         | 1            | 1           |             |                             | 1                    | 1                             | 10                                |
| 2005                         |              |             |             |                             |                      |                               | 9                                 |
| 2006                         |              |             |             |                             |                      |                               | 8                                 |
| 2007                         |              |             |             |                             |                      |                               | 7                                 |
| 2008                         | 10           | 6           | 4           |                             | 6                    | 4                             | 6                                 |
| 2009                         | 10           | 4           | 6           |                             | 9                    | 7                             | 5                                 |
| 2010                         | 10           | 4           | 4           | 2                           | 8                    | 9                             | 4                                 |
| 2011                         | 10           | 5           | 5           |                             | 9                    | 7                             | 3                                 |
| 2012                         | 10           | 5           | 5           |                             | 9                    | 7                             | 2                                 |
| 2013                         | 10           | 5           | 5           |                             | 10                   | 10                            | 1                                 |
| 2014                         | 10           | 4           | 6           |                             | 8                    | 10                            | 0                                 |
| total                        | 159          | 89          | 67          | 3                           | 111                  | 104                           |                                   |

Remarque:

\* «SGV avec eau» désigne des installations à sonde géothermique fonctionnant avec de l'eau au lieu d'un mélange eau/glycol.

Quelques installations ont encore été intégrées en 2004-2005, mais non en 2006-2007. La question de la poursuite conséquente de cette analyse in situ n'a été abordée par Hubacher Engineering et l'OFEN qu'en 2007, si bien que le projet suivant n'a été approuvé qu'en 2008. Afin de ne pas perdre les contacts noués avec les propriétaires des installations, Hubacher Engineering les a entretenus et soignés de sa propre initiative (prestation propre).

Les installations demeurées dans l'échantillon ont continué à faire l'objet de relevés et d'analyses. Au cours des dernières années, des contacts personnels ont été noués par courriel ou par téléphone avec la plupart des propriétaires d'installations qui relevaient des données. Malgré cela, l'année dernière, certains propriétaires ont également été exclus du projet car ils ne voulaient plus continuer à assurer le relevé des données.

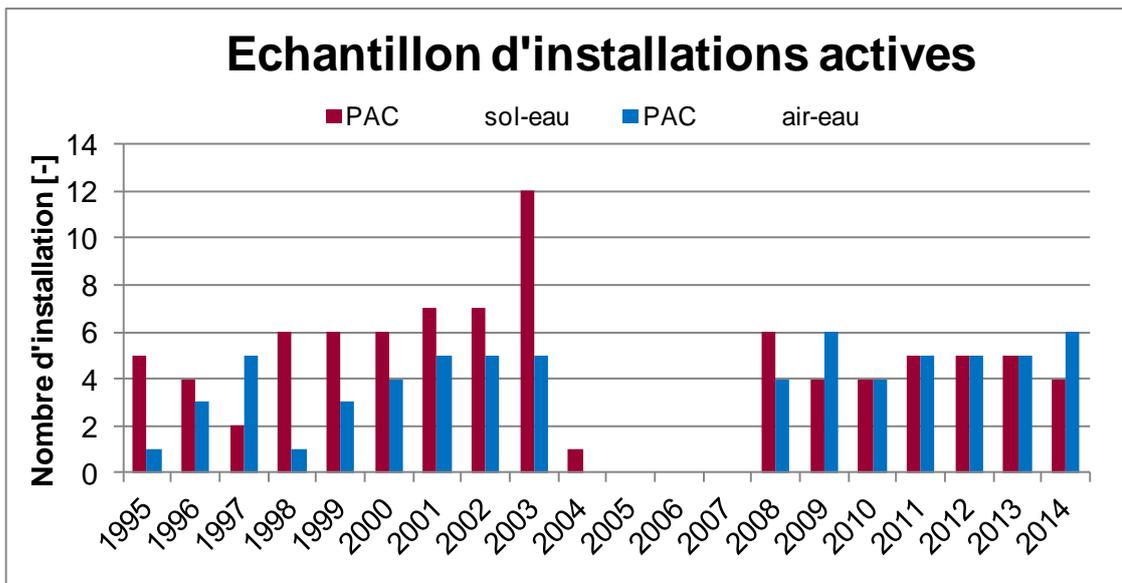


Fig. 1: Echantillon des installations qui font aujourd'hui encore l'objet de relevés et d'analyses

L'évaluation des installations à l'aide des critères définis dans le cadre du projet ANIS a nécessité un travail considérable. D'une part, les acteurs du marché (fabricants, fournisseurs et installateurs) ont une charge de travail conséquente et n'ont pas le temps de procéder aux relevés; d'autre part, ils sont nettement moins intéressés à étoffer et améliorer leurs connaissances sur les installations in situ. Cependant, la qualité des installations ne s'est pas améliorée ces dernières années. Certains signes d'usure sont même détectés lorsque des erreurs et négligences sont constatées pour ce qui est du dimensionnement de l'installation et de sa mise en service.

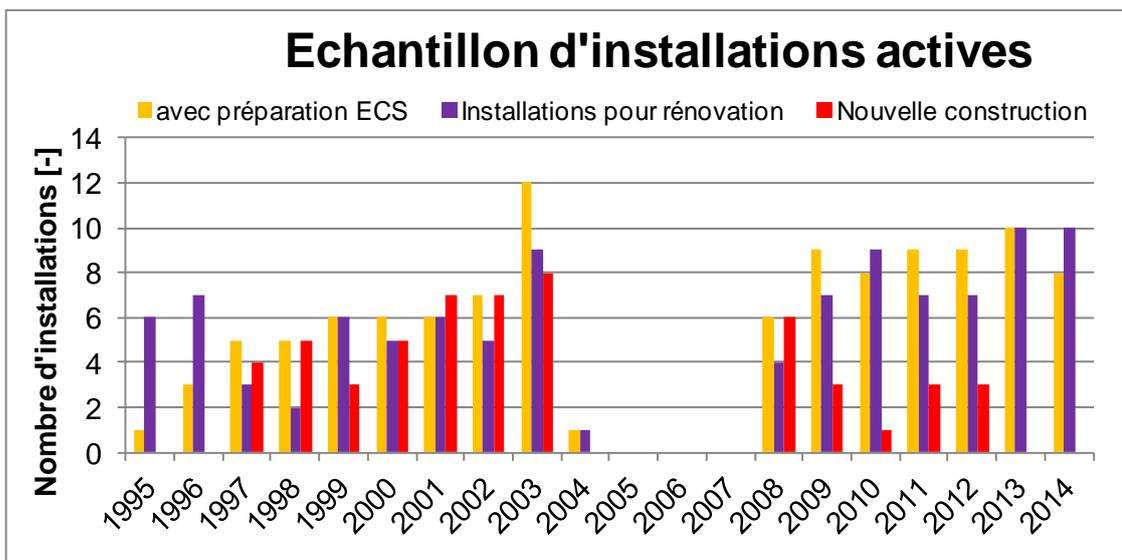


Fig. 2: Part des installations pour constructions nouvelles/rénovations, avec production d'ECS

Les pompes à chaleur eau-eau ne sont pas très répandues parmi les petites installations. Voilà pourquoi aucune installation de ce type captant l'énergie thermique nécessaire dans les nappes phréatiques ou l'eau de surface n'a plus été intégrée à l'échantillon depuis 2004. Au lieu de cela, cinq installations avec sondes géothermiques et fonctionnant avec de l'eau (sans antigel) sont représentées dans l'échantillon à des fins de comparaison. Un fonctionnement sans antigel nécessite des sondes plus longues qui permettent d'atteindre des températures à la source plus élevées. Ces installations sont donc nettement plus efficaces.

## 1.4 Evaluation des installations

Pour que la qualité des relevés soit garantie sur le plan statistique, il est nécessaire d'examiner un nombre minimal d'installations. L'échantillon d'installations disponible à l'heure actuelle comprend toujours 170 installations (pompes à chaleur air-eau et sol-eau).

Les critères retenus pour l'intégration à l'échantillon sont restés les mêmes toutes ces années:

- **puissance thermique:** capacité thermique maximale des installations de pompes à chaleur 20 kW<sub>th</sub>;
- **sources de chaleur:** installations air-eau et sol-eau, à concurrence d'environ 50% chacune;
- **mode de production:** appareils en série, pas de modèles spéciaux ni d'appareils atypiques;
- **fonctionnement:** installations monovalentes;
- **implantation:** différentes situations géographiques;
- **objets:** nouvelles constructions et objets à rénover;
- **eau chaude sanitaire (ECS):** installations avec et sans production d'eau chaude sanitaire;
- **contrôle:** les pompes à chaleur doivent si possible être munies du label de qualité GSP;
- **raccordement hydraulique:** les installations sont en règle générale construites conformément aux principes de raccordement standard; les raccordements complexes ou atypiques ne sont pas pris en compte.

## 1.5 Relevé des données

Les données mesurées ont été soit relevées à la main dans un journal de mesures, soit saisies dans un fichier Excel. Après réception, elles ont subi un contrôle de plausibilité, qui a permis d'identifier et de résoudre rapidement les problèmes mineurs, tels qu'une panne des instruments de mesure ou des problèmes liés aux installations.

Les instruments de mesure, notamment les compteurs de chaleur de la marque NeoVac qui fonctionnent par ultrasons, ont été démontés et vérifiés trois fois en tout au cours des quinze dernières années, par échantillonnage aléatoire, lors de la mise en œuvre de projets antérieurs. Tous les résultats étant compris entre les seuils de tolérance, la qualité des mesures répond donc aux exigences fondamentales définies pour l'analyse globale.

Les données de mesure ont été saisies dans les fichiers informatiques et analysées de façon échelonnée au fur et à mesure de l'arrivée des feuilles de données. L'analyse et l'évaluation de chaque installation n'ont eu lieu qu'une fois que tous les résultats étaient disponibles.

La démarche comportait quatre étapes principales:

- organisation des mesures et vérification des documents reçus, saisie des données disponibles dans les fichiers informatiques, analyse et évaluation des données;
- inspection des installations en cas de défaillance et de panne des équipements de mesure afin de rétablir le fonctionnement de l'installation;
- élaboration et envoi de lettres d'information aux propriétaires d'installations, avec remise d'une évaluation de leur propre installation;
- analyse des données relevées et de l'ensemble de l'échantillon d'installations, présentation des graphiques les plus pertinents dans un rapport.

Afin de pouvoir déterminer le coefficient de performance annuel, chaque installation a été munie de compteurs de chaleur, de compteurs électriques et de compteurs horaires; les propriétaires étaient chargés de relever les données à intervalles réguliers (chaque semaine ou mois) et de nous les communiquer. Les mécanismes directement enclenchés par la pompe à chaleur ont été pris en compte, de même que les pertes d'accumulation, selon la limite du bilan. En revanche, les équipements auxiliaires tels que les circulateurs de chauffage, etc. qui ne sont pas directement sollicités par le fonctionnement des pompes à chaleur et qui n'ont pas pu être enregistrés, ont été exclus dès le départ.

Les propriétaires ont été interrogés individuellement sur les coûts de maintenance et de réparation. L'expérience a montré que l'envoi d'un questionnaire ne permettait pas d'aboutir aux résultats escomptés. Au lieu de cela, nous avons interrogé les propriétaires des installations personnellement, également dans le but d'exclure les malentendus et les contradictions. Les coûts de maintenance et de réparation ont été pris en compte sur la base de justificatifs tels que rapports et factures, dans la mesure où ces derniers étaient disponibles.

