



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

SOL-PAC

ANALYSE DES PERFORMANCES DU COUPLE D'UNE POMPE À CHALEUR AVEC UNE INSTALLATION SOLAIRE THERMIQUE POUR LA RÉNOVATION

Rapport final

Élaboré par

S. Citherlet, HEIG-VD
stephane.citherlet@heig-vd.ch,
J. Bony, HEIG-VD
jacques.bony@heig-vd.ch
B. Nguyen, HEIG-VD

Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD) /
Laboratoire d'Energétique Solaire et de Physique du Bâtiment (LESBAT)
Avenue des Sports 14
1401 Yverdon-les-Bains
www.heig-vd.ch

Impressum

Date : 30 juin 2008

Sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie, programme de recherche 'Chaleur ambiante, CCF, froid'

Numéro de projet de l'OFEN 102'321

Mühlestrasse 4, CH - 3063 Ittigen

Adresse postal : CH - 3003 Berne

www.bfe.admin.ch

Chef de programme 'R&D'Chaleur ambiante, CCF, froid': Thomas Kopp tkopp@hsr.ch

Responsable de domaine OFEN : Andreas Eckmanns andreas.eckmanns@bfe.admin.ch

Source d'acquisition de cette publication : www.recherche-energetique.ch

Le ou les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

Table des matières

Résumé	3
Abstract	3
1. But du travail.....	4
2. Descriptions des installations	4
3. Paramètres de simulation.....	5
3.1. Paramètres généraux des systèmes simulés.....	6
3.2. Climats de référence.....	7
3.3. Bâtiments de référence.....	8
3.3.1. Maison individuelle.....	8
3.3.2. Bâtiment administratif.....	9
3.3.3. Profil de besoins en eau chaude sanitaire pour la maison individuelle	10
3.3.4. Profil de besoins en eau chaude sanitaire pour le bâtiment administratif	10
3.4. Pompe à chaleur.....	11
3.5. Aéro-réchauffeur.....	12
3.6. Capteurs solaires	13
3.7. Stratégie de contrôle du système	13
3.7.1. Courbe de chauffe.....	13
3.7.2. Consigne ECS.....	14
3.7.3. PAC	14
3.7.4. Circuit primaire	14
4. Hypothèses et définitions	14
4.1. Cycle de dégivrage	14
4.2. Définitions des COP	15
4.3. Définition d'une installation de référence au mazout.....	16
5. Résultats.....	16
5.1. Analyse énergétique	16
5.1.1. Comparaisons entre variantes	16
5.1.2. Comparaisons entre types de capteurs	18
5.1.3. Variante S3 avec ou sans PCM (matériaux à changement de phase)	19
5.1.4. Optimisation de la variante S3	19
5.1.5. Mix entre les variantes S2 et S3	21
5.2. Analyse économique	22
6. Synthèse des résultats	28
6.1. Energie.....	28
6.2. Coûts.....	28
6.3. dégivrage	29
7. Conclusions	31
Répertoire des symboles et abréviations	32
Références	32

Annexes.....	33
Annexe A1 : Schéma de principe du deck de simulation pour la variante S3.....	33
Annexe A2 : Tableaux des coûts annuels pour différentes variantes	34

Résumé

Le but de cette étude est d'analyser les performances énergétiques et économiques de différents types d'installations combinant une pompe à chaleur sol/eau avec un aéro-réchauffeur muni de capteurs solaires thermiques. Différentes grandeurs telles que le coefficient de performance annuel ou la consommation électrique ont été comparées entre les différentes variantes étudiées.

L'optimisation de la régulation et du stockage d'énergie a été prospecté afin de réduire le temps d'enclenchement de l'aéro-réchauffeur.

Cette étude a été réalisée par simulation dynamique, en utilisant TRNSYS. Dans le laps de temps impartis à cette étude, le givrage de l'aéro-réchauffeur ainsi que de ces cycles de dégivrage n'ont pas pu être considéré dans ce projet, car aucun modèle numérique ne permet de prendre en compte de ce phénomène.

Comme le montre cette étude, la solution la plus économique reste la pompe à chaleur sans capteurs solaires thermiques au coût actuel de l'électricité. Toutefois, du point de vue énergétique, le coefficient de performance annuel global de l'installation peut être amélioré de 15% à 36% selon les climats.

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the energetic and economic performances of various types of soil/water heat pump coupled with a fan coil fitted with solar thermal collectors. Different indicators such as the annual coefficient of performance or the electricity consumption have been compared between the different analysed systems.

The optimization of the energy control system and energy storage was investigated in order to reduce the running time of the fan coil.

This study has been undertaken with TRNSYS. The icing of the fan coil as well as its defrosting cycles could not be taken into account because within the framework of this project, because of a lack of a numerical model.

