

Association MINERGIE / AWEL / FWS

9 mars 2006, révision 31 mai 2006

Données concernant le bâtiment			
Station climatique	Zürich SMA ▼		
Catégorie de bâtiment	Hab. individuel ▼		
Surface de référence énergétique	SRE ₀	m ²	200
Surface de référence énergétique corrigée	SRE	m ²	200
Besoins de chaleur pour le chauffage selon SIA 380/1	Q _h	MJ/m ² a	180
Dépense par transmission selon SIA 380/1	Q _T	MJ/m ² a	
Dépense par renouvellement d'air selon SIA 380/1	Q _V	MJ/m ² a	
Puissance thermique selon SIA 384/201 à -8°C	Valeur proposée: 5.0	kW	5.5
Besoins de chaleur pour l'eau chaude selon SIA 380/1	Q _{ww}	MJ/m ² a	50
Eau chaude : pertes d'accumulation et de distribution		%	

Installation de pompe à chaleur			
Nom et type de pompe à chaleur :	pac typique avec certificat D-A-C-H		
Source de chaleur :	Pompe à chaleur air/eau ▼		
Utilisation (chauffage ou eau chaude):	Chauffage + Eau chaude ▼		
Accumulateur pour le chauffage	sans accumulateur chauffage ▼		
Mode de fonctionnement de l'installation de PAC :	chauffage monovalent ▼		
COP aux conditions 7 °C / 50°C (A7 / W50):		-	3.5
COP aux conditions -7 °C / 35°C (A-7 / W35):		-	3
Puissance calorifique à -7 °C (A-7 / W35):		kW	6.5
COP aux conditions +2 °C / 35 °C (A2 / W35):		-	3.5
Puissance calorifique à +2 °C (A2 / W35):		kW	8
COP aux conditions +7 °C / 35 °C (A7 / W35):		-	4
Puissance calorifique à +7 °C (A7 / W35):		kW	10
Elévation de température dans la PAC dans les conditions de la norme	dT distribution	°C	5
Température de départ du chauffage:	T départ	°C	30

Méthode de calcul PACesti: Description du modèle

Arthur Huber, dipl. Ing. ETH

Huber Energietechnik AG
Ingenieur- und Planungsbüro
Jupiterstrasse 26, CH-8032 Zürich
Tel. 044 422 79 78 Fax 044 422 79 53
<http://www.igjzh.com> Email: huber@igjzh.com

Projet: PACesti: Description du modèle version 2.0a

Mandataire:	Assoc. MINERGIE, Ag. MINERGIE Bâtiment Optingenstrasse 54, 3013 Berne Hr. Lukas Nissil	Fax. 031 340 35 36 Tél. 031 340 35 30 lukas.nissille@minergie.ch
	AWEL, Service Energie Stampfenbachstrasse 12, 8090 Zürich Hr. Christoph Gmür	Fax. 043 259 51 59 Tél. 043 259 42 70 christoph.gmuer@bd.zh.ch
	Groupement suisse pour la Pompe à chaleur GSP c/o Hubacher Engineering, Tannenbergrasse 2, 9032 Engelburg Hr. Peter Hubacher	Fax. 071 260 27 28 Tél. 071 260 27 27 he-ko@bluewin.ch
Réalisation:	Huber Energietechnik AG Jupiterstrasse 26, 8032 Zurich Arthur Huber, dipl. Ing. ETH	Fax 01 / 422 79 53 Tél. 01 / 422 79 78 huber@iqjzh.com

Adaptation du modèle: AWEL / département de l'énergie¹, GSP² et l'Association Minergie³ ont fait développer ensemble en 2003 la méthode de calcul PACesti, qui permet de déterminer le coefficient de performance annuel (COPa) des pompes à chaleur sur la base des indications de celles-ci (mesure Töss) et de divers autres paramètres (entre autres température de départ, accumulateur, chauffage d'appoint, longueur des sondes, etc.). Ce programme a été vérifié à l'aide des mesures de la FAWA. Par rapport à la version 1.0. les améliorations suivantes ont été apportées dans la version 2.0 :

- Pour les PAC eau – eau, la pompe de captage a été introduite.
- Pour les PAC saumure-eau, 4% de la puissance du compresseur est déduite de la puissance du circulateur de la sonde (car elle est déjà contenue dans le COP).
- Une nouvelle formule, développée par le Prof. M. Ehrbar, a été introduite pour déterminer l'influence de l'élévation de la température standard ΔT dans la PAC (condition accessoire pour la mesure Töss des pompes à chaleur).
- Pour déterminer le profil de charge, on tient compte des déperditions par transmission de chaleur et par renouvellement d'air, en plus des besoins de chaleur pour le chauffage. Il est désormais possible de distinguer facilement un bâtiment conventionnel d'un bâtiment à utilisation solaire passive importante. Toutes ces valeurs sont déjà livrées avec le calcul selon SIA 380/1. Il est ainsi plus aisé de calculer le point de bivalence des systèmes monovalents et bivalents à l'avance.

¹ <http://www.energie.zh.ch>

² <http://www.fws.ch>

³ <http://www.minergie.ch>

Table des matières

1	Outil Excel „PACesti“	4
2	Méthode de calcul de l'outil Excel „PACesti“	6
2.1	Objectif.....	6
2.2	Méthode BIN.....	7
2.3	Calcul du profil de charge	8
2.3.1	Répartition des pertes par transmission et par renouvel. d'air	8
2.3.2	Correction climatique.....	9
2.3.3	Besoins de puissance thermique.....	10
2.3.4	Eau chaude	10
2.3.5	Période de chauffage	12
2.4	Modèle pour le calcul des sondes géothermiques.....	12
2.5	Élévation de température dans des conditions standard.....	13
2.6	Pompes de captage pour PAC eau-eau et sol-eau	13
2.7	Déperditions.....	14
3	Exemples	15
3.1	Maison en chaînette MINERGIE passive-solaire avec PAC et sonde géothermique.....	15
3.2	Maison en chaînette MINERGIE conventionnelle avec PAC et sonde géothermique.....	17
3.3	Pompe à chaleur air-eau avec radiateurs.....	19
3.4	Maison passive-solaire avec PAC monoénergétique air/eau	21
4	Tableau des symboles	23
4.1	Symboles latins.....	23
4.2	Symboles grecs	23
4.3	Indices	24
5	Annexe.....	25
5.1	Influence de l'élévation de la température standard : dérivation	25
5.2	Données climatiques	27
5.3	Catégories d'utilisation.....	29
5.4	Calcul manuel de la Fachhochschule Lucerne	29

Dans les figures du chapitre 3 il manque encore la possibilité de saisir les déperditions par accumulation et distribution de l'eau chaude (introduction en cours de travail): ceci n'a pas d'incidence sur les résultats.

1 Outil Excel „PACesti“

En 2003 un outil de travail pour l'estimation du coefficient de performance annuel des pompes à chaleur air-eau et saumure-eau a été développé : l'outil Excel PACesti (PAC pour pompes à chaleur et esti pour estimation).

Il se base sur les principes suivants :

- La HTA Horw propose une méthode simple et bien documentée pour déterminer le COP (coefficient de performance annuel) des pompes à chaleur (méthode 3-Bin pour air-eau et méthode 1-Bin pour saumure-eau).⁴
- Dans le cadre du projet FAWA de l'Office fédéral de l'Energie, des mesures ont été effectuées sur 200 pompes à chaleur, parfois durant plusieurs années. Le rapport⁵ final met en évidence les points importants destinés à la planification des installations et à leur dimensionnement.
- Au centre de test des pompes à chaleur⁶ (autrefois Töss-Winterthour, actuellement Buchs-SG) les pompes à chaleur sont testées selon un protocole international – Label Q- (Label D-A-CH). La méthode correspond dans les grandes lignes à la norme SN EN 14511. Les valeurs publiées à ce jour ont encore été déterminées d'après la norme EN 255.

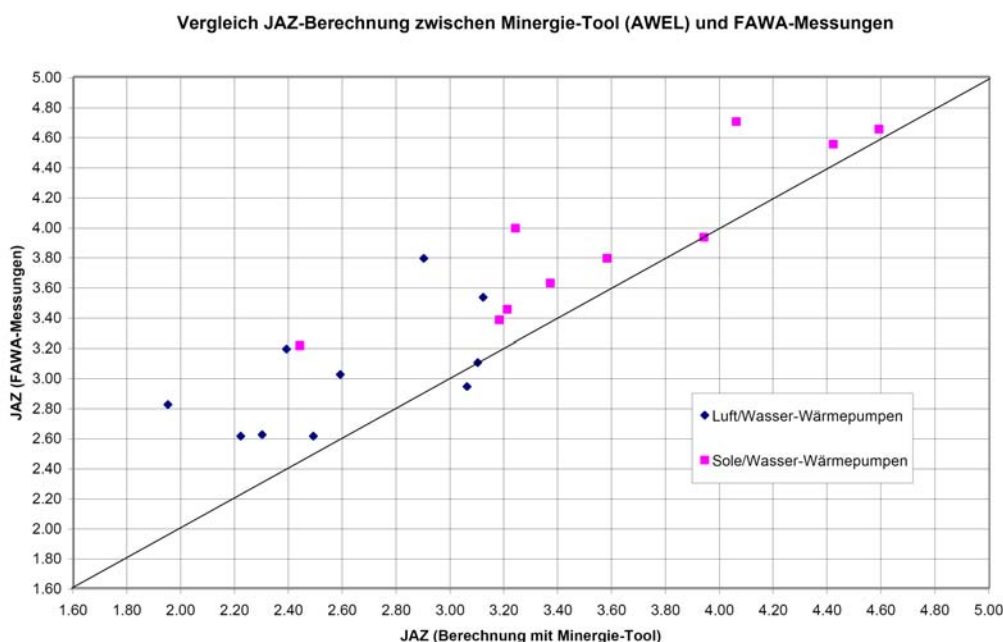


Fig 1: Comparaison du COPa calculé avec les valeurs mesurées. La version 1 de PACesti (publiée en 2003) a été utilisée pour les calculs.