## 1.6 Statistique des pompes à chaleur

Depuis que les premières analyses in situ ont été effectuées et que les coefficients de performance annuels (COPA) ont été déterminés (projet ANIS et projets ultérieurs AQ-PAC), les statistiques des pompes à chaleur tiennent compte pour toutes les installations des valeurs établies

sur la base de ces mesures plutôt que des coefficients de performance moyens antérieurs. Autrement dit, les résultats alimentent les Statistique globale suisse de l'énergie.

## 2 Analyse et résultats

Afin que les résultats des installations puissent être comparés avec ceux du projet ANIS antérieur, les échelles et les critères retenus sont restés les mêmes. Désormais, seul le COPA2 (cf. Fig. 3) a été déterminé et comparé dans le cadre de l'analyse des données.

Le COPA2 normalisé (nCOPA2) se distingue du COPA2 en ce qu'il est normalisé en fonction du climat. La procédure est relativement simple et consiste à relever la valeur correspondant à la température extérieure  $T_a = 3^\circ\text{C}$  sur la droite de régression des coefficients de performance constatés en mode de chauffage. Toutes les valeurs calculées de cette manière sont ainsi comparables entre elles, quelle que soit l'altitude des installations. La méthode a été décrite en détail dans le rapport ANIS. Les données analysées durant ces années montrent cependant que l'échantillon pris en compte, qui comprend plus de 90% d'installations situées sur le Plateau suisse, était peu sensible à cette normalisation. Les comparaisons des évaluations du nCOPA2 et du COPA2 viennent confirmer les analyses les plus récentes.

La limite de bilan pour le nCOPA2 tient compte non seulement de la pompe à chaleur, mais aussi des éventuelles pertes d'accumulation. D'autre part, le bilan énergétique du nCOPA2 inclut également le coût de l'énergie sollicitée par la pompe de charge de l'accumulateur ou, dans le cas des installations sans accumulateur, la part d'énergie requise par le débit massique dans le condenseur de la pompe à chaleur, ainsi que la totalité de la force exigée du côté de la source (pompe ou ventilateur).

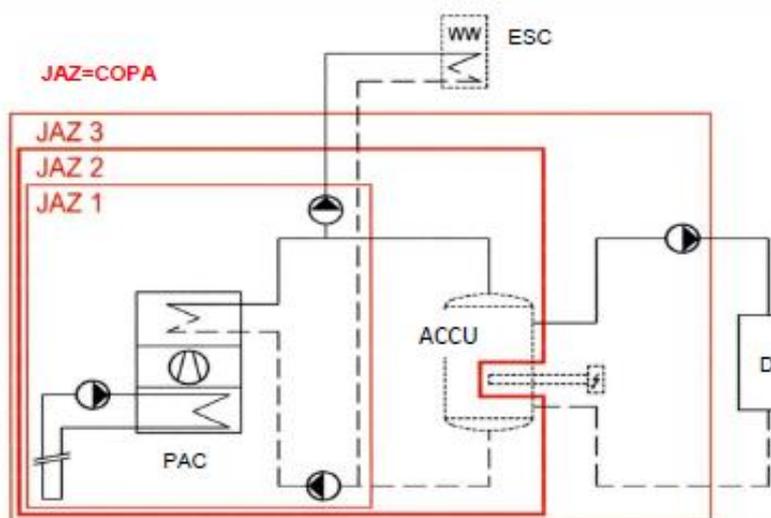


Fig. 3: Limites des systèmes utilisés pour l'évaluation des COPA 1, 2 et 3.

Seule la limite de bilan pour le COPA2, qui tient compte d'éventuelles pertes d'accumulation, a été considérée pour l'évaluation et la comparaison.

Pour les installations sans accumulateur, la consommation d'électricité des pompes de distribution (rejets de gaz) a été prise en compte en fonction des pertes de charge constatées au niveau du condenseur.

Les données de certaines installations relevées au cours de la première année de fonctionnement étaient incomplètes ou n'ont pas pu être prises en compte pour l'analyse pour d'autres raisons. Le cas échéant, lorsque la première année de fonctionnement ne permettait aucune analyse, c'est la deuxième année qui a été prise pour référence.

### 2.1 Analyse des coefficients de performance annuels COPA

Les COPA des 168 installations analysées dans le cadre de cet échantillon sont répartis en deux groupes principaux (installations sol-eau et air-eau). L'analyse et l'évaluation ont été réalisées d'une part au fil des années de fonctionnement et d'autre part en fonction du calendrier. Parmi ces installations, 159 faisaient encore partie de l'échantillon actif au terme du projet.

#### 2.1.1 Comparaison en fonction des années de fonctionnement

Les nCOPA établis étaient pratiquement identiques de la première à la onzième année de fonctionnement. Dès la 12<sup>e</sup> année cependant, on constate une réduction moyenne de quelque 6%.

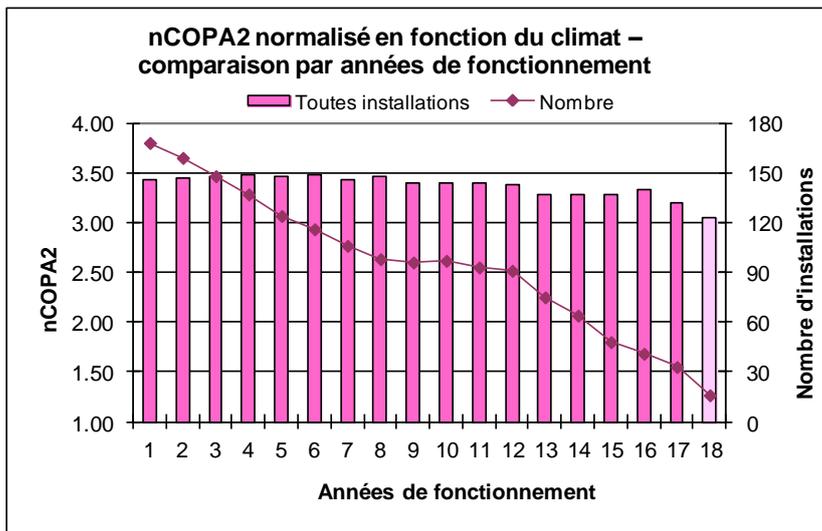


Fig. 4: Evolution du coefficient de performance annuel normalisé absolu (nCOPA<sub>2abs</sub>) au fil des années de fonctionnement

La 18<sup>e</sup> année n'est pas représentative en raison du nombre réduit d'installations.

Le faible COPA des installations plus anciennes (douze ans et plus) peut s'expliquer par l'absence de compresseur Scroll ou par la qualité moindre des premiers modèles installés dans ces pompes à chaleur. D'autre part, il est bien connu que sur les anciennes pompes à chaleur équipées de compresseurs à piston, l'usure des joints d'étanchéité, etc. est plus importante et qu'il faut donc s'attendre à ce que le vieillissement soit davantage perceptible.

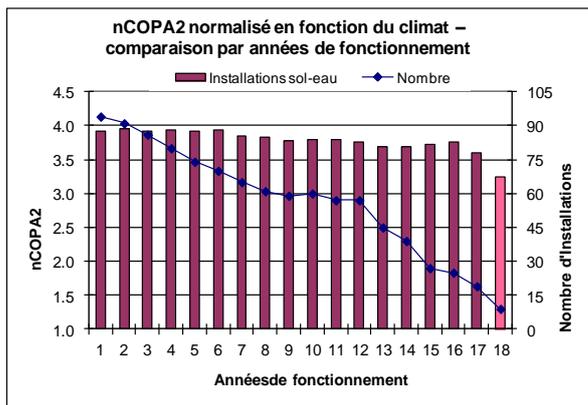


Fig. 5: Evolution pour l'échantillon partiel des installations sol-eau

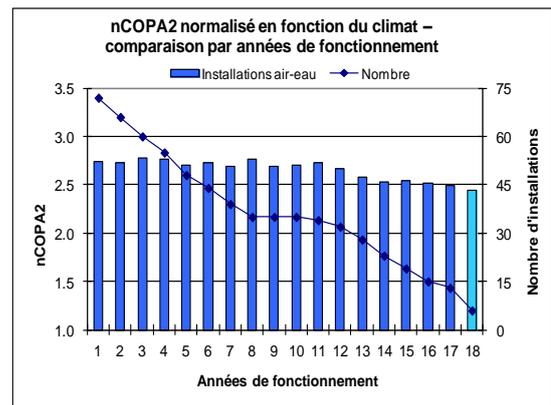


Fig. 6: Evolution pour l'échantillon partiel des installations air-eau

Ci-dessous sont représentés les coefficients annuels et le nombre d'installations évaluées dans le cadre de l'analyse pour les pompes air-eau et sol-eau.

Tableau 3: nCOPA2 par année de fonctionnement pour les différentes sources de chaleur

| Source PAC           | Années de fonctionnement | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   |
|----------------------|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Air extérieur        | nCOPA2 Air ext           | 2.74 | 2.73 | 2.77 | 2.77 | 2.71 | 2.73 | 2.69 | 2.77 | 2.69 | 2.70 | 2.73 | 2.67 | 2.57 | 2.53 | 2.54 | 2.52 | 2.49 | 2.44 |
|                      | Σ Installations          | 72   | 66   | 60   | 55   | 48   | 44   | 39   | 35   | 35   | 35   | 34   | 32   | 28   | 23   | 19   | 15   | 13   | 6    |
| Sondes géothermiques | nCOPA2 SGV               | 3.92 | 3.95 | 3.92 | 3.94 | 3.92 | 3.93 | 3.85 | 3.82 | 3.78 | 3.79 | 3.79 | 3.76 | 3.69 | 3.69 | 3.72 | 3.76 | 3.60 | 3.25 |
|                      | Σ Installations          | 94   | 91   | 86   | 80   | 74   | 70   | 65   | 61   | 59   | 60   | 57   | 57   | 45   | 39   | 27   | 25   | 19   | 9    |

Comme mentionné précédemment, la normalisation des nCOPA2 relève d'une procédure simple décrite au chapitre 2. A titre de comparaison, le graphique dans lequel figurent toutes les installations et le COPA2 non normalisé est également inclus dans le rapport.