At current electricity prices, the most economical solution remains the heat pump without solar thermal collectors. However, from an energy point of view, the annual overall coefficient of performance of the installation may be improved by 15 to 36% depending on the climate.

1. But du travail

A la demande de l'Office Fédéral de l'Energie, la HEIG-VD a été mandatée afin de prospector le potentiel d'utilisation de capteurs solaires thermiques couplés à une pompe à chaleur sol/eau sans sonde géothermique mais avec un aéro-réchauffeur. La raison principale de ne pas utiliser de sonde géothermique est de pouvoir utiliser une PAC sol/eau dans la rénovation, où il n'est pas toujours possible de réaliser des forages. Les capteurs solaires thermiques sont utilisés de manière à limiter les cycles de dégivrage en augmentant ainsi le coefficient de performance annuel (COPa).

Le couplage d'une pompe à chaleur (PAC) avec une installation solaire thermique pour en améliorer les performances n'est pas nouveau. Certaines études font état de capteurs solaires comme évaporateur [1] à [3]. D'autres études ont été réalisées avec des capteurs solaires thermiques traditionnels montés en série avec des sondes géothermiques (SGV) afin de les recharger thermiquement [4]. Par contre, il semble que le couplage de capteurs solaires thermiques avec un aéro-réchauffeur pour une pompe saumure/eau ne soit pour l'heure un sujet d'étude référencé. Dans le cadre de remplacement d'une chaudière gaz ou mazout par une PAC, il n'est pas toujours possible techniquement ou financièrement de proposer une PAC avec SGV.

2. Descriptions des installations

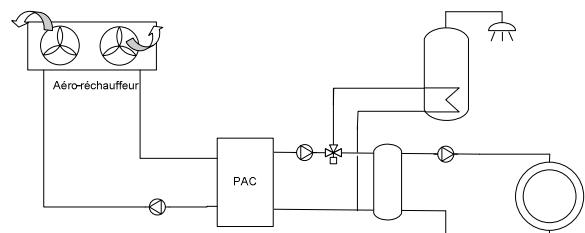
Les solutions étudiées sont composées de capteurs solaires permettant de monter la température du circuit froid de la PAC afin d'en améliorer le COP grâce à deux aspects différents. Premièrement, l'augmentation de la température d'entrée de l'évaporateur accroît directement la valeur du COP. Deuxièmement, la température du circuit froid étant augmentée, il y aura moins de cycles de dégivrage de la batterie de froid et en conséquence le COP global sera plus élevé.

Afin de prospector le potentiel d'utilisation de capteurs solaires thermiques avec une pompe à chaleur, des simulations annuelles ont été effectuées pour différentes installations. Le tableau ci-dessous représente les schémas de principes de ces différentes installations.

Variante : S0

Sans capteur solaire : seul l'aéro-réchauffeur fournit l'énergie à la PAC.

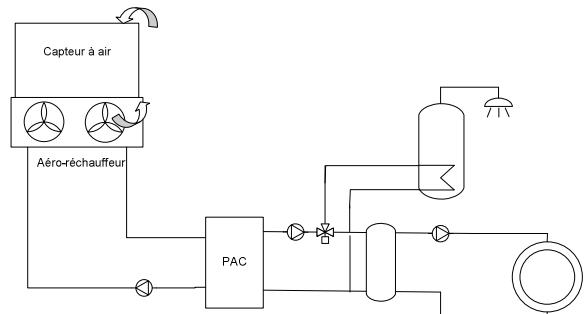
- Permet d'avoir une référence pour estimer le gain avec l'utilisation de capteurs solaires.



Variante: S1-air

Capteurs solaires à air : Les capteurs à air sont directement reliés à l'entrée d'air de l'aéro-réchauffeur.

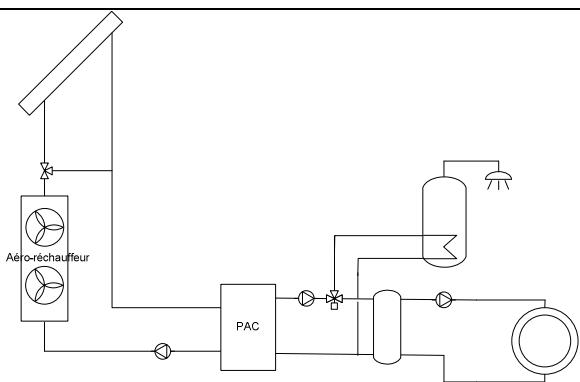
- conception simple
- investissement moindre
- régulation simple



Variante: S1

Capteurs solaires en série avec l'aéro-réchauffeur.