⁴ Méthode de calcul manuel pour déterminer le coefficient de performance annuel des pompes à chaleur pour le chauffage et l'eau chaude. Origine de la méthode de calcul pour déterminer le COP. ZTL Lucerne, G. Zweifel, M. Wetter, 26. Mai 1997. Conçu sur mandat de l'OFEN. Faible élévation de la température au moyen de la pompe à chaleur, phase 2.

⁵ <http://www.energieforschung.ch/energieforschung/publikationen/streamfile.php?file=000000008070.pdf&name=240016.pdf>

⁶ <http://www.wpz.ch>

- En 2003 AWEL / département de l'Energie⁷, GSP (groupement suisse pour la pompe à chaleur)⁸ et l'Association Minergie⁹ ont fait développer conjointement le modèle de calcul PACesti, qui permet de déterminer le coefficient de performance annuel (COPa) des pompes à chaleur sur la base des indications de la pompe à chaleur (mesures Töss des pompes à chaleur) et de divers autres paramètres (entre autres température de départ, accumulateur, chauffage d'appoint, longueur des sondes, etc.). Ce programme a été vérifié à l'aide des mesures de la FAWA (voir fig.1)¹⁰. La comparaison avec les valeurs de la FAWA montre que la fraction utile annuelle est calculée avec une bonne marge de sécurité – elle correspond aux installations les moins performantes. Les valeurs PACesti se situent en moyenne 10-20% au-dessous de la valeur mesurée.
- Le programme PACesti résume tous les principes et les résultats sur une page A4. L'utilisation est simple; l'estimation du COPa se fait en peu de temps et avec suffisamment de précision. Sur la deuxième page, les données sont présentées de façon à pouvoir être utilisées pour une offre, en particulier lorsqu'un changement de produit est discuté.
- L'enquête relatives aux consommations dans le cadre du test pratique Minergie (Fachhochschule de Saint-Gall)¹¹ a montré que la consommation des bâtiments Minergie avec pompe à chaleur est en moyenne inférieure à la valeur limite pour Minergie (la consommation des bâtiments chauffés au bois/gaz est de 50% au-dessus !). Cela démontre que la qualité du calcul des pompes à chaleur est suffisante à l'heure actuelle.
- Le programme PACesti a été adapté aux nouvelles connaissances en hiver 2005/2006. Dans le nom des fichiers et en haut à droite la nouvelle version contient l'annotation Version 2. Le démarrage sur Internet se fera probablement en septembre 2006. Les adaptations suivantes sont valables pour la version 2 : entre autres l'influence de l'élévation de la température standard est déterminée avec plus de précision (cf. chap. 2.5). Dans de nombreux cas les valeurs COPa calculées sont jusqu'à 10% plus élevées (par rapport à la version 1), correspondant mieux ainsi aux mesures FAWA (cf. image plus haut).

⁷ <http://www.energie.zh.ch>

⁸ <http://www.fws.ch>

⁹ <http://www.minergie.ch>

¹⁰ voir <http://www.fws.ch> → downloads → technique → PDF-File.

¹¹ <http://www.fhsg.ch> → Technik → Forschung&Dienstleistung → Fachstelle Minergie → Schlussbericht Praxistest Minergie

2 Méthode de calcul de l'outil Excel „PACesti“

2.1 Objectif

peu de paramètres
de saisie

Les méthodes de calcul les plus diverses ont déjà été proposées pour déterminer les coefficients de performance des pompes à chaleur. Ces méthodes vont des systèmes les plus simples, qui estiment le coefficient de performance à partir des valeurs mesurées par l'office des tests, avec des facteurs de pondération fixes, jusqu'à des procédés plus complexes, comme la simulation globale et dynamique du système (par ex. avec TRNSYS, DOE2). Les premiers séduisent par leur simplicité, mais ne permettent aucune différenciation dans le comportement de la charge. Par le passé, ceci a souvent provoqué des différences notables entre les besoins d'électricité calculés et les besoins mesurés réellement, en particulier lors de l'utilisation d'un chauffage d'appoint avec pointes de charge (par ex. corps de chauffe électriques). Les écarts sont particulièrement marqués dans des immeubles à forte utilisation solaire passive. Les simulations de systèmes, quant à elles, demandent beaucoup de temps et sont sujettes aux erreurs de saisie. Une amélioration des résultats ne peut être attendue qu'en cas d'évaluation soigneuse des conditions accessoires.

pas de données
inconnues

Le but de la méthode présentée ici est de calculer le coefficient de performance d'une pompe à chaleur exclusivement sur la base des indices obtenus en début de planification (se basant sur la norme SIA 380/1 et sur les valeurs mesurées par l'office des tests). A l'inverse des méthodes utilisées par le passé, ce n'est pas la méthode de calcul elle-même, sinon les données de saisie qui doivent être simplifiées au maximum („les ordinateurs sont patients“). Le comportement de la charge se calcule à partir des indices des besoins de chaleur pour le chauffage, des déperditions par transmission et par renouvellement d'air, et, facultativement, des besoins de puissance de chauffage. Avec ces 4 valeurs il est possible de caractériser le comportement de la charge d'un bâtiment pour un endroit donné. L'influence de l'emplacement est adaptée au moyen d'une évaluation empirique.

bâtiments
conventionnels et
passifs-solaires

La grande différence entre la méthode décrite ci-dessous et d'autres procédés réside dans le fait qu'elle permet d'analyser à la fois le comportement des bâtiments passifs-solaires et celui des immeubles conventionnels. L'amélioration des résultats se voit surtout dans les installations monovalents et bivalentes, car une éventuelle déviation du modèle doit être multipliée avec la différence de la fraction utile.

COPa sans
chauffage d'appoint

Dans la définition du coefficient de performance annuel (COPa) une précision est apportée : les chauffages d'appoint, électriques ou provenant d'un autre vecteur énergétique, font partie de la fraction utile, mais pas du COPa de l'installation. Pour cette raison, dans le calcul de la fraction utile on inclut également le degré de couverture du chauffage d'appoint. Jusqu'à disposer de meilleurs modèles, les pertes dues à la production sont comprises dans le COPa.

COP_{aww} et COP_{a_h}

Pour le COPa on distingue entre un système de préparation de l'eau chaude et un système de chauffage. De surcroît un facteur de pondération chauffage et un facteur de pondération eau chaude (part d'eau chaude) sont calculés.

2.2 Méthode BIN

La méthode BIN suppose des besoins de chaleur de chauffage connus dans un bâtiment. Ces besoins sont répartis proportionnellement sur autant de cas de charge que désiré. Pour chaque charge le rendement moyen ou COP est déterminé. Avec la répartition proportionnelle des besoins de chaleur de chauffage le facteur de pondération pour les divers COPs est aussi donné; de la sorte il est possible de calculer un COP moyen et un coefficient de performance moyen.

Le principe de la méthode BIN est évident. La difficulté réside dans la détermination de la répartition proportionnelle sur les diverses charges. Le principe qui suppose une „répartition standard“ sur les charges est inutilisable. Cela réduirait tous les types de bâtiment à un seul „bâtiment standard“, situé à un „emplacement standard“.

Une rectification des degrés jour de chauffage a été proposée comme première amélioration. Certes, l'erreur d'emplacement peut ainsi être amoindrie, mais la maison demeure une „maison standard“ avec „une limite de chauffage standard“. Le principe est identique à la „formule Hottinger“, connue depuis longtemps, qui elle aussi se base sur une maison standard.

Conscients des faiblesses de ce modèle, les Allemands ont proposé d'utiliser une moyenne mensuelle au lieu d'une moyenne annuelle. Les résultats ont déçu, et il en a résulté un supplément de travail important en termes de variables à introduire.

D'après nous le problème réside dans le principe de la „maison standard“, de sorte qu'un éloignement de ce principe semble nécessaire pour parvenir à une véritable amélioration.

Une bonne connaissance des circonstances de la chaleur libre (source externe) et utilisable pour les besoins de chaleur de chauffage représente une possibilité d'identifier les bâtiments passifs-solaires. L'avantage qu'offre un tel principe est constitué par le petit nombre de paramètres additionnels nécessaires, dérivés du calcul selon SIA 380/1 (Base EN 832 resp. EN 13790).

Pour le calcul du profil de charge (représenté dans la courbe de charge déjà connue) on part du principe que les déperditions par transmission et renouvellement d'air sont proportionnelles à la différence de température intérieure - extérieure. Selon la norme SIA380/1 les déperditions par transmission et par renouvellement d'air ne dépendent pas de la chaleur des sources externes. Aussi la répartition BIN ne devrait pas se baser sur les besoins de chaleur de chauffage, mais sur les déperditions par transmission et par renouvellement d'air.

2.3 Calcul du profil de charge

2.3.1 Répartition des pertes par transmission et par renouvellement d'air

Les déperditions par transmission et par renouvellement d'air constituent les valeurs de saisie et sont déterminées par le calcul SIA380/1. Si on renonce aux données sur les déperditions par transmission et par renouvellement d'air, l'estimation de celles-ci d'après le modèle est de 70% plus élevée que les besoins de chaleur de chauffage. Et ceci correspond à un type de bâtiment moderne plutôt conventionnel (pas un immeuble passif-solaire).

Les déperditions par transmission et renouvellement d'air à un emplacement donné, avec une température de dimensionnement de -8°C , sont réparties proportionnellement dans les BINs ci-dessous. La répartition se fait d'après l'analyse des données climatiques de la station Zurich SMA.