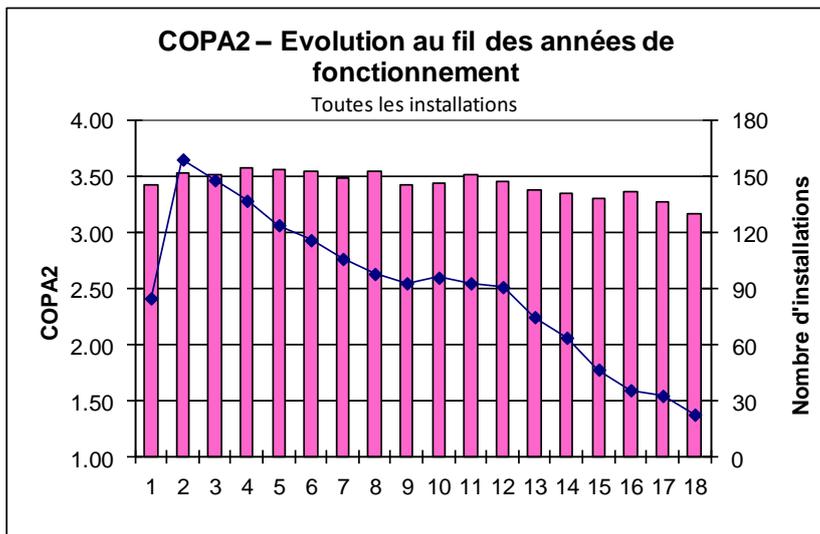


Fig. 7: Evolution du coefficient de performance annuel absolu (COPA2<sub>abs</sub>) au fil des années de fonctionnement

Les valeurs médianes des deux graphiques comparés (Fig. 4 et Fig. 7) sont très proches. Le nCOPA2 moyen se situe à 3,37 (sur 18 ans), le COPA2 non normalisé à 3,42 (sur 18 ans). Comme évoqué précédemment, ce rapprochement s'explique par le fait que la plupart des installations sont situées sur le Plateau suisse à une altitude comprise entre 400 et 500 m, ce qui est très proche de la valeur médiane normée suisse.

### 2.1.2 Comparaison en fonction du calendrier

L'évolution des nCOPA2 au fil des ans (en fonction du calendrier) reflète les valeurs et les observations déjà publiées dans le cadre du projet ANIS précédent. Après une phase (années 1995-2000) durant laquelle les COPA ont progressé chaque année, les valeurs se sont stabilisées dès la période de chauffage 2000/2001 et ont stagné jusqu'à ce jour. Ce constat n'est pas forcément logique. Les Figures 8 à 10 (comparaison en fonction du calendrier, période de chauffage) confirment les résultats de l'analyse au fil des années de fonctionnement; ils démontrent clairement que durant les premières années (1995 à 1999), l'efficacité des installations a progressé chaque année.

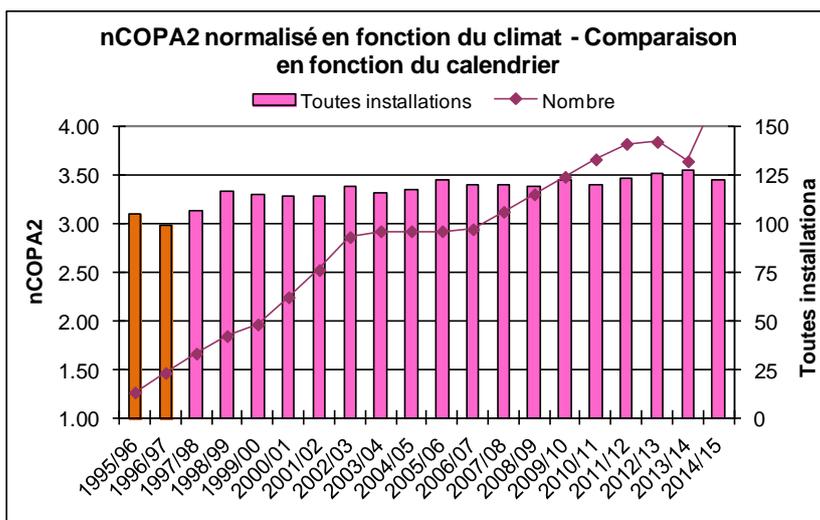


Fig. 8: Evolution du coefficient de performance annuel normalisé absolu (nCOPA2<sub>abs</sub>) en fonction du calendrier

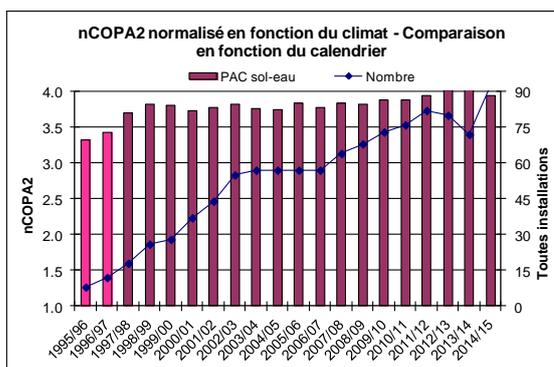


Fig. 9: Evolution pour l'échantillon partiel des installations sol-eau

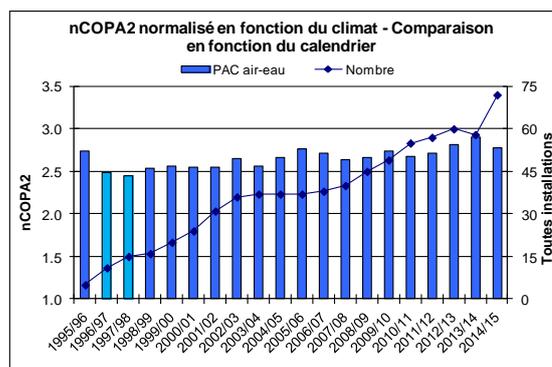


Fig. 10: Evolution pour l'échantillon partiel des installations air-eau

Un nouveau développement serait réellement souhaitable dans le domaine des petites pompes à chaleur. Dans ce domaine, les modèles à régulation de puissance (inverter) sont peu prometteurs. Reste qu'une analyse in situ distincte<sup>1</sup> montre que les équipements n'ont pas encore atteint le niveau standard escompté et que par conséquent, l'efficacité ne progresse pas de façon décisive.

### 2.1.3 Comparaison des nouvelles constructions et des rénovations

Un examen de l'échantillon d'installations selon les catégories des nouvelles constructions et des rénovations fournit plusieurs éléments intéressants.

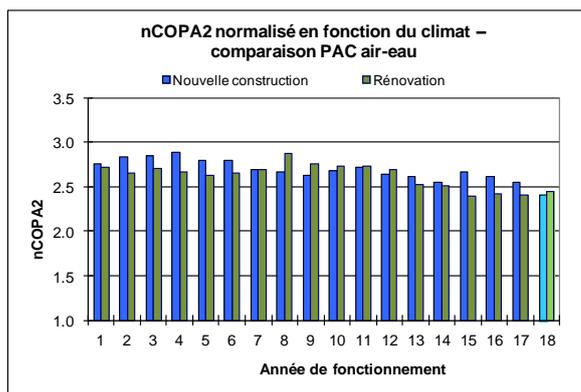


Fig. 11: Echantillon partiel air extérieur/nouvelles constructions

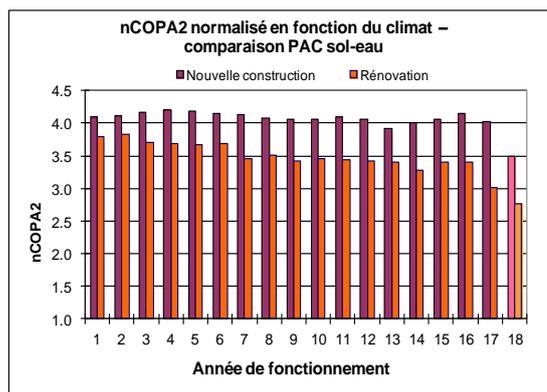


Fig. 12: Echantillon partiel PAC sol-eau/rénovations

Les différences entre les pompes à chaleur air-eau dans la catégorie des nouvelles constructions et celles dans la catégorie des rénovations sont modestes. La situation est tout autre pour les installations sol-eau, où l'écart entre les nouvelles constructions et les rénovations est significatif (environ moins 15%).

### 2.1.4 Influence de l'accumulateur en découplage hydraulique et de la température de planification

L'accumulation de l'énergie thermique à un bas niveau de température, comme le font les installations avec pompe à chaleur actuelles, ne permet d'accumuler que peu d'énergie. D'une part, un accumulateur d'une contenance de 1000 litres ne permet d'accumuler qu'environ 11,5 kWh pour une hausse de la température de 10K, ce qui ne permet de couvrir qu'à peine deux heures de fonctionnement; d'autre part, lorsque la pompe à chaleur fonctionne avec une température de départ de 10K supplémentaire, l'efficacité régresse de 10 à 15%.

L'importance du contenu de l'installation est secondaire, car si la contenance est trop faible, la pompe à chaleur s'enclenchera plus souvent. En revanche, dans les cas où un chauffage au sol joue le rôle d'accumulateur, cela ne pose jamais problème. En conséquence, un accumulateur

<sup>1</sup> Projet de l'OFEN «Mesures in situ sur pompes à chaleur à régulation de puissance et sur chauffe-eau pompe à chaleur»

technique s'impose dès lors que la contenance du système de chauffage est trop faible. Le cas échéant, il est recommandé d'y intégrer un petit accumulateur d'une contenance variant entre 50 et 300 litres.

Afin de couvrir des temps de blocage de deux à quatre heures, les installations munies de corps de chauffe (radiateurs, murs chauffants) devraient être équipées d'un accumulateur technique découplé du circuit hydraulique d'une contenance de 500 à 1000 litres. S'il ne permet pas de compenser toute l'énergie requise durant le temps de blocage, il retarde le refroidissement de l'eau de chauffage. Néanmoins, il est déconseillé de trop augmenter la température de chauffage pour couvrir les temps de blocage afin de ne pas diminuer l'efficacité de la pompe à chaleur.

Tableau 4: Influence des accumulateurs techniques sur l'efficacité

| PAC/source de chaleur | Système de diffusion de chaleur | Accumulateur technique | Contenance moyenne | nCOPA | Nombre d'installations |
|-----------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------|-------|------------------------|
| Sol-eau               | Radiateur                       | avec                   | 588                | 3.85  | 15                     |
|                       | Chauffage au sol                | avec                   | 479                | 3.98  | 14                     |
|                       | Chauffage au sol                | sans                   |                    | 4.30  | 40                     |
| Air-eau               | Radiateur                       | avec                   | 660                | 2.65  | 15                     |
|                       | Chauffage au sol                | avec                   | 562                | 2.86  | 48                     |
|                       | Chauffage au sol                | sans                   |                    | 2.75  | 9                      |

Lorsqu'il s'agit de planifier une installation, le fonctionnement du système de diffusion de chaleur est essentiel pour assurer un fonctionnement dans des conditions normales. Dans ce contexte, l'inertie du système est importante pour la régulation et la fréquence des enclenchements. Dans le cas des chauffages au sol intégrés dans une chape (mortier), c'est précisément ce revêtement qui fait office de masse d'accumulation et peut être utilisé à des fins de régulation. Une régulation en fonction de la température de retour s'avère avantageuse pour ce type d'installation. En l'absence d'une telle masse d'accumulation, le volume d'eau contenu dans une installation devrait être accru par le biais d'un accumulateur technique découplé du système hydraulique, faute de quoi les durées de fonctionnement risquent d'être trop brèves (surtout durant la mi-saison).