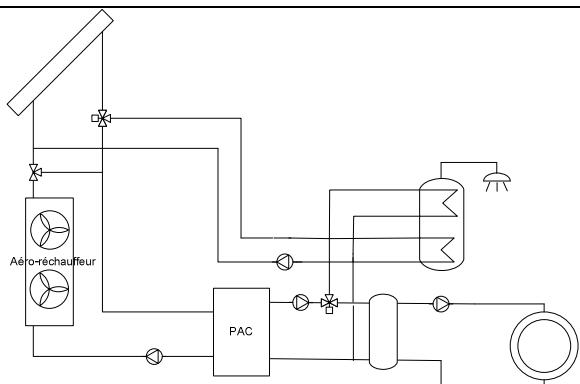
- conception simple
- investissement moindre
- régulation simple



Variante: S2

Gestion de l'énergie – Les capteurs solaires sont utilisés soit pour la PAC soit en direct pour l'eau chaude sanitaire :

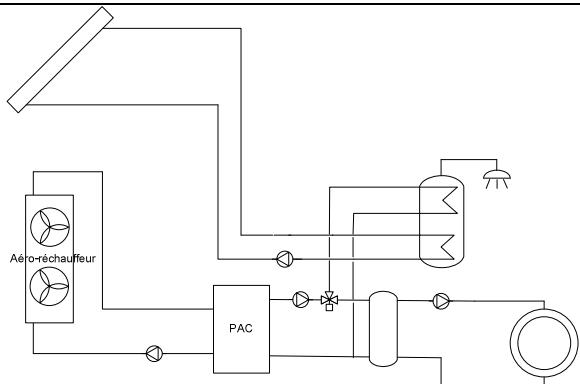
- utilisation optimale des capteurs solaires
- régulation plus complexe



Variante: S2bis

Gestion de l'énergie – utilisation en direct des capteurs solaires pour l'eau chaude sanitaire (en été) sans ne jamais passer par la PAC:

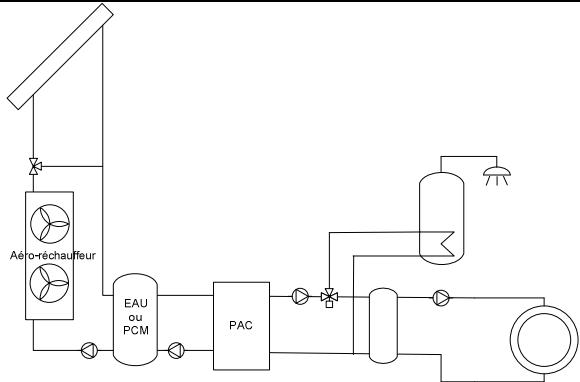
Equivalent à la version S0 additionnée d'une installation solaire pour l'ECS.



Variante: S3

Stockage d'énergie (eau ou PCM) à bas niveau de température (15 à 25 [°C]) pour le circuit primaire :

- augmentation des performances
- coût plus élevé



Pour les variantes S1 à S3, nous avons utilisé 3 types de capteurs différents : plan non vitré (NV), plan vitré (V) et à tubes sous vide (TSV).

3. Paramètres de simulation

Pour cette étude, le logiciel *TRNSYS* version 16 sera utilisé. Ce dernier est couramment employé pour des installations techniques de chauffage ou de climatisation dans le bâtiment.

3.1. PARAMETRES GENERAUX DES SYSTEMES SIMULES

La Figure 1 indique les principaux composants des installations étudiées. Le Tableau 1 et le Tableau 2 précisent les valeurs de paramètres utilisées dans les simulations pour la maison individuelle et le bâtiment administratif.