Temp ext.. Ta [°C]	Répartition BIN [%]
-8	3.04%
-7	0.76%
-6	1.24%
-5	1.62%
-4	1.90%
-3	2.85%
-2	3.42%
-1	4.37%
0	5.32%
1	6.27%
2	6.65%
3	7.45%
4	7.78%
5	7.09%
6	7.41%
7	6.88%
14	25.95%
Jusqu'à 20°C	100.0%

2.3.2 Correction climatique

Pour des températures extérieures entre -7°C et $+7^{\circ}\text{C}$ la répartition BIN est adaptée avec le facteur de correction suivant:

$$\text{BIN}_{\text{korr}}(T_a) = \text{BIN}_{\text{SMA}}(T_a) - \frac{(T_{a_{\text{min}}} + 8^{\circ}\text{C})}{333^{\circ}\text{C}} \cdot (T_a / -7^{\circ}\text{C}) \quad \text{Eq.2.1}$$

Le BIN pour une température extérieure de -8°C fait référence pour toutes les températures inférieures à -7°C et est adapté comme suit :

$$\text{BIN}_{\text{korr}}(-8^{\circ}\text{C}) = \text{BIN}_{\text{SMA}}(-8^{\circ}\text{C}) - \frac{(T_{a_{\text{min}}} + 8^{\circ}\text{C})}{100^{\circ}\text{C}} \quad \text{Eq.. 2.2}$$

Le BIN pour une température de 14°C fait référence pour le secteur de température entre 8°C et 20°C et se calcule à partir de la différence de la somme de tous les BINs jusqu'à 100%.

Temp.ext. T_a [$^{\circ}\text{C}$]	Répartition BIN Zurich SMA	Répartition BIN Lugano	Répartition BIN Davos
-8	3.04%	0.00%	9.04%
-7	0.76%	0.00%	2.56%
-6	1.24%	0.00%	2.78%
-5	1.62%	0.33%	2.91%
-4	1.90%	0.87%	2.93%
-3	2.85%	2.08%	3.62%
-2	3.42%	2.91%	3.93%
-1	4.37%	4.11%	4.63%
0	5.32%	5.32%	5.32%
1	6.27%	6.53%	6.01%
2	6.65%	7.16%	6.14%
3	7.45%	8.22%	6.68%
4	7.78%	8.81%	6.75%
5	7.09%	8.38%	5.80%
6	7.41%	8.95%	5.87%
7	6.88%	8.68%	5.08%
14	25.95%	27.65%	19.95%
Jusqu'à 20°C	100.0%	100.0%	100.0%

2.3.3 Besoins de puissance thermique

Les besoins de puissance thermique pour le chauffage du bâtiment sont une donnée de saisie et se calculent selon la norme SIA 384.201. Cette variable n'est cependant pas obligatoire car les besoins de puissance thermique peuvent être calculés avec suffisamment de précision avec les déperditions par transmission Q_T [MJ/m²], par renouvellement d'air Q_V [MJ/ m²] et par les degrés jour de chauffage $DJ_{20/12}$, selon la formule:

$$\dot{Q}(Ta = Ta_{Min}) = \frac{(Q_T + Q_V) \cdot SRE}{3.6MJ / kWh \cdot DJ_{20/12} \cdot 1.065 \cdot 24h} \cdot (20^\circ C - Ta_{Min}) \quad [kW] \quad \text{Eq. 2.3}$$

Le facteur empirique 1.065 est utilisé comme correction, car les déperditions par transmission et par renouvellement d'air sont calculés d'après la norme SIA 380/1 avec une limite de chauffage à 20°C alors que les degrés jour de chauffage $DJ_{20/12}$ sont définis avec une limite de chauffage de 12°C.

Valeur proposée Le besoin de puissance thermique résultant de l'équation 2.3 est la valeur proposée et celle-ci est utilisée pour poursuivre le calcul, sauf précisé différemment.

Valeur minimale Le besoin de puissance thermique minimal correspond à 90% de la valeur proposée dans l'équation 2.3. Si la valeur de saisie n'atteint pas la valeur minimale, le calcul se poursuit avec la valeur minimale.

2.3.4 Eau chaude

Les besoins d'eau chaude sont calculés selon la norme SIA 380/1. Le besoin de puissance thermique nécessaire supplémentaire se calcule comme suit :

$$\dot{Q}_{ww} = \frac{Q_{ww} \cdot SRE \cdot \eta_{vert} \cdot 1000kJ / MJ}{8760h \cdot 3600s / h} \quad [kW] \quad \text{Eq. 2.4}$$

Cette équation se base sur l'analyse d'un bilan journalier: Lors de la journée de dimensionnement „imaginaire“, pour un chauffage des locaux selon la norme 384.201 (pendant 24 heures, seulement les déperditions par transmission et renouvellement d'air, mais pas d'apports internes ou solaires), on trouve „uniquement“ une utilisation d'eau chaude dans la moyenne. Cette utilisation moyenne est déterminée sur la base des besoins d'eau chaude selon utilisation standard de SIA 380/1 [en MJ/m²] (cf. chapitre 5.3). Pour le supplément de puissance ainsi proposé la manière de produire l'eau chaude - production permanente ou bref changement du chauffage à préparation de l'eau chaude - n'a pas d'importance. Le bilan journalier demeure inchangé.

SIA 380/1 ne tient pas compte des pertes d'accumulation et de distribution pour $Q_{e.c.}$. Les pertes d'accumulation (pertes par entropie dans l'échangeur, pertes de chaleur dans l'accumulateur) sont considérées sommairement dans l'équation 2.13, les pertes par distribution sont négligées.

$$\eta_{vert} = 1 \quad \text{Eq. 2.5}$$

Ce principe sommaire est actuellement mis en question par le Prof. Afjei¹² à la Fachhochschule Nordwest Schweiz dans le cadre d'un projet de recherche.

¹² Prof. Dr. Th. Afjei, Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau, St. Jakobs-Strasse 84, Muttenz

2.3.5 Période de chauffage

La durée de la période de chauffage se calcule à partir des degrés jour de chauffage et des températures extérieures moyennes de la période de chauffage :

$$\text{Période de chauffage [h]} = \frac{DJ_{20/12} \cdot 1.065 \cdot 24h / d}{(20^{\circ}\text{C} - Ta_{\text{mittel}})} \quad \text{Eq. 2.6}$$

La période de chauffage [h] est répartie proportionnellement sur les différents BINs. La part de chaleur externe utile se déduit des heures de chauffage effectives:

$$\text{heures de chauffage [h]} = \frac{DJ_{20/12} \cdot 1.065 \cdot 24h / d}{(20^{\circ}\text{C} - Ta_{\text{mittel}})} \cdot \left(1 - \frac{Q_h}{Q_v + Q_T}\right) \quad \text{Eq. 2.7}$$

Par analogie le même facteur est déduit des BINs. Ce principe signifie donc que la chaleur libre utilisée est répartie proportionnellement sur les BINs.

2.4 Modèle pour le calcul des sondes géothermiques

La température source T_q pour une pompe à chaleur avec sonde géothermique dépend de plusieurs facteurs, d'importance diverse. Pour leur évaluation, des variations au niveau des paramètres ont été effectuées avec le module du programme EWS. Pour la terre on définit une valeur $\lambda_{\text{terre}} = 2.5 \text{ W/mK}$, valeur typique pour le bassin suisse de molasse. La charge spécifique de la sonde et la durée de fonctionnement de la pompe à chaleur constituent les principales variables. Le calcul est le suivant :

$$\text{Temps de fonctionnement [h]} \approx \frac{(Q_h + Q_{ww}) \cdot SRE}{3.6 \text{ MJ / kWh} \cdot \dot{Q}_{B0/W35} [\text{kW}]} \quad \text{Eq. 2.8}$$

La température source T_q de la sonde géothermique peut ainsi être estimée avec

$$T_q [\text{K}] \approx 283.15\text{K} - \left(0.055\text{K} \cdot m/W + \frac{\text{Temps fonct.}}{100h} \cdot 0.006\text{K} \cdot m/W\right) \cdot \frac{\dot{Q}_{B0/W35} \cdot 1000\text{W/kW}}{l.d.sondes [m]} \cdot \frac{(COP_{B0/W35} - 1)}{COP_{B0/W35}} \quad \text{Eq. 2.9}$$

Le coefficient de performance annuel d'une pompe à chaleur est évalué en supposant une température source T_q constante.

L'influence de la température source T_q et de la température de départ T_{Vorl} sur le COP se calcule au moyen du principe de Carnot:

$$COP_{\text{eff}} = COP_{\text{Ref}} \cdot \frac{T_{\text{Vorl,eff}}}{T_{\text{Vorl,eff}} - T_{q,\text{eff}}} \cdot \frac{T_{\text{Vorl,Ref}} - T_{q,\text{Ref}}}{T_{\text{Vorl,Ref}}} \quad \text{Eq.2.10}$$

Dans l'équation Eq.2.10 la température de départ T_{Vorl} est à indiquer en [K].

2.5 Elévation de température dans des conditions standard

L'écart de température entre l'entrée et la sortie du condensateur est indiqué dans les essais. Cet écart de température $\Delta T_{Spr, eff}$ ne correspond pas toujours à l'écart de température effectif $\Delta T_{Spr, eff}$ lors du fonctionnement réel de la pompe à chaleur. C'est pourquoi le professeur Dr. Ehrbar¹³ a développé un modèle où cette influence peut être calculée (avec T_q = température source et T_{Vorl} = température de départ). L'erreur qui en ressort pour le COP peut ensuite être calculée avec

$$COP_{korrr} \approx COP_{Ref} * \left[1 - \frac{\frac{\Delta T_{Spr, Ref} - \Delta T_{Spr, eff}}{2}}{\left\{ T_{Vorl} - \frac{\Delta T_{Spr, Ref}}{2} + 4[K] - (T_q - 15[K]) \right\}} \right] \quad \text{Eq.2.11}$$

L'explication pour l'équation Eq.2.11 se trouve dans l'annexe 5.