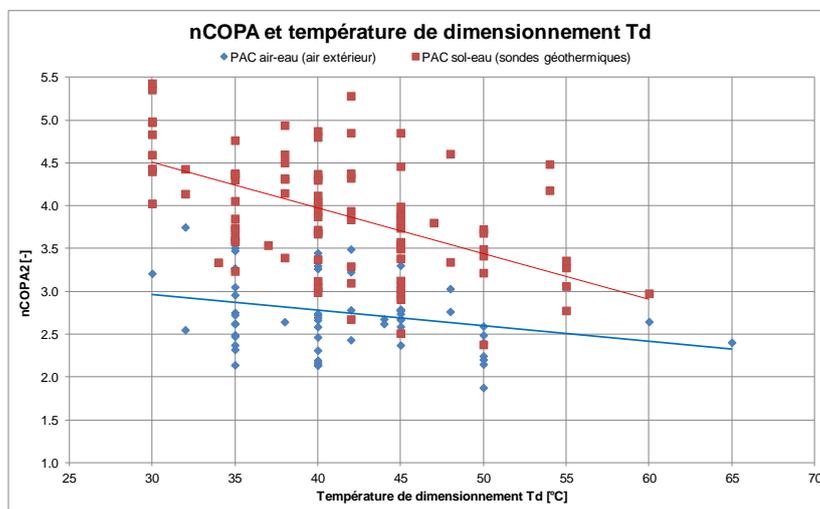


Fig. 13: nCOPA2 et température de dimensionnement Td des installations air-eau et sol-eau

La température de départ du condenseur nécessaire pour chauffer une pièce (courbe de chauffage) influence fortement l'efficacité des pompes à chaleur. Il faut donc éviter de définir des courbes de chauffage excessives qui pourraient, par exemple, constituer un dépôt dans l'accumulateur du chauffage. Pour chaque hausse de la température de 1K, l'efficacité de la pompe à chaleur diminue d'environ 1,5 à 2%.

## 2.2 Comparaison des heures de fonctionnement

Les heures de fonctionnement d'une pompe à chaleur fournissent des informations intéressantes sur le dimensionnement de l'installation. Les régulateurs de la plupart des pompes à chaleur permettent un relevé direct des heures de fonctionnement, ainsi que de la fréquence des enclen-

chements de la pompe à chaleur (compresseur). Les valeurs indiquées dans la brochure de l'OFEN «Garantie de performance - Installations techniques» en vue de définir la capacité de chauffage sont des valeurs de consigne. Pour les projets de rénovation en particulier, les durées de fonctionnement en plein régime indiquées dans la brochure représentent une directive importante pour le dimensionnement de la capacité de chauffage de la pompe à chaleur.

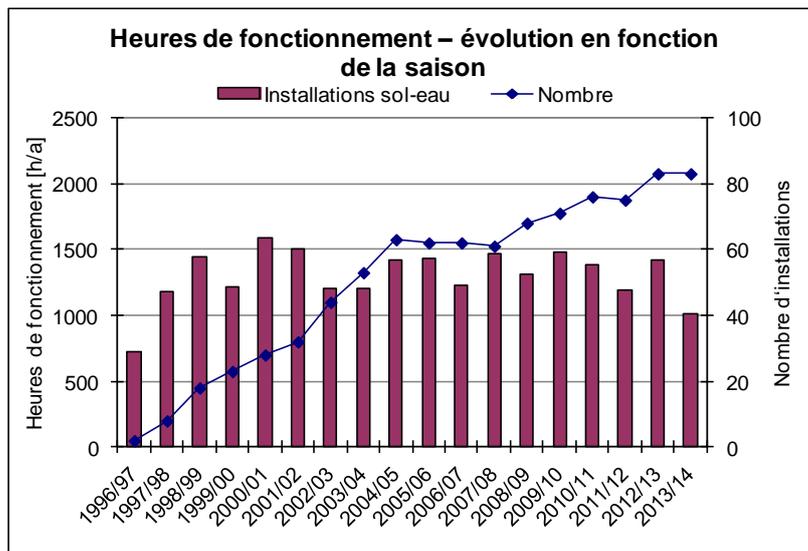


Fig. 14: Evolution des heures de fonctionnement des installations sol-eau, selon la saison

La durée de fonctionnement a son importance notamment pour les installations dotées d'une pompe à chaleur sol-eau. D'une part, la capacité de chauffage doit être maintenue à la température admise; d'autre part, l'énergie retirée de la source de chaleur doit être respectée, respectivement ne doit pas être excessive. La norme SIA 384/6 (entrée en vigueur en 2010) définit des valeurs limites en la matière. La sollicitation excessive d'installations de sondes géothermiques pose problème à long terme lorsque l'énergie ambiante dans le sol n'est plus en équilibre, ou lorsque la source de chaleur ne peut plus se régénérer. Le cycle annuel de ce processus n'est pas très facile à reconstituer sans calcul de simulation.

Les directives liées au dimensionnement de l'installation de captage au moyen de sondes géothermiques sont basées sur les heures de fonctionnement définies dans l'ancienne garantie de performance de l'OFEN (version antérieure à 2010), soit au maximum 2000 [h/a] sans production d'ECS, et 2300 [h/a] avec production d'ECS. Les valeurs liées aux heures de plein régime ont été corrigées à la hausse dans la norme SIA 384.1 et s'élèvent désormais à 2300 [h/a] pour le seul régime de chauffage, et à 2700 [h/a] pour le chauffage avec production d'eau chaude sanitaire.

Les valeurs définies pour les installations équipées d'une sonde géothermique sont précisées dans la norme SIA 384/6. Les heures de fonctionnement annuel sur lesquelles se base la norme sont définies en nombre plus modeste, soit 1850 [h/a]. Cette divergence entre les deux normes est inopportune. Lorsqu'il s'agit de dimensionner une pompe à chaleur, il est essentiel de gommer ces divergences entre les deux normes. La norme SIA 384/6 est entrée en vigueur en 2010 pour cinq ans. Elle devrait donc faire l'objet d'un examen critique et, le cas échéant, être remaniée.

Le calcul de la capacité de chauffage débouche par conséquent (sur la base de la norme SIA 384.1) sur le choix d'une pompe à chaleur plus petite, et donc également sur des sondes géothermiques plus courtes. L'énergie tirée du sous-sol n'en diminue pas pour autant, étant donné que le bâtiment à chauffer reste le même. En revanche, comme la capacité de la pompe à chaleur est plus petite et que les sondes géothermiques sont plus courtes, la performance de captage des sondes augmente. Dans la pratique, cependant, les durées de fonctionnement frisant la limite supérieure sont rares.

La Figure 14 montre clairement que les directives liées au dimensionnement des sondes géothermiques définies dans la norme SIA 384/6 sont respectées. La plupart des valeurs annuelles sont inférieures à 2000 heures de fonctionnement par an. Cependant, il est très important que les heures de sollicitation des pompes à chaleur sol-eau n'aboutissent pas à un soutirage excessif d'énergie du sous-sol, qui provoquerait un refroidissement du terrain autour de la sonde. Reste que certaines installations ont totalisé jusqu'à 3000 heures de fonctionnement par an.

Ce nombre n'a pas la même signification pour les pompes air-eau, pour lesquelles la capacité de chauffage maximale à la température admise est seule déterminante pour le dimensionnement.

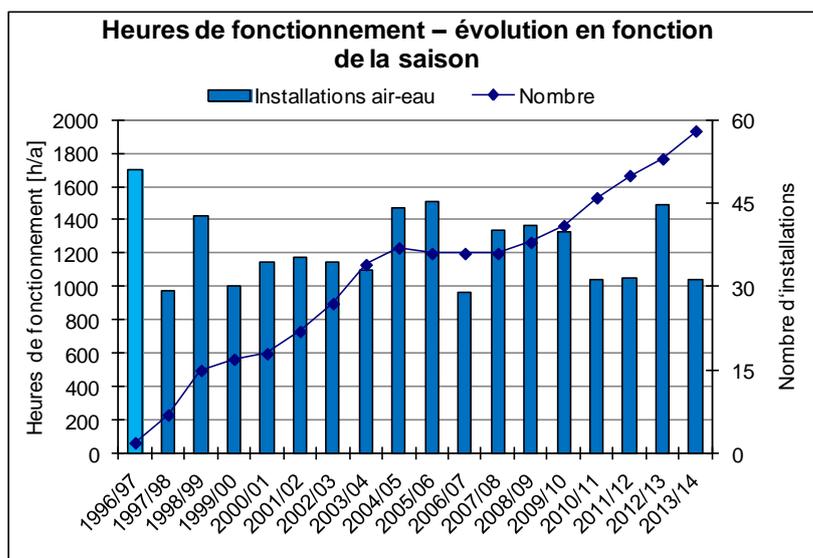


Fig. 15: Evolution des heures de fonctionnement des installations sol-eau, en fonction de la saison

Tableau 5: Heures de fonctionnement niveau 1, en fonction de la saison, des différentes sources de chaleur

| Source de chaleur PAC | Années de fct.  | 1996/97 | 1997/98 | 1998/99 | 1999/00 | 2000/01 | 2001/02 | 2002/03 | 2003/04 | 2004/05 | 2005/06 | 2006/07 | 2007/08 | 2008/09 | 2009/10 | 2010/11 | 2011/12 | 2012/13 | 2013/14 | 2014/15 |
|-----------------------|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Air extérieur         | Heures de fct.  | 1656    | 391     | 1022    | 1037    | 1316    | 1386    | 1272    | 1249    | 1450    | 1328    | 864     | 1444    | 1347    | 1415    | 1069    | 1066    | 1428    | 1189    | 1131    |
|                       | Σ Installations | 2       | 7       | 14      | 16      | 17      | 22      | 27      | 34      | 37      | 37      | 37      | 37      | 39      | 43      | 47      | 50      | 53      | 60      | 54      |
| Sondes géothermiques  | Heures de fct.  | 968     | 768     | 1509    | 1065    | 1635    | 1527    | 1137    | 1097    | 1404    | 1409    | 1199    | 1416    | 1256    | 1467    | 1318    | 1050    | 1454    | 1179    | 933     |
|                       | Σ Installations | 5       | 9       | 15      | 20      | 26      | 28      | 40      | 49      | 58      | 58      | 58      | 57      | 64      | 67      | 72      | 74      | 83      | 84      | 73      |

Les heures de fonctionnement n'ont pas la même importance pour les pompes à chaleur air-eau (cf. Fig. 15). Les données analysées montrent que les recommandations de l'OFEN ont elles aussi été respectées lors du dimensionnement.

Tableau 6: Heures de fonctionnement niveau 2, en fonction de la saison, des différentes sources de chaleur

| Source de chaleur PAC | Années de fct.  | 1996/97 | 1997/98 | 1998/99 | 1999/00 | 2000/01 | 2001/02 | 2002/03 | 2003/04 | 2004/05 | 2005/06 | 2006/07 | 2007/08 | 2008/09 | 2009/10 | 2010/11 | 2011/12 | 2012/13 | 2013/14 | 2014/15 |
|-----------------------|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Air extérieur         | Heures de fct.  |         | 66      | 265     | 922     | 472     | 686     | 294     | 753     | 571     | 613     | 1050    | 979     | 179     | 833     | 776     | 41      | 93      | 829     | 836     |
|                       | Σ Installations |         | 2       | 2       | 2       | 2       | 3       | 3       | 3       | 3       | 3       | 3       | 3       | 2       | 3       | 3       | 2       | 3       | 4       | 4       |
| Sondes géothermiques  | Heures de fct.  |         |         |         | 341     | 346     | 353     | 344     | 355     | 376     | 358     | 292     | 283     | 263     | 26      | 263     | 267     | 245     | 29      |         |
|                       | Σ Installations |         |         |         | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       |         |

L'analyse du niveau 2 n'est pas pertinente, puisque l'échantillon ne comprend que quatre pompes à chaleur air-eau et une seule pompe à chaleur sol-eau. Il est à noter que les nombreuses heures d'exploitation sont à mettre sur le compte de deux installations seulement (pompes à chaleur air-eau).