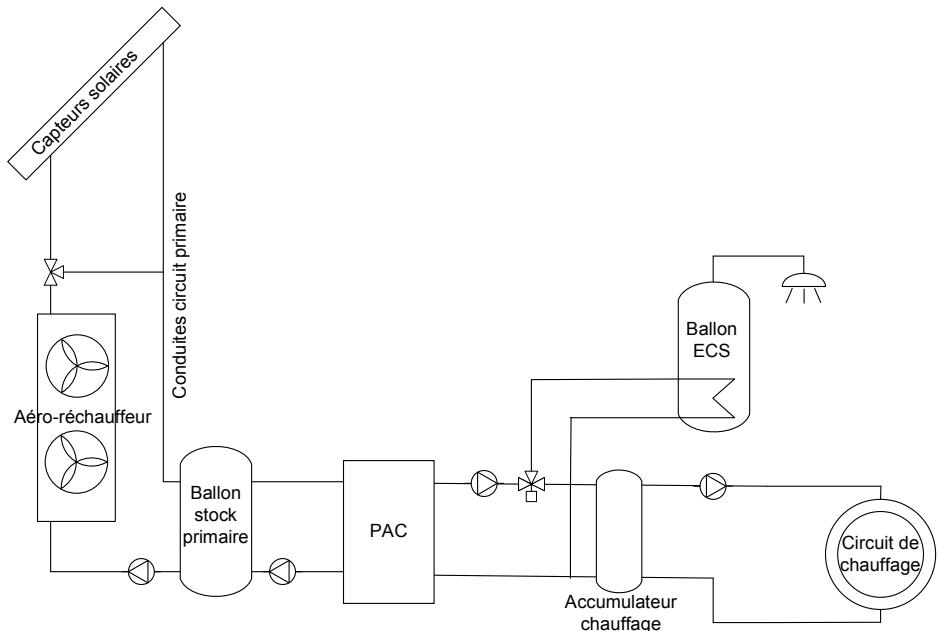


Figure 1 : Schéma de principe d'une installation simulée.

Variante de l'installation	Capteurs solaire	Conduites solaires	Stock circuit primaire	Ballon ECS	Accumulateur chauffage [13]	Circulateurs
S1air	10 et 20 m ²	-	-	300 [litre]	200 [litre]	50 [W]
S1		L = 2 x 15 [m]	-	300 [litre]		
S2		Ø = 25 [mm]	-	600 [litre]		
S2bis		U = 2,7 [W/m ² .K]	-	600 [litre]		
S3			500 [litre]	300 [litre]		

Tableau 1 : Paramètres utilisés dans les simulations pour la maison individuelle.

Variante de l'installation		Conduites solaires	Stock circuit primaire	Ballon ECS	Accumulateur chauffage [13]	Circulateurs
S1air	50 et 100 m ²	-	-	300 [litre]	2'000 [litre]	500 [W]
S1			-	300 [litre]		
S2		L = 2 x 40 [m]	-	1'200 [litre]		
S2bis		Ø = 52 [mm]	-	1'200 [litre]		
S3		U = 1,1 [W/m ² .K]	5'000 [litre]	300 [litre]		

Tableau 2 : Paramètres utilisés dans les simulations pour le bâtiment administratif.

Dans les variantes S2 et S2bis, le volume du ballon d'ECS est plus important que pour les autres variantes. En effet, il y a un stockage solaire directement dans cette cuve pour ces deux types d'installations.

3.2. CLIMATS DE REFERENCE

Trois types de climats représentatifs en Suisse ont été choisis :

- Berne
- Lugano
- Château-d'Oex

Les données météorologiques proviennent de *Météonorm*. Les fichiers météo utilisés dans *TRNSYS* ne contiennent que deux variables :

- La température ambiante extérieure.
- L'irradiation globale Sud reçue sur un plan incliné à 45 °.

Pour les simulations, des données horaires sont utilisées. Pour information, la Figure 2 et la Figure 3 ci-dessous présentent les valeurs des deux variables utilisées moyennées sur une période mensuelle.

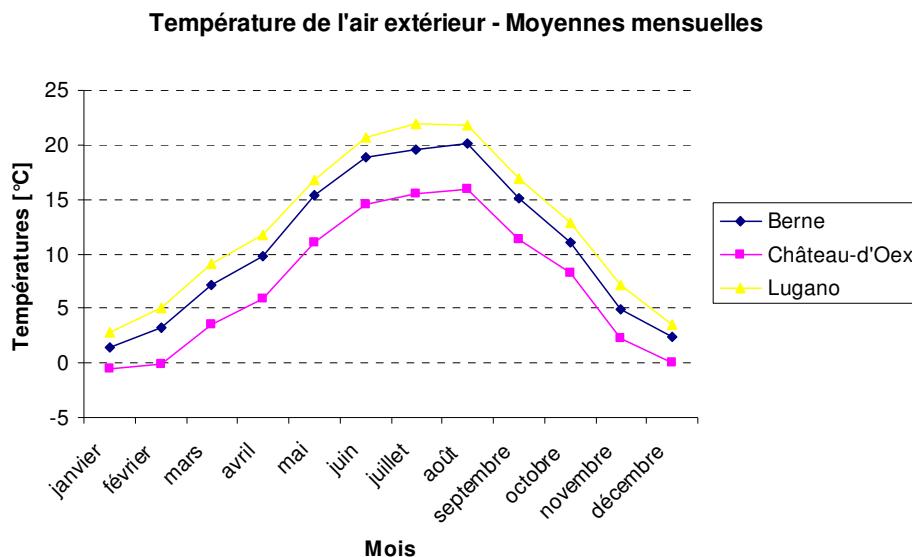


Figure 2 : Distribution annuelle des températures moyennes mensuelles de l'air extérieur