2.6 Pompes de captage pour PAC eau-eau et sol-eau

L'énergie nécessaire à compenser la perte de pression dans le condensateur et dans l'évaporateur est comprise dans les mesures COP lors des essais ; par contre l'énergie nécessaire à compenser la perte de pression dans une sonde géothermique et dans le distributeur de la sonde, ou encore à la propulsion de l'eau dans une pompe à chaleur fonctionnant avec les eaux souterraines, n'est pas comprise. Cet apport d'énergie doit être inclus dans le calcul du coefficient de performance annuel.

En pratique l'énergie nécessaire à compenser la perte de pression dans le condensateur représente environ 4% de l'énergie utilisée par la pompe à chaleur (sans circulateur). En tenant compte des autres déperditions (pertes accumulateur, démarrage etc. avec un rendement η_h und η_w selon chap. 2.7), le coefficient de performance se calcule à partir du $COP_{eff, ch}$ pour le chauffage, de la puissance de chauffage de la pompe à chaleur \dot{Q}_{WP} et de la puissance électrique nécessaire à la pompe de la sonde (ou la pompe des eaux souterraines) P_{Pompe} :

$$COP_h = \frac{\eta_h}{\frac{1}{COP_h} + \frac{P_{pompe} - 0.04 \cdot \frac{\dot{Q}_{WP}}{COP_h}}{\dot{Q}_{WP}}} \quad \text{Eq.2.12}$$

¹³ Prof. Dr. Max Ehrbar, im Sixer 17a, CH-7320 Sargans.

Par analogie pour la production d'eau chaude la formule est la suivante:

$$COP_{ww} = \frac{\eta_w}{\frac{1}{COP_{ww}} + \frac{P_{pompe} - 0.04 \cdot \dot{Q}_{WP}}{\dot{Q}_{WP} \cdot COP_{ww}}} \quad \text{Eq.2.13}$$

2.7 Déperditions

Production de chaleur

Pour les déperditions lors de la production de chaleur (détérioration du coefficient de performance) l'équation suivante est valable actuellement :

$$\eta_w = 1 - \sum x \quad \text{et} \quad \eta_h = 1 - \sum x \quad \text{Eq.2.14}$$

	X
Pertes accumulateur du chauffage, y c. électricité pour la pompe de charge de l'accumulateur*	3%
Pertes accumulateur d'eau chaude sanitaire (entartrage etc.):	4%
Pertes pour charger l'accu avec chauffe-eau instantané électrique	2%
Pertes pour charger l'accu avec corps de chauffe	4%
Pertes pour charger l'accu avec corps de chauffe, bloqué lors de la charge	1%
Electricité suppl. pour l'eau chaude avec corps de chauffe en parallèle	5%
Electricité suppl. pour l'eau chaude avec réchauffement électrique	0%
Pertes en mode chauffage (démarrage et autres pertes de la PAC)	4%
Pertes en mode eau chaude (démarrage et autres pertes de la PAC)	4%

* De plus, dans les accumulateurs à chaleur une variable „différence température de l'accumulateur – température de départ chauffage“ est à introduire.

Cette équation sommaire est actuellement mise en question par le Prof. Afjei¹⁴ à la Fachhochschule Nordwestschweiz dans le cadre d'un projet de recherche.

Pertes de chaleur eau chaude

Les déperditions de l'accumulateur et de distribution de l'eau chaude sanitaire sont des variables à saisir. Les valeurs typiques pour les bâtiments d'habitation comprennent :

- Pertes accumulateur et distribution (armatures, pompes et conduites isolées): 15-30%
- Pertes accumulateur + distribution + circulation (armatures, pompes et conduites isolées): 30-50%

Les besoins d'électricité pour les rubans chauffant sont à calculer séparément.

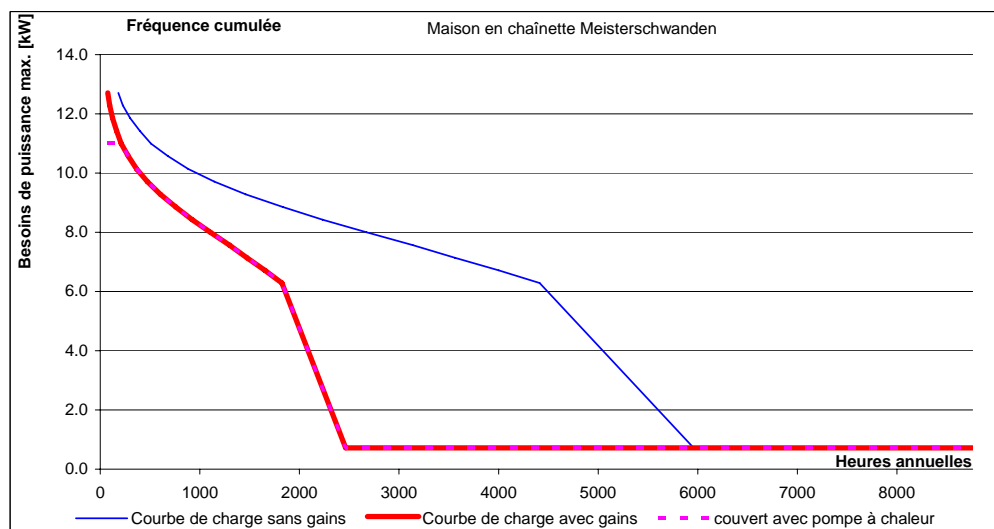
¹⁴ Prof. Dr. Th. Afjei, Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau, St. Jakobs-Strasse 84, Muttenz

3 Exemples

3.1 Maison en chaînette MINERGIE¹⁵ passive-solaire avec PAC et sonde géothermique



Temp. Extérieure Text [°C]	Puissance nécessaire [kW]	Distribution BIN [%]	Courbe de charge sans gains de chaleur [h]	Fréquence cumulée [h]	Courbe de charge avec gains chaleur [h]	Fréquence cumulée [h]	Livraison chaleur de la PAC [kW]
-8	12.7	3.0%	181	181	75	75	11.0
-7	12.3	0.8%	45	226	19	93	11.0
-6	11.9	1.2%	74	300	31	124	11.0
-5	11.4	1.6%	96	397	40	164	11.0
-4	11.0	1.9%	113	510	47	211	11.0
-3	10.6	2.9%	170	679	70	281	10.6
-2	10.1	3.4%	204	883	84	365	10.1
-1	9.7	4.4%	261	1144	108	473	9.7
0	9.3	5.3%	317	1461	131	604	9.3
1	8.9	6.3%	374	1834	154	758	8.9
2	8.4	6.7%	397	2231	164	922	8.4
3	8.0	7.5%	444	2674	183	1106	8.0
4	7.6	7.8%	464	3138	192	1297	7.6
5	7.1	7.1%	423	3561	175	1472	7.1
6	6.7	7.4%	442	4002	183	1654	6.7
7	6.3	6.9%	410	4412	170	1824	6.3
20	0.7	26.0%	1546	5959	639	2463	0.7
30	0.7		2801	8760	6297	8760	0.7
jusqu'à 20°C		100.0%	5959		2463		



15 Quelle: Architekturbüro FISCHER + ROHNER, dipl. Architekten ETH, 5616 Meisterschwanden

Projet :

MINERGIE / FWS / AWEL-En
PACesti.xlt / V2.0b Août 06 / HET/JF

Maison en chaînette Meisterschwanden

Données concernant le bâtiment			
Station climatique		Olten	▼
Catégorie de bâtiment		Hab. individuel	▼
Surface de référence énergétique	SRE ₀	m ²	450
Surface de référence énergétique corrigée	SRE	m ²	450
Besoins de chaleur pour le chauffage selon SIA 380/1	Q _h	MJ/m ² a	136
Dépense par transmission selon SIA 380/1	Q _T	MJ/m ² a	294
Dépense par renouvellement d'air selon SIA 380/1	Q _V	MJ/m ² a	35
Puissance thermique selon SIA 384/201 à -8°C	Valeur proposée:	12.6	kW
Besoins de chaleur pour l'eau chaude selon SIA 380/1	Q _{ww}	MJ/m ² a	50
Eau chaude : pertes d'accumulation et de distribution		%	

Installation de pompe à chaleur			
Nom et type de pompe à chaleur :	2 x Optiheat 6es		
Source de chaleur :	Pompe à chaleur sol/eau ▼		
Utilisation (chauffage ou eau chaude):	Chauffage + Eau chaude ▼		
Accumulateur pour le chauffage	sans accumulateur chauffage ▼		
Mode de fonctionnement de l'installation de PAC :	chauffage avec appoint électrique ▼		
Type d'appoint électrique	Appoint électrique sur réseau hydraulique ▼		
COP aux conditions (B0 / W50):		-	3
Nombre de sondes:		-	2
Longueur par sonde:		m	150
Puissance électrique de la pompe des sondes :		W	380
COP aux conditions (B0 / W35):		-	4.7
Puissance calorifique pour (B0 / W35):		kW	11.8
Elévation de température dans la PAC dans les conditions de la norme	dT distribution	°C	6
Température de départ du chauffage:	T départ	°C	34
Température de retour du chauffage:	T retour	°C	28
Type d'appoint électrique pour l'eau chaude:	Pas d'appoint électrique ▼		
Température garantie de l'eau chaude sans appoint électrique :		°C	55
Température de l'eau chaude avec le réchauffement électrique :		°C	55
Contenu du réservoir d'eau chaude		litres	800

Résultats			
Part d'appoint électrique pour le chauffage	ε =	1.1%	kWh = 203
Pertes en mode chauffage (Démarrage, accumulateur, etc.)		6%	Eta _{ch} = 94%
Pertes en mode eau chaude (Démarrage, accumulateur, etc.)		8%	Eta _{ECS} = 92%
Durée de fonctionnement de la pompe à chaleur			h / a 2'006
Part et COP annuel de la pompe à chaleur pour le chauffage	ε =	98.9%	COP _{a ch} = 4.72
Part et COP annuel de la pompe à chaleur pour la préparatio	ε =	100.0%	COP _{a ECS} = 2.57
Facteur de pondération pour le chauffage p _{ch} :			- 0.73
Facteur de pondération pour l'eau chaude p _{ECS} :			- 0.27
Coefficient de performance annuel pour le chauffage et l'eau chaude COP _{a ch+ECS} :			- 3.86

3.2 Maison en chaînette MINERGIE conventionnelle avec PAC et sonde géothermique

La différence principale entre un bâtiment passif-solaire et un bâtiment conventionnel réside dans la forme de la courbe de charge et en conséquence dans un besoin distinct en chauffage d'appoint.