### 2.3 Analyse de la production de chaleur

La production de chaleur moyenne des pompes à chaleur contenues dans l'échantillon d'installations analysé atteint environ  $Q_a = 17\ 000$  [kWh/an] pour les pompes à chaleur sol-eau et  $Q_a = 15\ 600$  [kWh/an] pour les pompes à chaleur air-eau.

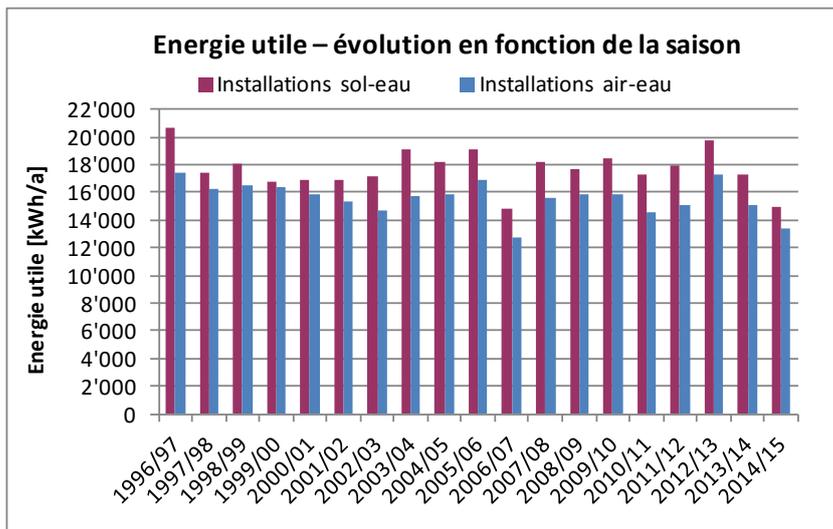


Fig. 16: Evolution de la production de chaleur moyenne, en fonction de la saison

## 2.4 Analyse de la consommation d'énergie électrique

La consommation moyenne d'énergie électrique des pompes à chaleur contenues dans l'échantillon analysé s'élève à environ  $P_{el-a} = 5\,100$  [kWh/an] pour les pompes à chaleur sol-eau et à quelque  $P_{el-a} = 5\,730$  [kWh/an] pour les pompes à chaleur air-eau.

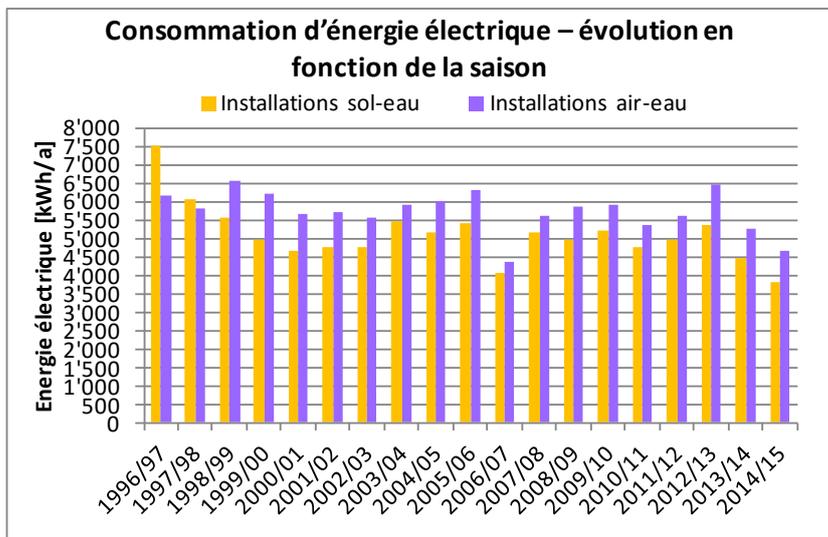


Fig. 17: Evolution de la consommation d'énergie électrique moyenne, en fonction de la saison

## 2.5 Amélioration de l'efficacité - comparaison des meilleures installations

Une comparaison des meilleures installations qui, dans les cas des pompes à chaleur sol-eau atteignent un nCOPA2 entre 5,5 et 5,8, montre que leur efficacité peut encore être améliorée. Si dans l'ensemble, 22 des 96 pompes à chaleur sol-eau atteignent un nCOPA moyen supérieur à 4,50, seules sept des 71 installations air-eau atteignent une valeur de 3,5 et plus.

L'exemple des meilleures installations prouve que l'efficacité ne dépend pas seulement de la pompe à chaleur, mais de l'installation dans son ensemble. Les principaux éléments et directives sont énumérés ci-après, sans garantie d'exhaustivité.

- Pompe à chaleur présentant de bonnes conditions, munie du label de qualité, COP élevé pour tous les modes de fonctionnement.
- Dimensionnement correct des performances et des éléments, comme par exemple des pompes de circulation.
- Choix du bon raccordement hydraulique (schéma hydraulique), aussi simple que possible.
- Dimensionnement correct de la source de chaleur, notamment dans le cas des sondes géothermiques selon la norme SIA 384/6.
- Ecart de température de la pompe à chaleur le plus faible possible, soit températures de chauffage aussi basses que possible.

- Mise en service correctement effectué, notamment définition et réglage des paramètres d'exploitation, des débits massiques, etc.
- Contrôle de l'installation au bout d'un ou deux ans de fonctionnement à des fins d'optimisation.

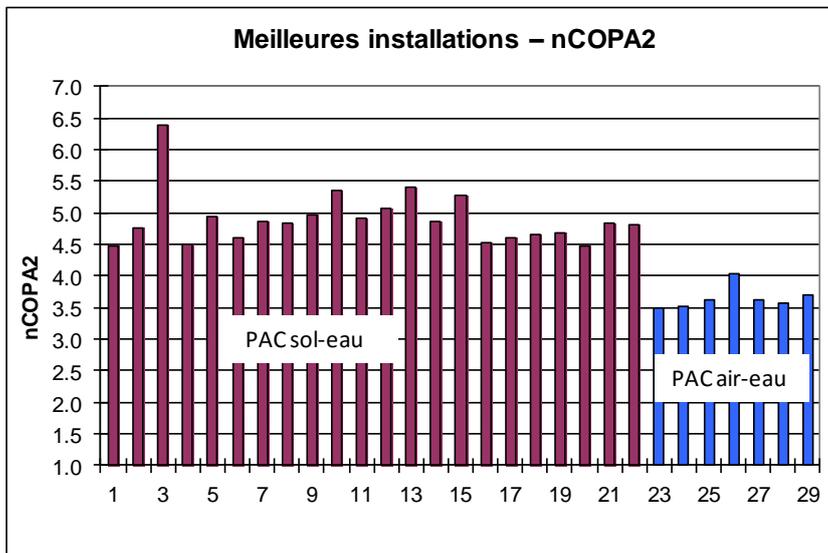


Fig. 18: Meilleures installations avec coefficients de performance annuels (nCOPA<sub>2abs</sub>) ≥ 4,50 pour les pompes à chaleur sol-eau et ≥ 3,50 pour les pompes à chaleur air-eau

L'installation 3 est optimale sur tous les plans pour le chauffage comme pour la production d'ECS.

Le Groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur GSP a reconnu et est en passe d'introduire le fameux Pompes à chaleur système–module<sup>2</sup>; celui-ci aborde précisément ces points faibles et définit les directives et conditions cadres permettant d'améliorer la qualité des installations.

## 2.6 Comparaison des COP sur la base de la méthode de calcul PACesti

La méthode de calcul PACesti, qui permet de déterminer le coefficient de performance (COP) d'une installation, a été validée et comparée pour vingt installations grâce aux solides connaissances sur leur fonctionnement in situ.

La nouvelle méthode PACesti, disponible depuis 2012 dans une version entièrement remaniée et qui peut être téléchargée sur le site de l'EnDK (Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie), aboutit à d'excellents résultats (<http://www.endk.ch/fr/professionnels/outils>).

Cet outil de calcul est également utilisé par Minergie et par différents services de promotion (par exemple *Stromsparfonds* de la ville de Zurich) pour établir le COP.

Tableau 7: Ecart moyen entre les valeurs réelles et les calculs selon PACesti

| COPA total | Production de chaleur | Consommation électrique | Durée de marche |
|------------|-----------------------|-------------------------|-----------------|
| -1.3 %     | 1.3 %                 | 0.3 %                   | -3.0 %          |

<sup>2</sup> PAC système-module GSP. Pour plus d'informations, consulter le site [www.wp-systemmodul.ch/fr](http://www.wp-systemmodul.ch/fr)

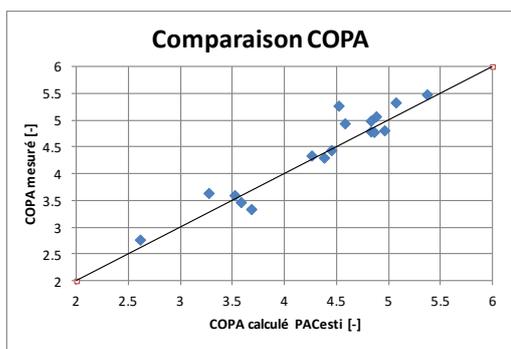


Fig. 19: Comparaison du COP

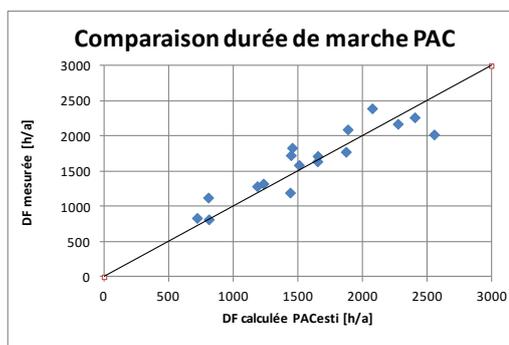


Fig. 20: Comparaison de la durée de marche

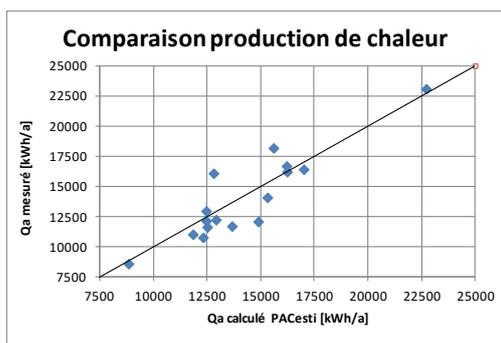


Fig. 21: Comparaison de la production de chaleur

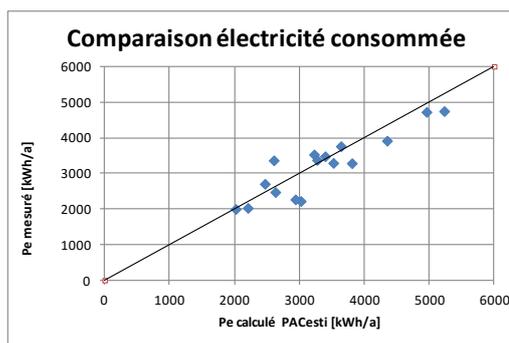


Fig. 22: Comparaison de la consommation d'électricité

Les différentes comparaisons se recouvrent bien - voire très bien - non seulement pour le calcul du COP, mais aussi en ce qui concerne les heures de fonctionnement, les calculs énergétiques, l'énergie utile et la consommation d'électricité.