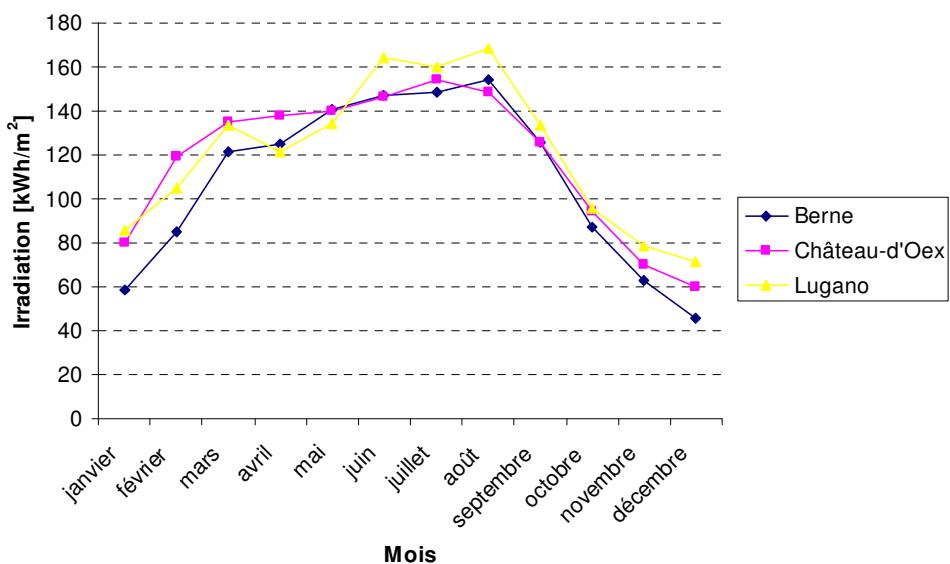


Figure 3 : Distribution annuelle de l'irradiation globale reçue sur un plan incliné à 45 °.

Ces trois météorologies permettent de simuler le comportement des installations pour les climats du plateau, de montagne et du Tessin.

3.3. BATIMENTS DE REFERENCE

Deux typologies de bâtiments ont été sélectionnées afin de tester les performances des installations techniques simulées avec des besoins de chaleur de différents ordres de grandeur. Les deux affectations retenues sont les suivantes :

- Habitat individuel
- Bâtiment administratif

Les deux bâtiments ne sont pas simulés directement dans *TRNSYS* afin de ne pas alourdir le temps de développement des simulations.

Un modèle de bâtiment à un nœud a donc été préféré au modèle de bâtiment de *TRNSYS* (type 56). Les différents apports et pertes thermiques pris en compte dans ce modèle à un nœud sont décrits dans l'équation ci-dessous :

$$\text{Bilan}_{\text{Horaire}} = Q_{ch} + Q_{sol} + Q_{int} + Q_{ren-air} + Q_{envelop} \quad (1)$$

Avec :

- Q_{ch} : apports du chauffage
- Q_{sol} : apports solaires par les fenêtres
- Q_{int} : gains internes
- $Q_{ren-air}$: pertes par renouvellement d'air
- $Q_{envelop}$: Pertes thermiques par l'enveloppe du bâtiment

L'enveloppe de chaque bâtiment est définie dans *LESOSA*® permettant de déterminer le facteur de pertes par transmission de l'enveloppe du bâtiment et le coefficient de transmission énergétique moyen des surfaces vitrées. Ces paramètres sont ensuite utilisés dans le modèle à un nœud pour évaluer les besoins horaires de chauffage du bâtiment. Les besoins de chaleur ainsi calculés sont lus dans l'environnement de simulation *TRNSYS*.

3.3.1. Maison individuelle

L'architecture de la maison individuelle est identique à celle utilisée durant les Tâche 26 et 32 de l'AIE programme Solar Heating and Cooling (SHC) [5] (Figure 4).