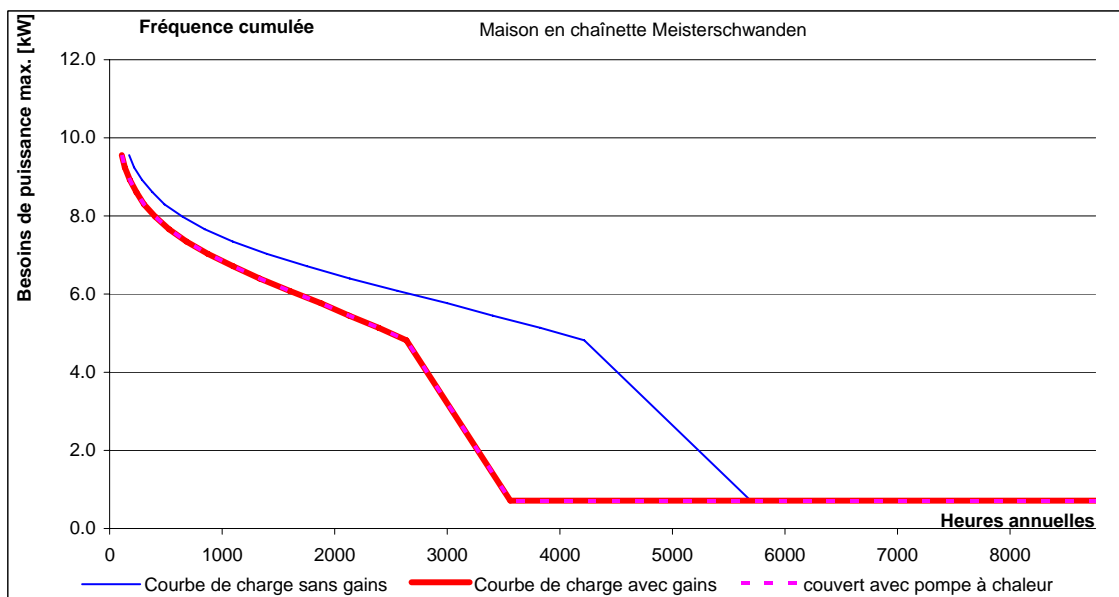
Calcul courbe de charge

Maison en chaînette Meisterschwanden

MINERGIE / FWS / AWEL-En
PACesti.xls / V2.0b Août 06 / HET/JF

Station météo:	Olten		Puiss. therm. à TextMir	8.84	kW
Période chauffage	5696	h/a	Puiss. therm. à -8°C:	8.84	kW
Correction climat.	0	°C	Puiss. pour ECS:	0.71	kW
Besoins chaleur ch. gains de chaleur:	17'000	kWh	Propos. puissance:	8.84	kW
"Part solaire":	10'200	kWh	Calcul puissance:	8.84	kW
Chauffage PAC :	37.5%		Besoins énergie ECS:	6'250	kWh
Pertes de chaleur:	24'876	kWh	Chauffage + ECS:	23'250	kWh
	1'626	kWh	Chauffage d'appoint:	0	kWh

Temp. Extérieure Text [°C]	Puissance nécessaire [kW]	Distribution BIN [%]	Courbe de charge sans gains de chaleur [h]	Fréquence cumulée [h]	Courbe de charge avec gains chaleur [h]	Fréquence cumulée [h]	Livraison chaleur de la PAC [kW]
-8	9.6	3.0%	173	173	108	108	9.6
-7	9.2	0.8%	43	216	27	135	9.2
-6	8.9	1.2%	71	287	44	179	8.9
-5	8.6	1.6%	92	379	58	237	8.6
-4	8.3	1.9%	108	487	68	304	8.3
-3	8.0	2.9%	162	649	101	406	8.0
-2	7.7	3.4%	195	844	122	528	7.7
-1	7.3	4.4%	249	1093	156	683	7.3
0	7.0	5.3%	303	1396	189	873	7.0
1	6.7	6.3%	357	1753	223	1096	6.7
2	6.4	6.7%	379	2132	237	1333	6.4
3	6.1	7.5%	424	2556	265	1598	6.1
4	5.8	7.8%	443	2999	277	1874	5.8
5	5.5	7.1%	404	3403	253	2127	5.5
6	5.1	7.4%	422	3825	264	2391	5.1
7	4.8	6.9%	392	4217	245	2636	4.8
20	0.7	26.0%	1478	5695	924	3559	0.7
30	0.7		3065	8760	5201	8760	0.7
jusqu'à 20°C		100.0%	5695		3559		



Projet :

MINERGIE / FWS / AWEL-En
PACesti.xlt / V2.0b Août 06 / HET/JF

Maison en chaînette Meisterschwanden
conventionnelle

Données concernant le bâtiment			
Station climatique		Olten	▼
Catégorie de bâtiment		Hab. individuel	▼
Surface de référence énergétique	SRE ₀	m ²	450
Surface de référence énergétique corrigée	SRE	m ²	450
Besoins de chaleur pour le chauffage selon SIA 380/1	Q _h	MJ/m ² a	136
Dépense par transmission selon SIA 380/1	Q _T	MJ/m ² a	
Dépense par renouvellement d'air selon SIA 380/1	Q _V	MJ/m ² a	
Puissance thermique selon SIA 384/201 à -8°C	Valeur proposée:	8.8	kW
Besoins de chaleur pour l'eau chaude selon SIA 380/1	Q _{ww}	MJ/m ² a	50
Eau chaude : pertes d'accumulation et de distribution		%	

Installation de pompe à chaleur			
Nom et type de pompe à chaleur :	2 x Optiheat 6es		
Source de chaleur :	Pompe à chaleur sol/eau ▼		
Utilisation (chauffage ou eau chaude):	Chauffage + Eau chaude ▼		
Accumulateur pour le chauffage	sans accumulateur chauffage ▼		
Mode de fonctionnement de l'installation de PAC :	chauffage avec appoint électrique ▼		
Type d'appoint électrique	Appoint électrique sur réseau hydraulique ▼		
COP aux conditions (B0 / W50):		-	3
Nombre de sondes:		-	2
Longueur par sonde:		m	150
Puissance électrique de la pompe des sondes :		W	380
COP aux conditions (B0 / W35):		-	4.7
Puissance calorifique pour (B0 / W35):		kW	11.8
Elévation de température dans la PAC dans les conditions de la norme	dT distribution	°C	6
Température de départ du chauffage:	T départ	°C	34
Température de retour du chauffage:	T retour	°C	28
Type d'appoint électrique pour l'eau chaude:	Pas d'appoint électrique ▼		
Température garantie de l'eau chaude sans appoint électrique :		°C	55
Température de l'eau chaude avec le réchauffement électrique :		°C	55
Contenu du réservoir d'eau chaude		litres	800

Résultats			
Part d'appoint électrique pour le chauffage	ε =	0.0%	kWh = 0
Pertes en mode chauffage (Démarrage, accumulateur, etc.)		6%	Eta _{ch} = 94%
Pertes en mode eau chaude (Démarrage, accumulateur, etc.)		8%	Eta _{ECS} = 92%
Durée de fonctionnement de la pompe à chaleur			h / a 2'117
Part et COP annuel de la pompe à chaleur pour le chauffage	ε =	100.0%	COPa _{ch} = 4.72
Part et COP annuel de la pompe à chaleur pour la préparatio	ε =	100.0%	COPa _{ECS} = 2.57
Facteur de pondération pour le chauffage p _{ch} :			- 0.73
Facteur de pondération pour l'eau chaude p _{ECS} :			- 0.27
Coefficient de performance annuel pour le chauffage et l'eau chaude COPa ch+ECS:			- 3.86

3.3 Pompe à chaleur air-eau avec radiateurs

Dans l'exemple ci-dessous on trouve le calcul d'une pompe à chaleur air-eau avec une distribution de chaleur par radiateurs:

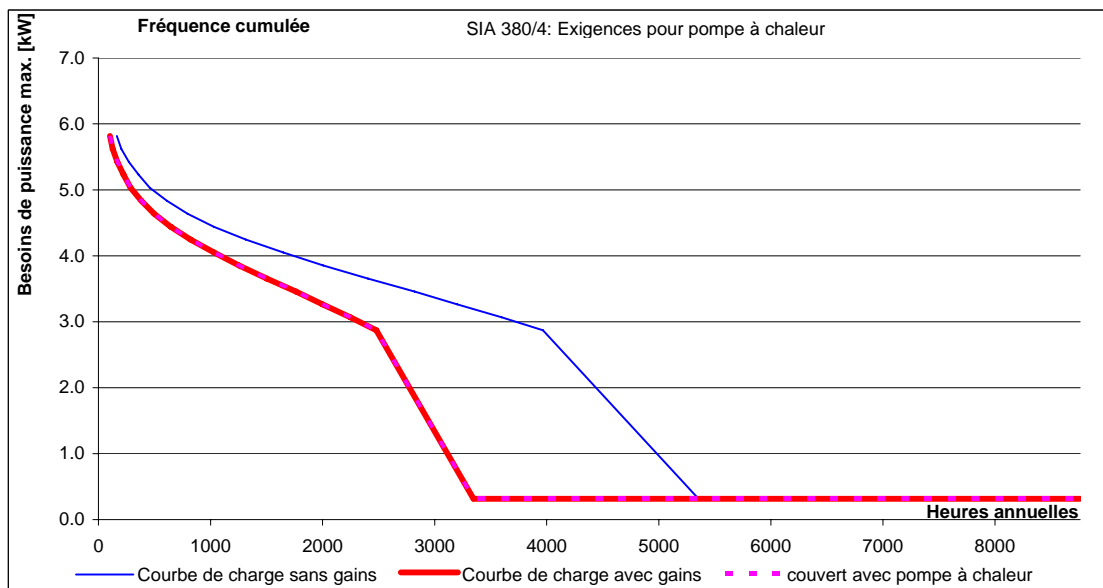
Calcul courbe de charge

SIA 380/4: Exigences pour pompe à chaleur

MINERGIE / FWS / AWEL-En
PACesti.xlt / V2.0b Août 06 / HET/JF

Station météo:	Zürich SMA	Puiss. therm. à TextMir:	5.50	kW
Période chauffage	5865 h/a	Puiss. therm. à -8°C:	5.50	kW
Correction climat.	0 °C	Puiss. pour ECS:	0.32	kW
Besoins chaleur ch.	10'000 kWh	Propos. puissance:	5.02	kW
gains de chaleur:	6'000 kWh	Calcul puissance:	5.50	kW
"Part solaire":	37.5%	Besoins énergie ECS:	2'778	kWh
Chauffage PAC :	13'432 kWh	Chauffage + ECS:	12'778	kWh
Pertes de chaleur:	654 kWh	Chauffage d'appoint:	0	kWh

Temp. Extérieure Text [°C]	Puissance nécessaire [kW]	Distribution BIN [%]	Courbe de charge sans gains de chaleur [h]	Fréquence cumulée [h]	Courbe de charge avec gains chaleur [h]	Fréquence cumulée [h]	Livraison chaleur de la PAC [kW]
-8	5.8	3.0%	163	163	102	102	5.8
-7	5.6	0.8%	41	204	26	127	5.6
-6	5.4	1.2%	67	270	42	169	5.4
-5	5.2	1.6%	87	357	54	223	5.2
-4	5.0	1.9%	101	458	63	286	5.0
-3	4.8	2.9%	152	611	95	382	4.8
-2	4.6	3.4%	184	794	115	496	4.6
-1	4.4	4.4%	234	1028	146	643	4.4
0	4.2	5.3%	285	1313	178	821	4.2
1	4.0	6.3%	336	1649	210	1031	4.0
2	3.9	6.7%	356	2005	223	1253	3.9
3	3.7	7.5%	399	2404	249	1503	3.7
4	3.5	7.8%	416	2821	260	1763	3.5
5	3.3	7.1%	380	3200	237	2000	3.3
6	3.1	7.4%	397	3598	248	2248	3.1
7	2.9	6.9%	368	3966	230	2478	2.9
20	0.3	26.0%	1390	5355	869	3347	0.3
30	0.3		3405	8760	5413	8760	0.3
jusqu'à 20°C							
		100.0%	5355		3347		



Projet :

MINERGIE / FWS / AWEL-En
PACesti.xlt / V2.0b Août 06 / HET/JF

SIA 380/4: Exigences pour pompe à chaleur
Pompe à chaleur air-eau, valeur limite pour COP avec radiateur

Données concernant le bâtiment			
Station climatique		Zürich SMA	▼
Catégorie de bâtiment		Hab. individuel	▼
Surface de référence énergétique	SRE ₀	m ²	200
Surface de référence énergétique corrigée	SRE	m ²	200
Besoins de chaleur pour le chauffage selon SIA 380/1	Q _h	MJ/m ² a	180
Dépense par transmission selon SIA 380/1	Q _T	MJ/m ² a	
Dépense par renouvellement d'air selon SIA 380/1	Q _V	MJ/m ² a	
Puissance thermique selon SIA 384/201 à -8°C	Valeur proposée: 5.0	kW	5.5
Besoins de chaleur pour l'eau chaude selon SIA 380/1	Q _{ww}	MJ/m ² a	50
Eau chaude : pertes d'accumulation et de distribution		%	

Installation de pompe à chaleur			
Nom et type de pompe à chaleur :	KKW LI10P (R290)		
Source de chaleur :	Pompe à chaleur air/eau		▼
Utilisation (chauffage ou eau chaude):	Chauffage + Eau chaude		▼
Accumulateur pour le chauffage	sans accumulateur chauffage		▼
Mode de fonctionnement de l'installation de PAC :	chauffage monovalent		▼
			▼
COP aux conditions 7 °C / 50°C (A7 / W50):		-	3.2
COP aux conditions -7 °C / 35°C (A-7 / W35):		-	2.9
Puissance calorifique à -7 °C (A-7 / W35):		kW	6.8
COP aux conditions +2 °C / 35 °C (A2 / W35):		-	3.7
Puissance calorifique à +2 °C (A2 / W35):		kW	8.3
COP aux conditions +7 °C / 35 °C (A7 / W35):		-	4.4
Puissance calorifique à +7 °C (A7 / W35):		kW	10.1
Élévation de température dans la PAC dans les conditions de la norme	dT distribution	°C	9.1
Température de départ du chauffage:	T départ	°C	45
Température de retour du chauffage:	T retour	°C	35
Type d'appoint électrique pour l'eau chaude:	App. élect. pour réchauffement suppl. ▼		
Température garantie de l'eau chaude sans appoint électrique :		°C	55
Température de l'eau chaude avec le réchauffement électrique :		°C	60
Contenu du réservoir d'eau chaude		litres	300

Résultats			
		0.0%	
Part d'appoint électrique pour la préparation d'eau chaude (I	ε =	10.0%	kWh = 302
Pertes en mode chauffage (Démarrage, accumulateur, etc.)		4%	Eta _{ch} = 96%
Pertes en mode eau chaude (Démarrage, accumulateur, etc.)		8%	Eta _{ECS} = 92%
Durée de fonctionnement de la pompe à chaleur			h / a 1'559
Part et COP annuel de la pompe à chaleur pour le chauffage	ε =	100.0%	COPa_{ch} = 3.03
Part et COP annuel de la pompe à chaleur pour la préparati	ε =	90.0%	COPa_{ECS} = 2.68
Facteur de pondération pour le chauffage p _{ch} :		-	0.78
Facteur de pondération pour l'eau chaude p _{ECS} :		-	0.22
Coefficient de performance annuel pour le chauffage et l'eau chaude COPa ch+ECS:		-	2.95

3.4 Maison passive-solaire avec PAC monoénergétique air/eau

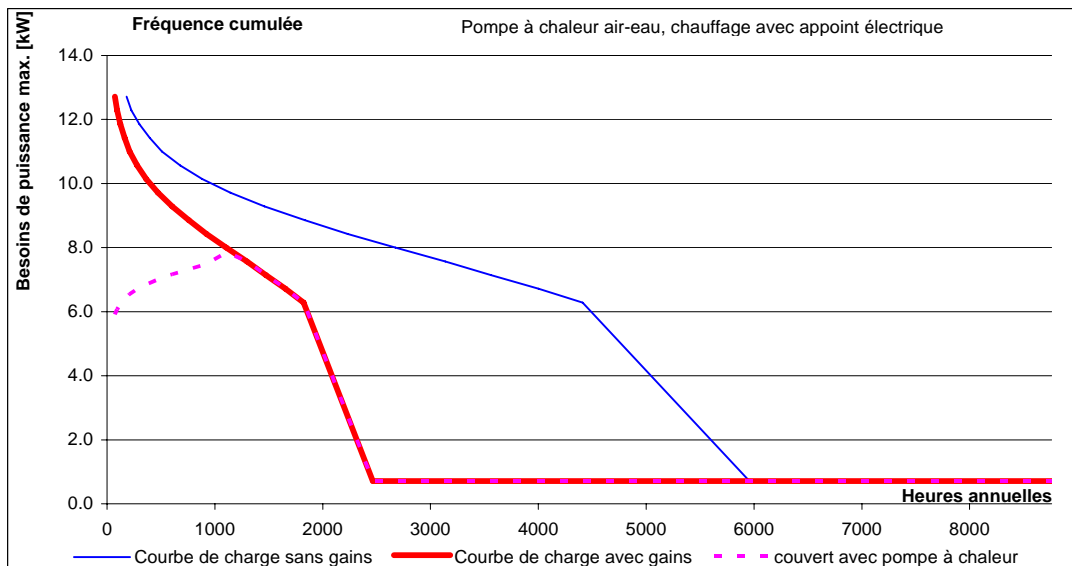
Dans l'exemple illustré ci-dessous, une maison en chaînette MINERGIE passive-solaire est chauffée avec une pompe à chaleur air/eau, monoénergétique (bivalente avec apport électrique). L'utilité de la nouvelle méthode de calcul est mise en évidence dans cet exemple : point de bivalence et besoins d'électricité pour le chauffage d'appoint sont prédits facilement.