Tableau 8: Résultats des différentes installations comparées

| N° | COPA total |        |        | Production de chaleur |        | Consommation d'électricité |        | Durée de marche |        |
|----|------------|--------|--------|-----------------------|--------|----------------------------|--------|-----------------|--------|
|    | PACesti    | mesuré | Ecart  | PACesti               | mesuré | PACesti                    | mesuré | PACesti         | mesuré |
| 1  | 4.38       | 4.79   | 0.84   | 12452                 | 12963  | 2467                       | 2705   | 1888            | 2095   |
| 2  | 4.26       | 4.34   | -1.84  | 12311                 | 10771  | 2628                       | 2475   | 1186            | 1288   |
| 3  | 3.52       | 3.6    | -2.22  | 15310                 | 14087  | 4349                       | 3915   | 1441            | 1197   |
| 4  | 4.38       | 4.3    | 1.86   | 8831                  | 8595   | 2018                       | 1999   | 720             | 837    |
| 5  | 4.96       | 4.81   | 3.12   | 16229                 | 16220  | 3272                       | 3375   | 1653            | 1641   |
| 6  | 3.68       | 3.34   | 10.18  | 12503                 | 11633  | 3395                       | 3478   | 807             | 1127   |
| 7  | 3.58       | 3.47   | 3.17   | 12910                 | 12237  | 3225                       | 3529   | 1655            | 1717   |
| 8  | 4.86       | 4.78   | 1.67   | 12798                 | 16084  | 2604                       | 3364   | 2557            | 2023   |
| 9  | 4.88       | 5.07   | -3.75  | 25570                 | 24042  | 5229                       | 4746   | 2407            | 2266   |
| 10 | 4.45       | 4.44   | 0.23   | 16203                 | 16689  | 3638                       | 3762   | 1874            | 1777   |
| 11 | 2.61       | 2.77   | -5.78  | 15593                 | 18184  | 5934                       | 6223   | 1457            | 1834   |
| 12 | 5.17       | 4.85   | 6.6    | 13656                 | 13100  | 2642                       | 2987   | 811             | 905    |
| 13 | 4.83       | 4.99   | -3.21  | 17004                 | 16415  | 3521                       | 3292   | 2276            | 2174   |
| 14 | 5.07       | 5.33   | -4.88  | 14880                 | 12086  | 2937                       | 2269   | 1234            | 1325   |
| 15 | 3.27       | 3.64   | -10.16 | 12455                 | 12146  | 3807                       | 3285   | 1510            | 1590   |
| 16 | 5.37       | 5.48   | -2.01  | 11837                 | 11030  | 2205                       | 2029   | 1447            | 1728   |
| 17 | 4.58       | 4.94   | -7.29  | 22717                 | 23085  | 4957                       | 4723   | 2077            | 2394   |
| 18 | 3.26       | 3.59   | -9.19  | 24300                 | 24080  | 7417                       | 6708   | 2045            | 1835   |
| 19 | 5.11       | 5.31   | -0.39  | 17253                 | 20424  | 3375                       | 4418   | 1561            | 2020   |
| 20 | 3.14       | 3.23   | -2.79  | 25363                 | 21200  | 7408                       | 6310   | 2075            | 2451   |
| 21 | 4.76       | 4.5    | 5.78   | 35721                 | 36600  | 7428                       | 8620   | 1655            | 1530   |
| 22 | 3.87       | 3.94   | -1.78  | 24226                 | 23500  | 5928                       | 5903   | 2438            | 2170   |

Dans sa nouvelle version, la méthode peut également être utilisée pour les grandes installations. Les données techniques de la pompe à chaleur peuvent alors être saisies directement. Celles concernant les petites installations plus courantes peuvent être téléchargées à partir d'une banque de données, qui contient déjà les données de plus de 500 petites pompes à chaleur de différents fabricants.

## 2.7 Analyse des pannes (disponibilité des pompes à chaleur)

La sécurité du fonctionnement des pompes à chaleur fait l'objet d'analyses depuis le projet ANIS. Les résultats obtenus ont toujours été et sont toujours très favorables. Sur ce plan, la divergence entre les pompes à chaleur sol-eau et les pompes à chaleur air-eau est très faible.

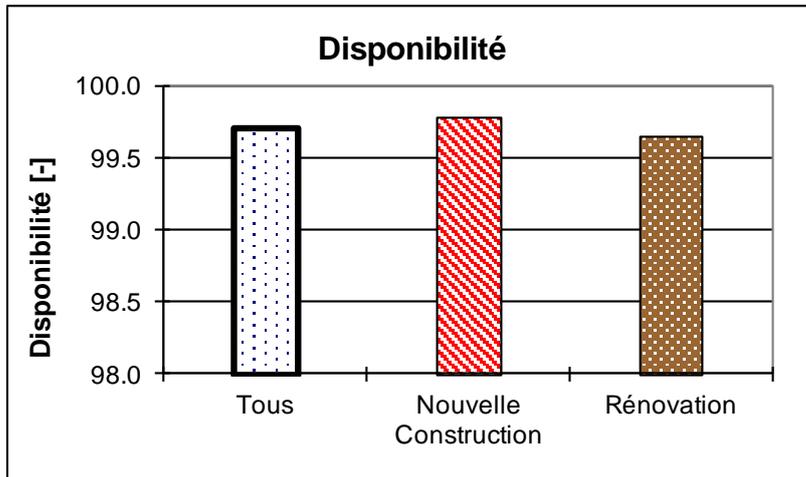


Fig. 23: Disponibilité des pompes à chaleur (échantillon total), ainsi que dans les catégories des nouvelles constructions et des rénovations

Le Tableau 9 ci-après fournit de plus amples informations sur le nombre d'heures de fonctionnement et la durée des pannes, pour l'ensemble de l'échantillon ou certaines catégories (nouvelles constructions et rénovations, pompes à chaleur sol-eau et air-eau).

Tableau 9: Analyse des pannes dans différentes catégories

| Panne             | Tous      | Nouvelle Construction |           | Rénovation |           |
|-------------------|-----------|-----------------------|-----------|------------|-----------|
|                   |           | Air-eau               | Sol-eau   | Air-eau    | Sol-eau   |
| DF total [h]      | 2'754'078 | 1'297'400             | 1'456'677 | 1'001'998  | 1'604'900 |
| Panne [h]         | 7'887     | 2'783                 | 5'104     | 5'811      | 1'722     |
| Disponibilité [%] | 99.714    | 99.786                | 99.651    | 99.423     | 99.893    |

La détermination de la disponibilité consiste à détecter et enregistrer une panne dès lors que l'installation n'est plus effective, c'est à dire lorsque la pompe à chaleur ne peut pas produire d'énergie thermique. Il est intéressant de relever que la disponibilité dépasse de loin 99% dans toutes les catégories, y compris les pompes à chaleur air-eau. Faisant état d'un écart de moins de 0,2%, les installations aménagées dans des objets à rénover font également bonne figure.

## 3 Observations et expériences

### 3.1 Distribution de chaleur optimisée

Le système de distribution de chaleur dans un bâtiment vieux de treize ans a été renouvelé en 2014 et partiellement remplacé par un chauffage au sol. La température de départ maximale nécessaire a ensuite baissé de 10K. Même l'ancienne installation de pompe à chaleur a promptement réagi à ces mesures: l'efficacité a augmenté d'environ 35% (températures de chauffage plus basses et fonctionnement optimisé).

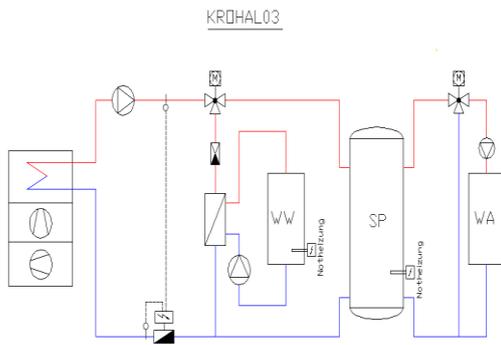


Fig. 24: Schéma hydraulique

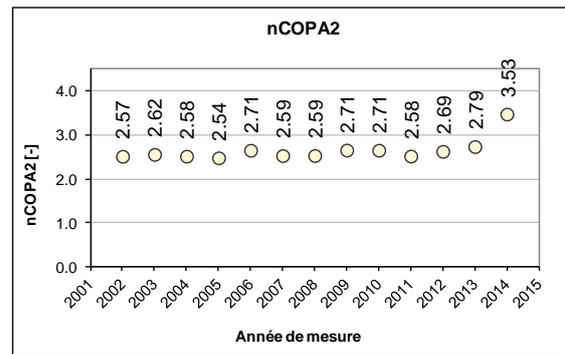


Fig. 25: Evolution du coefficient de performance au fil des années

### 3.2 Installation fonctionnant au propane

L'efficacité de cette pompe à chaleur sol-eau a régressé d'année en année dès 2005 si bien que le compresseur a dû être remplacé en 2008. Le nouveau compresseur utilise également du propane en tant que fluide frigorigène. Néanmoins, il est évident que même avec ce second compresseur, l'efficacité se détériore année après année; elle a baissé d'environ 15% en sept ans.

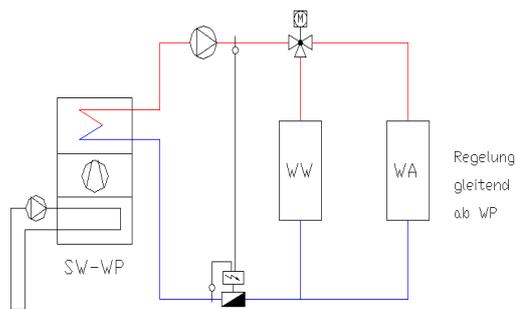


Fig. 26: Schéma hydraulique

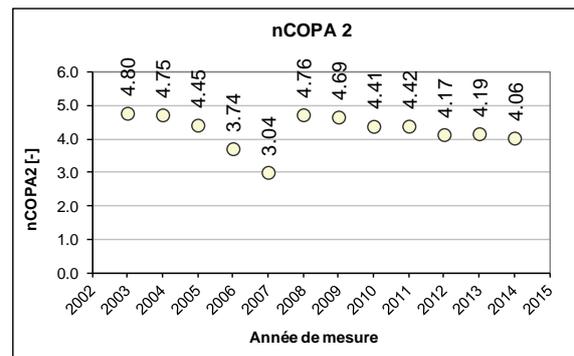


Fig. 27: Evolution du coefficient de performance au fil des années

En tant que fluide frigorigène naturel, le propane constitue une solution adéquate, aussi bien sur le plan de la protection de l'environnement que pour ce qui concerne le processus de refroidissement. Les problèmes rencontrés sont connus depuis longtemps et sont liés à la recherche d'un lubrifiant approprié pouvant être utilisé dans le circuit de refroidissement. Il y a bon espoir que les problèmes encore existants puissent être résolus et que ce fluide frigorigène puisse à l'avenir s'imposer sur le marché des pompes à chaleur.

### 3.3 Installation fortement surdimensionnée

Cette installation est fortement surdimensionnée. Elle totalise entre 830 et 1000 heures de fonctionnement par année, d'où un coefficient de performance - moins élevé - d'environ 4,36.