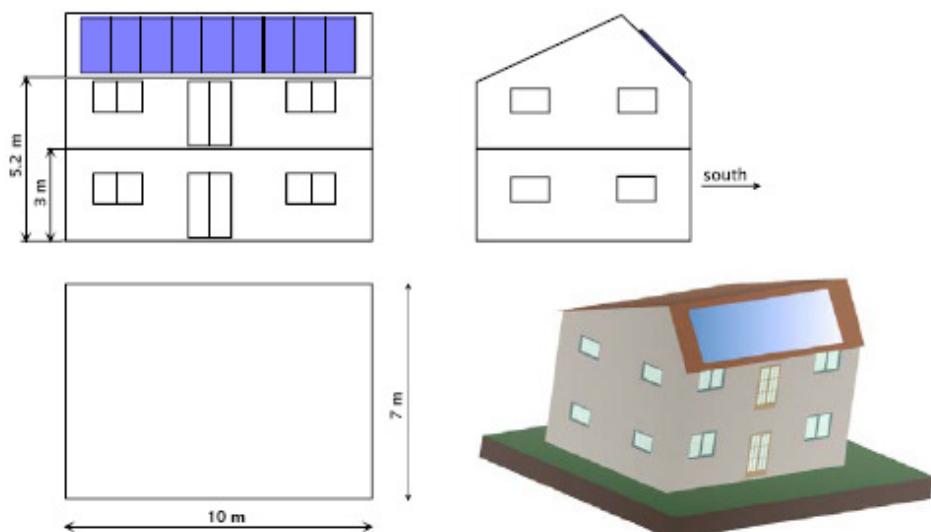


Figure 4 : Architecture de la maison individuelle.

La surface de plancher est de 70m². La surface vitrée du bâtiment par façade, représente 25% de la façade Sud, 10% de la façade est et ouest et 6% de la façade nord. Le Tableau 3 résume les principales caractéristiques de l'enveloppe de ce bâtiment.

Elément de l'enveloppe du bâtiment	Valeur U [W/m ² .K]
Mur extérieur	0.49
Plancher	0.56
Toit	0.38
Fenêtre avec cadre	2.70

Tableau 3 : Récapitulatif des coefficients U de la maison individuelle.

La SRE est de 140 m² avec une demande en chauffage de 14'300, 10'900 et 18'900 [kWh] pour respectivement Berne, Lugano et Château-d'Oex.

3.3.2. Bâtiment administratif

La Figure 5 illustre le type de bâtiment administratif choisi.



Figure 5 : Architecture du bâtiment administratif.

De manière générale, les murs sont construits en maçonnerie de moellons d'une épaisseur moyenne de 60 cm. La valeur U moyenne est de 1.3 [W/m²K]. La majorité des fenêtres sont des vitrages doubles isolant (valeur U = 1.4 W/m²K). Toutefois, il subsiste 11 fenêtres doubles mais non-isolantes. Leur valeur U est estimée à U = 3 [W/m²K]. Les gains internes sont estimés à 20 [W/m²] [7]. Le Tableau 4 résume les principales caractéristiques de l'enveloppe de ce bâtiment.

Elément de l'enveloppe du bâtiment	Valeur U [W/m ² .K]
Mur extérieur	1.3
Plancher	1.1
Toit	1.1
Fenêtre avec cadre	1.4 à 3

Tableau 4 : Récapitulatif des coefficients U du bâtiment administratif.

La SRE est de 911 m² avec une demande en chauffage de 119'600, 87'700 et 162'300 [kWh] pour respectivement Berne, Lugano et Château-d'Oex.

3.3.3. Profil de besoins en eau chaude sanitaire pour la maison individuelle

Les horaires de soutirage et la quantité d'eau soutirée au cours d'une journée sont représentés dans le graphique de la Figure 6 ci-dessous [8] :

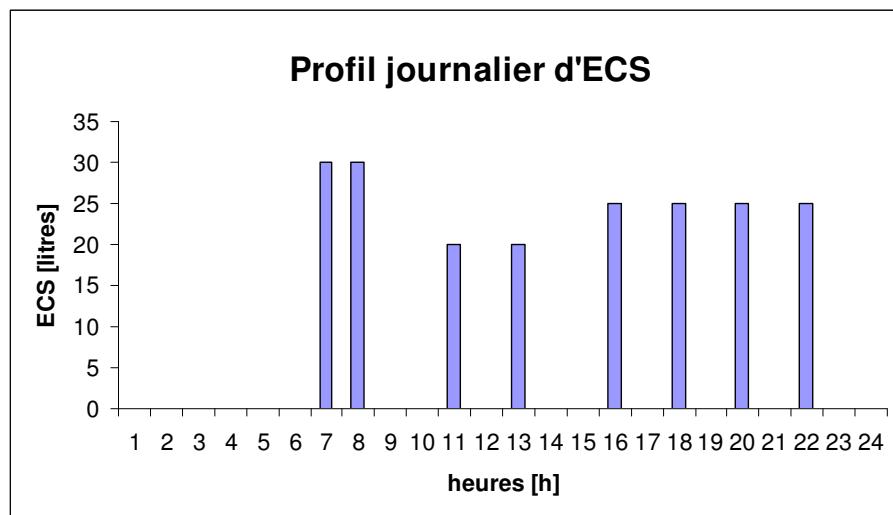


Figure 6 : Profil journalier du soutirage d'ECS pour la maison individuelle.

Le débit est égal à 600 litres par heure à chaque soutirage. La quantité journalière d'ECS est de 200 litres avec une température d'eau froide de 12 [°C] et une température mitigée de 50 [°C]. Ainsi, l'énergie quotidienne est de 8,8 [kWh].