MINERGIE / FWS / AWEL-En
PACesti.xlt /V2.0b Août 06 / HET/JF

Calcul courbe de charge **Pompe à chaleur air-eau, chauffage avec appoint électrique**

Station météo:	Olten	Puiss. therm. à TextMir	12.00	kW
Période chauffage	5696 h/a	Puiss. therm. à -8°C:	12.00	kW
Correction climat.	0 °C	Puiss. pour ECS:	0.71	kW
Besoins chaleur ch.	17'000 kWh	Propos. puissance:	12.56	kW
gains de chaleur:	24'125 kWh	Calcul puissance:	12.00	kW
"Part solaire":	58.7%	Besoins énergie ECS:	6'250	kWh
Chauffage PAC :	21'940 kWh	Chauffage + ECS:	23'250	kWh
Pertes de chaleur:	1'434 kWh	Chauffage d'appoint:	2'744	kWh

Temp. Extérieure Text [°C]	Puissance nécessaire [kW]	Distribution BIN [%]	Courbe de charge sans gains de chaleur [h]	Fréquence cumulée [h]	Courbe de charge avec gains chaleur [h]	Fréquence cumulée [h]	Livraison chaleur de la PAC [kW]
-8	12.7	3.0%	181	181	75	75	5.9
-7	12.3	0.8%	45	226	19	93	6.1
-6	11.9	1.2%	74	300	31	124	6.2
-5	11.4	1.6%	96	397	40	164	6.4
-4	11.0	1.9%	113	510	47	211	6.5
-3	10.6	2.9%	170	679	70	281	6.7
-2	10.1	3.4%	204	883	84	365	6.9
-1	9.7	4.4%	261	1144	108	473	7.0
0	9.3	5.3%	317	1461	131	604	7.2
1	8.9	6.3%	374	1834	154	758	7.3
2	8.4	6.7%	397	2231	164	922	7.5
3	8.0	7.5%	444	2674	183	1106	7.9
4	7.6	7.8%	464	3138	192	1297	7.6
5	7.1	7.1%	423	3561	175	1472	7.1
6	6.7	7.4%	442	4002	183	1654	6.7
7	6.3	6.9%	410	4412	170	1824	6.3
20	0.7	26.0%	1546	5959	639	2463	0.7
30	0.7		2801	8760	6297	8760	0.7
jusqu'à 20°C		100.0%	5959		2463		



Projet :

MINERGIE / FWS / AWEL-En
PACesti.xlt / V2.0b Août 06 / HET/JF

Pompe à chaleur air-eau, chauffage avec appoint électrique
maison passive-solaire
adaption: pompe à chaleur avec certificat D-A-C-H

Données concernant le bâtiment			
Station climatique		Olten	▼
Catégorie de bâtiment		Hab. individuel	▼
Surface de référence énergétique	SRE ₀	m ²	450
Surface de référence énergétique corrigée	SRE	m ²	450
Besoins de chaleur pour le chauffage selon SIA 380/1	Q _h	MJ/m ² a	136
Dépense par transmission selon SIA 380/1	Q _T	MJ/m ² a	294
Dépense par renouvellement d'air selon SIA 380/1	Q _V	MJ/m ² a	35
Puissance thermique selon SIA 384/201 à -8°C	Valeur proposée:	12.6	kW
Besoins de chaleur pour l'eau chaude selon SIA 380/1	Q _{ww}	MJ/m ² a	50
Eau chaude : pertes d'accumulation et de distribution		%	

Installation de pompe à chaleur			
Nom et type de pompe à chaleur :	pac typique avec certificat D-A-C-H		
Source de chaleur :	Pompe à chaleur air/eau		▼
Utilisation (chauffage ou eau chaude):	Chauffage + Eau chaude		▼
Accumulateur pour le chauffage	sans accumulateur chauffage		▼
Mode de fonctionnement de l'installation de PAC :	chauffage avec appoint électrique		▼
Type d'appoint électrique	Appoint électrique sur réseau hydraulique		▼
COP aux conditions 7 °C / 50°C (A7 / W50):		-	3
COP aux conditions -7 °C / 35°C (A-7 / W35):		-	2.5
Puissance calorifique à -7 °C (A-7 / W35):		kW	6.5
COP aux conditions +2 °C / 35 °C (A2 / W35):		-	3
Puissance calorifique à +2 °C (A2 / W35):		kW	8
COP aux conditions +7 °C / 35 °C (A7 / W35):		-	3.5
Puissance calorifique à +7 °C (A7 / W35):		kW	10
Elévation de température dans la PAC dans les conditions de la norme	dT distribution	°C	5
Température de départ du chauffage:	T départ	°C	35
Température de retour du chauffage:	T retour	°C	30
Type d'appoint électrique pour l'eau chaude:	App. élect. pour réchauffement suppl.		▼
Température garantie de l'eau chaude sans appoint électrique :		°C	55
Température de l'eau chaude avec le réchauffement électrique :		°C	60
Contenu du réservoir d'eau chaude		litres	300

Résultats			
Part d'appoint électrique pour le chauffage	$\epsilon =$	16.1%	kWh = 2'919
Part d'appoint électrique pour la préparation d'eau chaude (l	$\epsilon =$	10.0%	kWh = 679
Pertes en mode chauffage (Démarrage, accumulateur, etc.)		6%	Eta _{ch} = 94%
Pertes en mode eau chaude (Démarrage, accumulateur, etc.)		8%	Eta _{ECS} = 92%
Durée de fonctionnement de la pompe à chaleur			h / a 2'422
Part et COP annuel de la pompe à chaleur pour le chauffage:	$\epsilon =$	83.9%	COP _{a, ch} = 3.10
Part et COP annuel de la pompe à chaleur pour la préparati	$\epsilon =$	90.0%	COP _{a, ECS} = 2.51
Facteur de pondération pour le chauffage p _{ch} :			- 0.73
Facteur de pondération pour l'eau chaude p _{ECS} :			- 0.27
Coefficient de performance annuel pour le chauffage et l'eau chaude COP _{a ch+ECS} :			- 2.91

4 Tableau des symboles

4.1 Symboles latins

COP_{eff}	-	Coefficient de performance effectif en conditions d'exploitation
COP_h	-	Coefficient de performance pour chauffage
COP_{korr}	-	Coefficient de performance pour écart effectif
COP_{Ref}	-	Coefficient de performance pour conditions de référence (valeurs lors d'essai)
COP_{ww}	-	Coefficient de performance eau chaude sanitaire
SRE	[m ²]	Surface de référence énergétique
G	-	Degré de qualité
DJ _{20/12}	[°C*d]	Degré jour de chauffage à température de 20°C et limite de chauffage 12°C
P_{Pompe}	[kW]	Besoin de puissance électrique de la pompe de captage
T_{min}	[°C]	Température de dimensionnement
T_{mittel}	[°C]	Temp. extérieure moyenne pendant la période de chauffage
T_{kond}	[K]	Température de condensation
T_{Verd}	[K]	Température d'évaporation
ΔT_{Spr}	[K]	Température d'écart de la dépression
T_{Vort}	[K]	Température de départ
T_q	[K]	Température de source du fluide de sonde à l'entrée dans l'évaporateur
Q_h	[MJ/m ²]	Besoin de chaleur de chauffage par an selon SIA 380/1
Q_T	[MJ/m ²]	Pertes de chaleur par transmission de chaleur/an selon SIA 380/1
Q_V	[MJ/m ²]	Pertes de chaleur par renouvellement d'air/an - SIA 380/1
Q_{ww}	[MJ/m ²]	Besoin d'eau chaude/an selon SIA 380/1
\dot{Q}_{WP}	[kW]	Emission de chaleur de la pompe à chaleur
$\dot{Q}_{B0/W35}$	[kW]	Emission de chaleur de la pompe à chaleur au point de mesure 0°C de température source et 35°C de température de départ

4.2 Symboles grecs

ε_{carnot}	Valeur de puissance de Carnot (avec condensation et évaporation)
η_{ch}	Rendement sommaire de la production de chaleur pour le chauffage (tient compte de toutes les pertes non contenues dans le COP)
η_{ww}	Rendement sommaire de la production de chaleur pour l'eau chaude
η_{Vert}	Pertes de distribution d'eau chaude

4.3 Indices

eff	Indice pour les valeurs effectives réelles
korr	Indice pour les COP avec correction pour l'écart
Ref	Indice de point de référence (valeurs lors des essais)
Vorl	Indice pour le départ du chauffage à la sortie du condensateur

5 Annexe

5.1 Influence de l'élévation de la température standard : dérivation

degré de qualité constant

En partant du COP de référence pour des conditions cadres données le COP effectif doit être calculé. En admettant un degré de qualité constant

$$G \equiv \frac{COP_{korr}}{\varepsilon_{Carnot,eff}} = \frac{COP_{Ref}}{\varepsilon_{Carnot,Ref}} \quad \text{Eq. 5.1}$$

suit

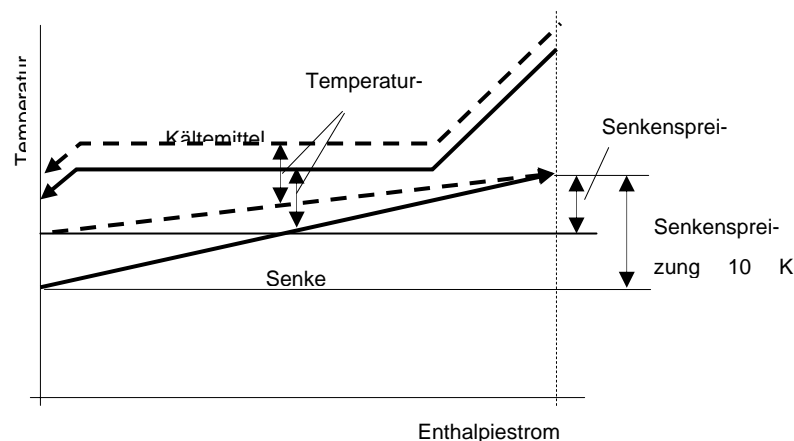
$$COP_{korr} = COP_{Ref} * \frac{\varepsilon_{Carnot,eff}}{\varepsilon_{Carnot,Ref}} \quad \text{Eq. 5.2}$$

Et ainsi vaut

$$COP_{korr} = COP_{Ref} * \frac{T_{kond,eff}}{T_{kond,eff} - T_{verd,eff}} * \frac{T_{kond,Ref} - T_{verd,Ref}}{T_{kond,Ref}} \approx COP_{Ref} * \frac{T_{kond,Ref} - T_{verd,Ref}}{T_{kond,eff} - T_{verd,eff}} \quad \text{Eq. 5.3}$$

Dans l'équation (Eq 5.3) les températures doivent être introduites en [K]. Même si la température de condensation de référence et la température de condensation effective diffèrent légèrement, le quotient des deux températures vaut ≈ 1 pour la précision exigée ici.