L'évaluation de la consommation énergétique en présence d'installations nouvelles requière une précision et une exactitude maximales pour éviter l'ajout d'une «marge de sécurité». Lorsque la performance de la pompe à chaleur s'avère tout juste insuffisante, il est en règle générale possible d'opter pour le plus petit modèle.

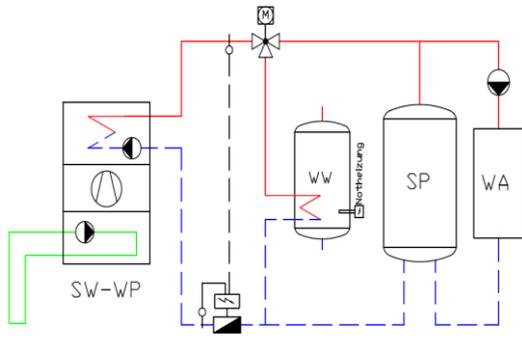


Fig. 28: Schéma hydraulique

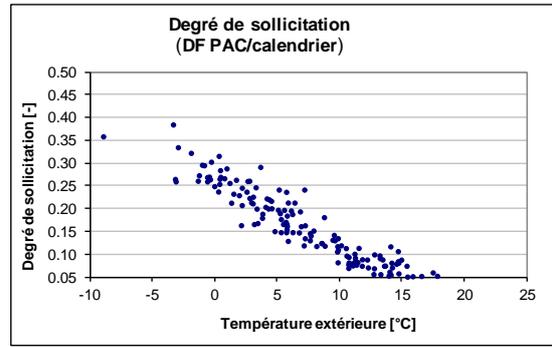


Fig. 29: Evolution du degré de charge en fonction de la température extérieure

### 3.4 Installation avec collecteurs de chaleur enterrés

Lorsque les collecteurs de chaleur sont correctement dimensionnés, ce type de pompe à chaleur fonctionne lui aussi sans problème pendant longtemps. Comme cette installation utilise encore le fluide frigorigène R22, le fonctionnement du circuit de refroidissement n'est plus assuré sans remplacement de ce fluide.

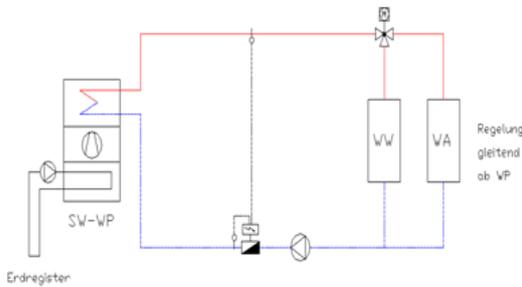


Fig. 30: Schéma hydraulique

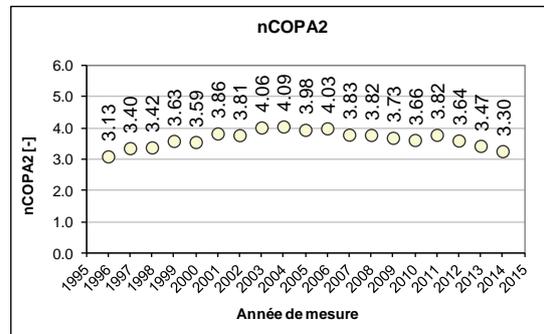


Fig. 31: Evolution du coefficient de performance au fil des années

### 3.5 Pompe à chaleur à régulation de puissance (inverter) avec sondes géothermiques

En 2014, nous avons pu intégrer une pompe à chaleur sol-eau dotée d'un mécanisme de régulation dans l'échantillon d'installations. Cette machine fonctionne de manière optimale. Nous avons notamment constaté que le coefficient de performance ne diminue pas en cas d'augmentation des températures extérieures. La durée de fonctionnement par enclenchement est nettement plus longue que pour le fonctionnement en mode marche/arrêt.

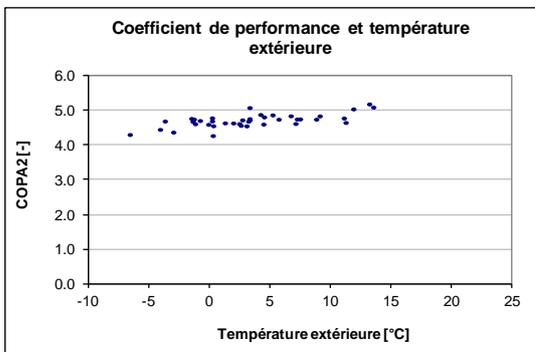


Fig. 32: Evolution du coefficient de performance en fonction de la température extérieure

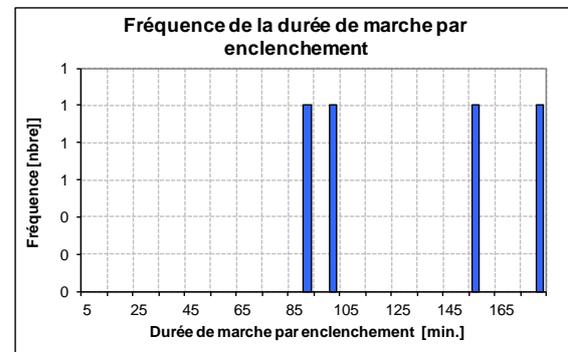


Fig. 33: Répartition des durées de fonctionnement

### 3.6 Optimisation de l'installation

La régulation des débits massiques de la distribution de chaleur ayant été redéfinie en 2012, la courbe de chauffage a pu être abaissée de quelque 8K par rapport à la température de dimensionnement. Le seuil de chauffage quant à elle a pu être ramenée de 18°C à 15°C, ce qui a permis d'optimiser considérablement la durée de fonctionnement et la fréquence des enclenchements de la pompe à chaleur.

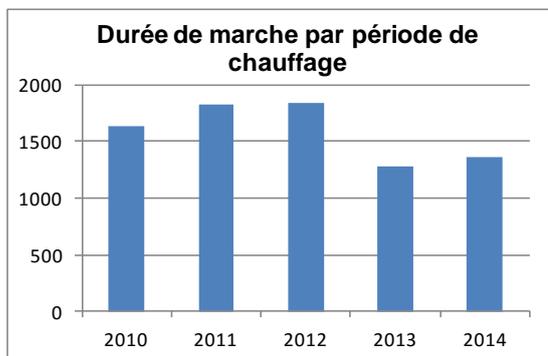


Fig. 34: Durée de marche par période de chauffage

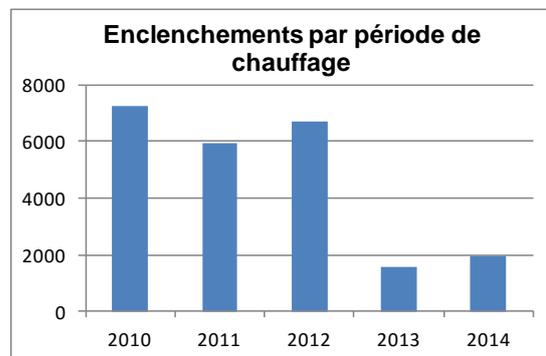


Fig. 35: Fréquence des enclenchements par période de chauffage

### 3.7 Installation remplacée par un nouveau système de pompe à chaleur

Cette pompe à chaleur équipée d'un accumulateur mixte a été remplacée par une nouvelle installation en 2014. Dans ce contexte, l'accumulateur a cédé la place à un accumulateur en série (retour) et l'ensemble de l'hydraulique a été adapté au système actuel. La nouvelle pompe à chaleur a un coefficient de performance d'environ 3,3 contre 2,5 auparavant.

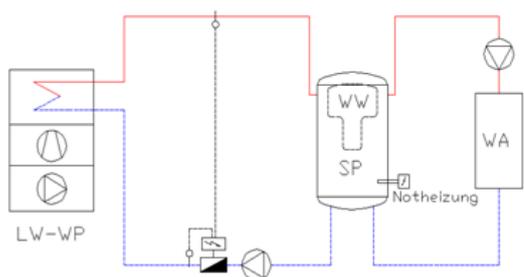


Fig. 36: Schéma hydraulique

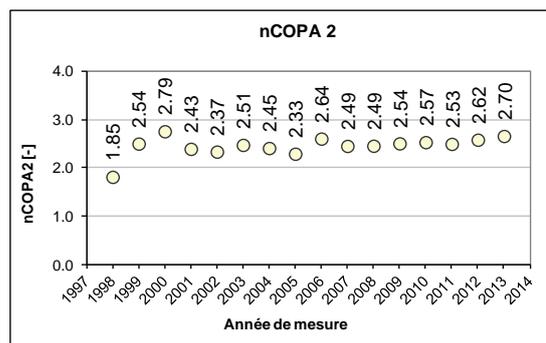


Fig. 37: Evolution du coefficient de performance au fil des années

## 4 Maintenance et réparations

Les coûts de maintenance et de réparation ont été établis et analysés séparément. Ces deux catégories ont été définies comme suit:

|              |  |
|--------------|--|
| Maintenance: | La «maintenance» (également appelée service ou entretien) comprend les frais de contrôle et, éventuellement, les frais de réglage de la pompe à chaleur et des appareils de commande. Le remplacement de pièces d'usure (par exemple recharge en fluide frigorigène, changement de filtres, nettoyages, etc.) en fait aussi partie, pour autant que le fabricant l'ait prévu dans son programme de maintenance. Les contrats de service font également partie de cette catégorie de frais. |
| Réparations: | Les «réparations» comprennent le remplacement des composants défectueux de la pompe à chaleur.   |

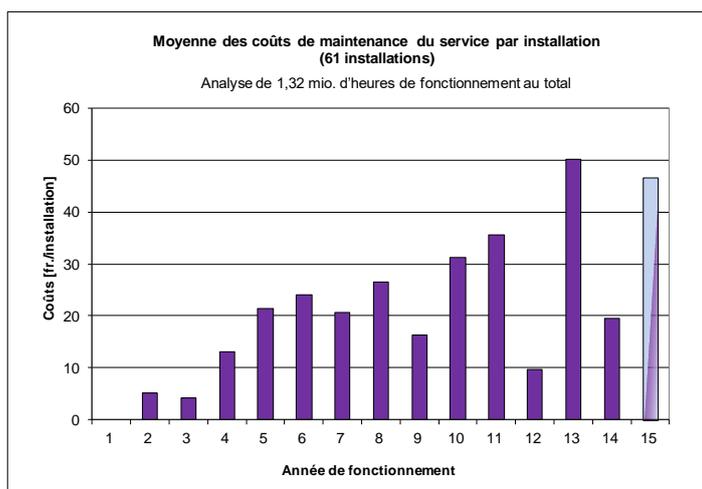
## 4.1 Maintenance des petites pompes à chaleur

Les coûts d'exploitation totaux d'une pompe à chaleur sont influencés non seulement par le coût de l'énergie, mais aussi par les coûts de maintenance et de réparation. Une analyse économique nécessite ainsi de d'évaluer l'importance de ces coûts.

Chaque propriétaire a été interrogé en vue d'établir les coûts de maintenance et les coûts énergétiques de son installation. L'envoi de questionnaires s'étant avéré inefficace, un entretien au téléphone ou sur place a été privilégié afin de pouvoir clarifier sans tarder toutes les incertitudes et contradictions. Les coûts de maintenance et de réparation ont été établis à l'aide de justificatifs (rapports d'entretien, factures, etc.).