3.3.4. Profil de besoins en eau chaude sanitaire pour le bâtiment administratif

La norme SIA 380/1 (L'énergie thermique dans le bâtiment) définit 25 MJ/m².an. Pour le bâtiment retenu, cela donne 355 litres par jour.

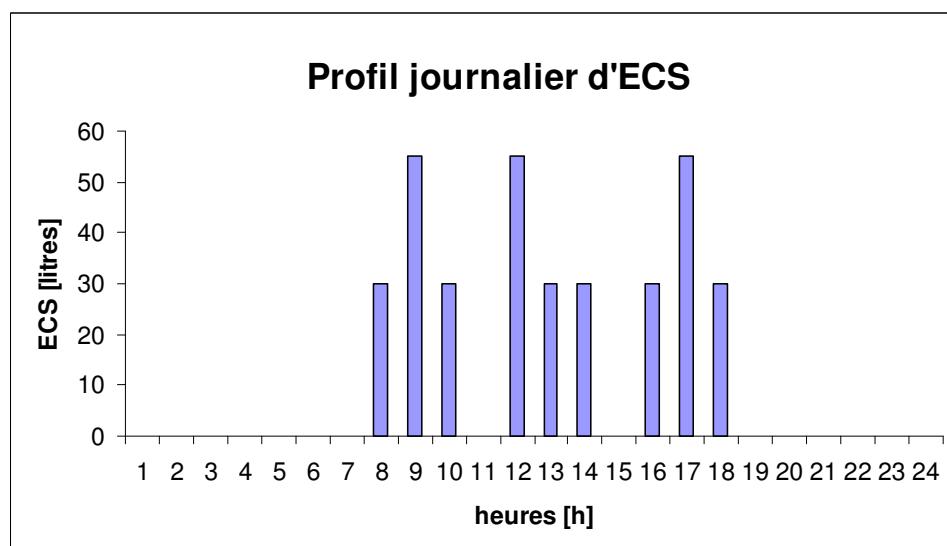


Figure 7 : Profil journalier du soutirage d'ECS pour le bâtiment administratif.

Le débit est égal à 600 litres par heure à chaque soutirage. Avec une température d'eau froide de 12 [°C] et une température mitigée de 50 [°C], l'énergie quotidienne est de 15,7 [kWh].

3.4. POMPE A CHALEUR

Pour cette étude, des pompes à chaleur existantes sur le marché dont les caractéristiques sont établies par le WPZ ont été sélectionnées. Pour la maison individuelle, 2 PAC de type *VULCANIA (Termodonna)* ont été choisies d'une puissance de 7 et 11 kW. La première est utilisée pour les climats de Berne et Lugano alors que la seconde est employée pour Château-d'Oex. Pour le bâtiment administratif nous avons choisi le modèle *SW66/B-2* de chez *KAPAG AG*. Pour Château-d'Oex, la demande en chauffage entraîne une surpuissance d'environ 1,35 fois plus élevée que pour Berne. Il n'a pas été possible de trouver facilement une PAC répondant à cette demande. Il a été décidé de garder les COP de la pompe à chaleur *KAPAG* et d'augmenter la puissance de ce même facteur 1,35.

Les performances des pompes à chaleur sont données par le *WPZ* avec des températures de fonctionnement variant de -5 à +5 [°C] pour le circuit primaire (évaporateur) et de 35 à 50 [°C] pour le circuit condenseur [9]. Dans la réalité, il y a une plage de température plus importante et pour couvrir ces valeurs, une extrapolation linéairement des COP a été effectuée pour les plages de températures de -20 à +30 [°C] et de +20 à +80 [°C] respectivement pour le circuit primaire et secondaire. Cette extrapolation linéaire est effectuée dans un premier temps pour les températures W35 et W50 de B-20 à B30. Ensuite, il y a de nouveau une extrapolation linéaire pour les températures B-20, B-10, B0, B15, B30 de W20 à W80. La Figure 8 représente les différentes courbes du COP pour la PAC *VULCANIA 07*. Elle illustre les différentes courbes du COP en fonction des températures de fonctionnement. Les parties en traits pleins représentent les mesures réalisées par le *WPZ* et les valeurs interpolées entre ces mesures. Les traits tissés représentent les valeurs extrapolées à partir de la courbe de tendance des valeurs mesurées.

Il est à noter que pour la température W80, le COP extrapolé devrait être inférieur à 1. Cette valeur n'étant pas réaliste, le COP a été fixé à 1. Toutefois, le but de ce projet est de comparer plusieurs systèmes avec un même type de PAC et non de comparer les pompes à chaleur entre elles.