L'influence de l'écart de dépression peut être dérivé physiquement comme suit:



La différence de température entre la température de condensation et la température de dépression moyenne, de valeur 4 [K], a été choisie sans trop de marge. Il ressort du graphe qu'avec une température de départ donnée, la température de condensation augmente ou diminue de la moitié de la température de l'écart de dépression. Pour la différence de température entre l'air de la source (entrée) et la température d'évaporation on emploie 15 [K].

Si, au lieu des températures de condensation et d'évaporation, on utilise les températures de départ et de source dans (Eq 5.3), la formule est :

$$\begin{aligned}
 \text{COP}_{\text{korr}} &= \text{COP}_{\text{Ref}} * \frac{\frac{T_{\text{Vorl,Ref}} + T_{\text{Rück,Ref}}}{2} + 4[\text{K}] - (T_{\text{q,Ref}} - 15[\text{K}])}{\frac{T_{\text{Vorl,eff}} + T_{\text{Rück,eff}}}{2} + 4[\text{K}] - (T_{\text{q,eff}} - 15[\text{K}])} = \\
 &= \text{COP}_{\text{Ref}} * \frac{T_{\text{Vorl}} - \frac{\Delta T_{\text{Spr,Ref}}}{2} + 4[\text{K}] - (T_{\text{q}} - 15[\text{K}])}{T_{\text{Vorl}} - \frac{\Delta T_{\text{Spr,eff}}}{2} + 4[\text{K}] - (T_{\text{q}} - 15[\text{K}])} = \\
 &= \text{COP}_{\text{Ref}} * \frac{\left\{ T_{\text{Vorl}} - \frac{\Delta T_{\text{Spr,Ref}}}{2} + 4[\text{K}] - (T_{\text{q}} + 15[\text{K}]) \right\}}{\left\{ T_{\text{Vorl}} - \frac{\Delta T_{\text{Spr,Ref}}}{2} + 4[\text{K}] - (T_{\text{q}} - 15[\text{K}]) \right\} + \frac{\Delta T_{\text{Spr,Ref}} - \Delta T_{\text{Spr,eff}}}{2}} \approx \\
 &\approx \text{COP}_{\text{Ref}} * \left[1 - \frac{\frac{\Delta T_{\text{Spr,Ref}} - \Delta T_{\text{Spr,eff}}}{2}}{\left\{ T_{\text{Vorl}} - \frac{\Delta T_{\text{Spr,Ref}}}{2} + 4[\text{K}] - (T_{\text{q}} - 15[\text{K}]) \right\}} \right]
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 5.4}$$

Les températures d'évaporation ne varient guère suite au changement de l'écart. C'est pourquoi, dans l'(Eq 5.4), la température d'évaporation réelle et de référence sont identiques. Comme les températures de départ sont fixées lors de la conversion et comme les températures d'évaporation sont pratiquement identiques, l'indice peut être omis pour ces températures. Il ne faut plus que distinguer entre les écarts de dépression réels et de référence. Le dernier pas provient d'une approximation mathématique pour les petites différences entre numérateur et dénominateur.

Comparaison calcul-
mesure

Point de travail	COP _{Ref} pour ΔT _{Spr} =10 [K]	COP _{korr} pour ΔT _{Spr} =5 [K]	Différence calculée Eq. 5.4	Différence effective, mesurée
A2/W35	3.27	3.09	-5.32 %	-3.7 %
A15/W50	3.48	3.30	-5.10 %	-5.5 %

5.2 Données climatiques

Les stations et données climatiques suivantes valent pour PACesti:

Station climatique 46	Altitude m.ü.M.	Température °C		DJ seul *HT 20/12	GH seul HT MJ/m ² a	GH an MJ/m ² a
		période moy. de chauffage	minimale proposée			
Airolo	1167	3.0	-8	4615	2548	4547
Altdorf	449	4.4	-6	3443	1691	4378
Arosa	1865	1.1	-12	6317	4218	4954
Bad Ragaz	518	3.8	-9	3581	1776	4501
Basel-Binningen	316	4.4	-8	3348	1478	4130
Beznau	330	4.1	-8	3510	1509	4144
Beatenberg	1180	3.6	-8	4404	2583	4544
Bern	572	3.8	-8	3668	1671	4284
Bever	1712	0.2	-16	6688	4255	4975
Biel	434	3.9	-8	3672	1614	4285
Château-d'Oex	994	2.9	-11	4673	2794	4807
Chaux-de-Fonds	990	3.8	-10	4185	2325	4448
Chippis	522	3.7	-7	3381	1768	5031
Chur	582	3.8	-8	3527	1789	4509
Comprovasco	544	4.8	-4	3304	1931	4916
Davos	1561	1.3	-14	5884	3746	4907
Delémont	416	3.9	-7	3683	1651	4036
Disentis	1173	3.4	-9	4439	2678	4656
Einsiedeln	914	2.9	-10	4540	2327	4257
Engelberg	1018	2.8	-10	4786	2703	4461
Fey-Nendaz	780	3.8	-9	3780	2200	5035
Fribourg	677	3.7	-9	3872	1880	4392
Genève	405	4.9	-5	3072	1392	4446
Glarus	480	3.4	-9	3876	1857	4335
Göschenen	1109	3.0	-9	4849	2859	4517
Gr. St. Bernhard	2472	-1.4	-7	7679	5273	5456
Heiden	809	3.3	-10	4332	2210	4205
Interlaken	568	3.7	-7	3800	1857	4303
Jungfrauoch	3576	-8.0	-21	10215	5509	5509
Kreuzlingen	446	3.9	-8	3668	1647	4213
Langenbruck	740	3.5	-9	4132	2085	4288
Langnau i.E.	692	3.6	-9	3961	1862	4131
Lausanne	589	4.2	-6	3377	1603	4514
Leysin	1350	3.4	-9	4722	3071	4893
Locarno-Monti	379	5.5	-2	2631	1444	4943
Lugano	275	5.5	-2	2644	1341	4658
Luzern	498	4.0	-8	3653	1549	3939
Marsens	721	3.7	-9	3933	1983	4408
Meiringen	605	3.7	-7	3730	1811	4318
Montana	1509	3.1	-9	4779	3271	5259
Montreux	376	4.8	-5	3133	1462	4313
Mt. Soleil	1183	3.0	-10	4909	2839	4428
Neuchâtel	487	4.2	-7	3414	1489	4283
Oeschberg	483	3.6	-8	3876	1706	4129
Olten	412	3.9	-8	3588	1453	3962
Rigi Kulm	1775	1.4	-11	6027	3919	4655
Robbia	1078	3.4	-7	4371	2749	4946
Säntis	2500	-2.1	-16	8035	4873	4925
Schaffhausen	435	3.7	-8	3695	1597	4169
Schuls	1253	1.7	-12	5119	3030	4926
Sion	549	4.0	-7	3237	1653	4908
St. Gallen	664	3.6	-10	4046	1947	4210
St. Moritz	1833	0.9	-14	6407	4222	4958
Weissfluhjoch	2667	-2.9	-17	8238	5281	5307
Zermatt	1610	2.2	-12	5830	4378	5400
Zürich SMA	556	3.8	-8	3717	1716	4285
Zürich Stadt	411	4.3	-7	3260	1352	4156

* HT = Jours de chauffage

Les valeurs de rayonnement GH et l'altitude de la station climatique ne figurent qu'à titre informatif et ne sont pas incluses dans le calcul. Les degrés de chauffage jour $DJ_{20/12}$ (Eq. 2.3, Eq. 2.6, Eq. 2.7), la température proposée $T_{a_{min}}$ (Eq. 2.1, Eq. 2.2) et la température moyenne de la période de chauffage $T_{a_{mittel}}$ (Eq. 2.6, Eq. 2.7) sont utilisés.

5.3 Catégories d'utilisation

Dans PACesti les catégories d'utilisation suivantes selon SIA 380/1 ont été définies :

Catégorie: 1			
Valeurs limites	H_{g0}	ΔH_g	Q_{ww}
Hab. collectif	80	90	75
Hab. individuel	90	90	50
Admin.	75	90	25
Ecoles	90	90	25
Commerce	60	90	25
Restaur.	95	90	200
Lieux rassemb.	105	90	50
Hôpitaux	100	100	100
Industrie	75	80	25
Dépôts	80	80	5
Inst. sport.	95	80	300
Piscines couv.	70	130	300

Les valeurs limites H_{g0} et ΔH_g ne sont pas utilisées pour l'instant. Q_{ww} est utilisé comme base pour le calcul des besoins d'eau chaude (Eq. 2.4), les pertes par accumulation et distribution sont additionnées à Q_{ww} .

5.4 Calcul manuel de la Fachhochschule Lucerne

La méthode de calcul manuelle présentée ici, destinée aux installations de chauffage avec pompes à chaleur monovalentes, a été développée à la Fachhochschule de Lucerne¹⁶ par M. Wetter et le Prof. G. Zweifel.

Ce procédé permet de déterminer le coefficient de performance annuel COPa des installations de chauffage avec pompes à chaleur monovalentes, avec ou sans la préparation de l'eau chaude sanitaire, au moyen d'un calcul manuel simple. Le calcul se fait au moyen des coefficients de performance COP livrés par les fabricants de pompes à chaleur. Ces valeurs font référence à la norme EN 255.

L'estimation peut se faire sans programme informatique. En comparant la méthode manuelle avec les coefficients de performance annuels calculés avec la méthode de simulation, on trouve une précision de la méthode manuelle de $\pm 10\%$.

¹⁶ <http://www.hta.fhz.ch>