L'échantillon analysé se présente comme suit:

61 sources de chaleur (31 sondes géothermiques, 3 collecteurs de chaleur enterrés, 1 pieu énergétique, 22 installations air-eau et 4 installations eau/eau), 46 installations avec chauffage et production d'ECS et 15 installations pour le chauffage uniquement.



**Fig. 38:** Moyenne des coûts de maintenance (service et entretien) au fil des années de fonctionnement des pompes à chaleur. A relever que des coûts sont survenus également durant la période de garantie (qui d'ordinaire dure deux ans). Ils concernent des coûts non couverts par la garantie, tels que la réparation suite à une utilisation erronée, etc..

Les coûts de maintenance (service et entretien) des petites pompes à chaleur produites en série sont modestes et s'élèvent à environ 21,60 francs par an. Leur faible importance au cours des premières années s'explique par la période de garantie de deux ans et par les prestations offertes par les fabricants.

## 4.2 Réparation des petites pompes à chaleur

Il faut souligner que les frais de réparation varient d'une installation à l'autre. Les années où les coûts sont élevés correspondent à des réparations d'envergure telles que le remplacement du compresseur ou d'un échangeur de chaleur et, dans un cas spécifique, la réparation de dommages causés par un incendie (court-circuit dans une installation fonctionnant au propane). Les autres frais de réparation sont liés au fonctionnement normal des installations et concernent les vannes d'expansion thermostatiques, les contrôleurs de débit, la régulation, etc., ainsi que les facteurs externes telles que l'encrassement du système hydraulique, des vannes mélangeuses et des circulateurs.

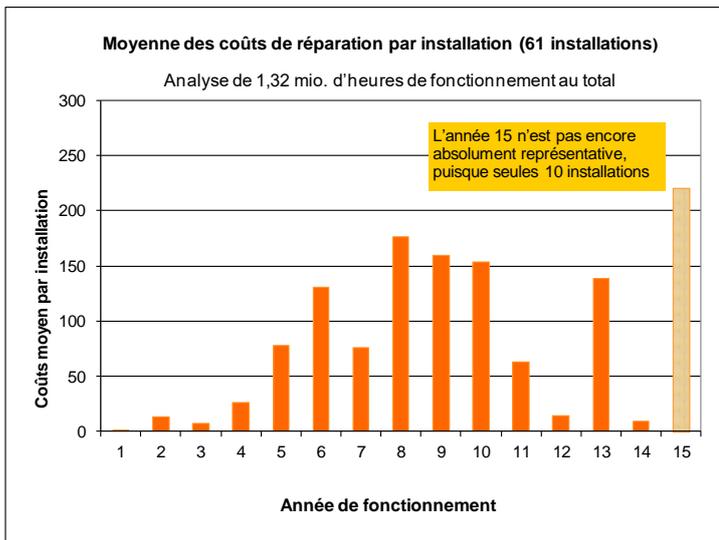


Fig. 39: Frais de réparation moyens établis pour 61 pompes à chaleur au fil des années de fonctionnement

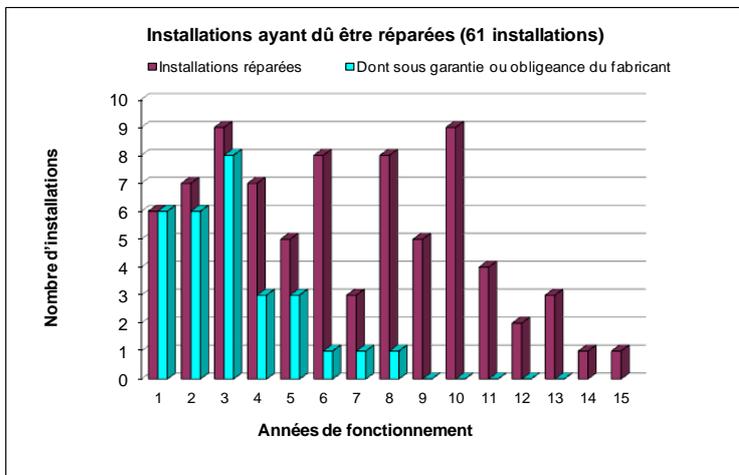


Fig. 40: Nombre d'installations réparées au fil des années de fonctionnement

La moyenne de tous les frais de réparation se situe à 84,40 [fr./a] par installation. Leur bas niveau a un effet favorable sur les coûts d'exploitation d'une installation munie d'une pompe à chaleur. En particulier, il ne ressort pas que la fréquence des réparations augmente au fur et à mesure que les installations vieillissent. Considéré dans l'ensemble, ce résultat reflète la qualité de ces petites pompes à chaleur.

Les Figures 41 et 42 indiquent le nombre d'installations ayant nécessité de petites réparations ou des réparations d'envergure. La Figure 39 montre clairement que durant les trois premières années, les réparations ont pour la plupart été effectuées sous garantie ou parfois gratuitement.

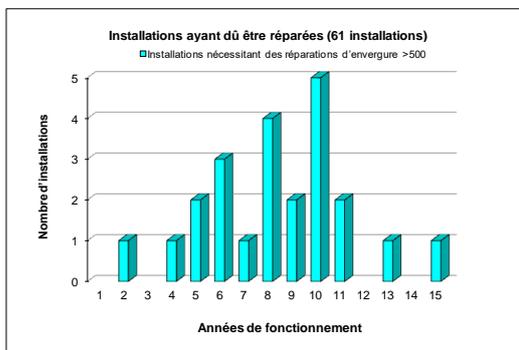


Fig. 41: Installations nécessitant des réparations de plus de 500 [fr./an]

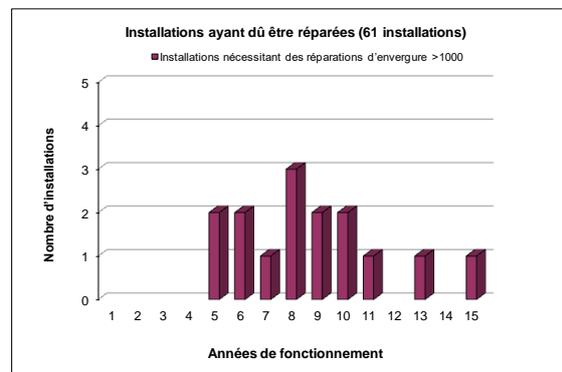


Fig. 42: Installations nécessitant des réparations de plus de 1000 [fr./an]

Les Figures 41 et 42 montrent que les réparations de grande envergure sont très rares. Cependant, malgré ces chiffres rassurants, elles ne peuvent pas être exclues.

### **4.3 Total des coûts de maintenance et de réparation**

Considérés sur les quinze années analysées et pour 61 installations, les coûts totaux engendrés par la maintenance et les réparations s'élèvent en moyenne à 106 [fr./an]. Ces chiffres très encourageants plaident en faveur de la qualité des petites pompes à chaleur. Les coûts analysés incluent pourtant la réparation de cinq compresseurs ainsi qu'un cas d'incendie et la réparation de dommages causés par le gel d'un évaporateur. Calculés par heure de fonctionnement, les coûts de maintenance s'inscrivent à 1,065 [ct./h] et les frais de réparation à 4,045 [ct./h]. Cette analyse est basée sur un total de 1,32 million d'heures de fonctionnement.

## **5 Collaboration au niveau national**

Chaque année, des rapports sur l'état des travaux ont été établis afin d'informer les acteurs concernés sur les progrès réalisés. D'autre part, nous avons entretenu d'étroits contacts avec l'OFEN et sa représentante, Mme Rita Kobler. Nous profitons de l'occasion pour lui adresser nos meilleurs remerciements.

Grâce à nos bonnes relations avec le Groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur GSP, nous disposons d'une plateforme intéressante pour transmettre nos observations de manière ciblée et simple.

Les thèmes analysés ont été diffusés et communiqués activement par le biais de tous les canaux à disposition du GSP ainsi qu'en d'autres occasions, lors de conférences, dans le cadre d'activités de groupes de travail et directement dans le cadre de la formation (Partenaire GSP certifié).

## **6 Collaboration au niveau international**

Des contacts ont été noués avec les groupes de projet en Allemagne et en Autriche. Les rapports et publications ont fait l'objet de comparaisons réciproques.

Les connaissances et expériences recueillies ont été présentées à l'occasion de trois conférences tenues en Autriche (journées d'information sur les pompes à chaleur organisées le 19 novembre 2014 à Salzbourg et le 20 novembre 2014 à Eberstalzell, puis le 4 décembre 2014 à Dornbirn).

## **7 Conclusions**

Les analyses mettent en évidence une belle continuité et confirment la qualité des résultats. Elles ont abouti à d'importants résultats et observations applicables en pratique. L'analyse des coûts de maintenance et de réparation fournit elle aussi des résultats encourageants. Comme les coûts de maintenance (service et entretien) s'avèrent très bas, ces observations peuvent encourager les ventes des pompes à chaleur.

Les résultats sont cependant contrastés. Si certaines installations ont montré de bons, voire de très bons résultats et ont rempli toutes les conditions, on serait en droit d'attendre de meilleurs résultats en matière d'efficacité. Alors qu'il était en progression durant les années initiales, le coefficient de performance stagne depuis 2000. Dans les années qui ont suivi, aucune tendance à l'amélioration n'a été détectée. Or, le coefficient de performance peut certainement être encore amélioré. Actuellement, les pompes à chaleur sont plutôt optimisées sur le plan du coût d'investissement que sur celui de l'efficacité. Si la part des systèmes de chauffage économes en énergie continue de progresser sur le marché et que l'énergie se fait rare, des progrès en matière d'efficacité sont possibles.

Hubacher Engineering remercie vivement l'OFEN pour le mandat qui lui a été confié. Dans le cadre de ce projet, l'entreprise a pu fournir un travail précieux au service de la branche spécialisée. Ces analyses in situ requièrent une grande expérience et un engagement de tous les instants; nous avons bénéficié du soutien décisif et précieux des propriétaires d'installations, qui ont relevé les données à intervalles réguliers. Nos remerciements s'adressent également au groupe qui met à disposition ses données depuis déjà 19 ans.

## 8 Références bibliographiques

- [1] **FAWA-Schlussbericht BFE: Feldanalysen von Wärmepumpenanlagen FAWA, 1996-2003**  
Schlussbericht April 2004, Autoren: P. Hubacher, M. Erb, M. Ehrbar.
- [2] **QS-WP/QP: Qualitätssicherung von Klein-Wärmepumpen mittels Norm- und Feldmessungen**, Teilprojekt Langzeitverhalten 2007-2008, Schlussbericht 2008, Autoren: P. Hubacher, Experte M. Ehrbar
- [3] **Verbesserung der Jahresarbeitszahl durch witterungsgeführten Ladekreis;**  
Schlussbericht 2008; Autoren P. Hubacher, M. Ehrbar;
- [4] **QS-WP/QP: Fortsetzung des Feldmonitorings von WP-Anlagen mittels Feldmessungen**, Teilprojekt Langzeitverhalten 2008-2011, Schlussbericht 2011, Autor: P. Hubacher

Engelburg, le 25 août 2015

Hubacher Engineering  
Peter Hubacher