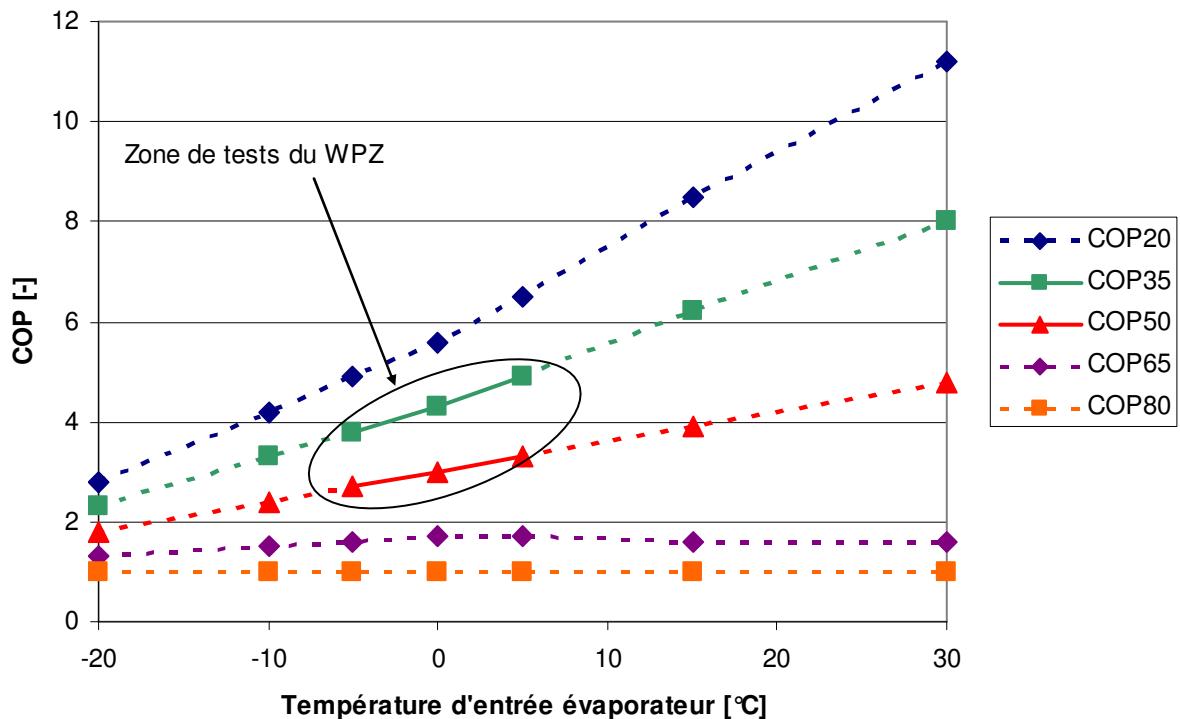


Figure 8 : Interpolation du COP pour différentes températures de fonctionnement pour la PAC *VULCANIA 07*.

Du

Tableau 5 au

Tableau 8 sont représentées les performances des différentes PAC choisies pour cette étude.

		P condenseur [kW]	P électrique [kW]	COP [-]
Tests WPZ	B0-W35	8,2	1,9	4,4
	B0-W50	7,2	2,7	2,8
Interpolation	B-20-W35	4,1	1,8	2,3
	B-20-W50	4,4	2,4	1,8
	B30-W35	15,1	1,9	8,0
	B30-W50	13,5	2,6	5,2

Tableau 5 : Performances de la PAC VULCANIA 07.

		P condenseur [kW]	P électrique [kW]	COP [-]
Tests WPZ	B0-W35	12	2,8	4,3
	B0-W50	11,3	3,8	3,0

Tableau 6 : Performances de la PAC VULCANIA 11.

		P condenseur [kW]	P électrique [kW]	COP [-]
Tests WPZ	B0-W35	71,0	18,9	3,8
	B0-W50	68,1	22,2	3,1

Tableau 7 : Performances de la PAC SW66/B-2.

		P condenseur [kW]	P électrique [kW]	COP [-]
Extrapolation	B0-W35	95,8	25,5	3,8
	B0-W50	91,9	30,0	3,1

Tableau 8 : Performances de la PAC SW66/B-2 augmentées d'un facteur 1,35.

3.5. AERO-RECHAUFFEUR

La modélisation de l'aéro-réchauffeur a été réalisée dans *TRNSYS* avec un échangeur de chaleur ayant comme paramètre un coefficient d'échange de chaleur en W/K [10]. Ce coefficient d'échange est fixé à 6000 W/K pour la maison individuelle ce qui permet d'avoir des ΔT faibles de 1 à 2 [K]. La consommation électrique du moteur du ventilateur est de 400 [W]. Puisque la demande en chauffage est presque 10 fois supérieure pour le bâtiment administratif, ces valeurs sont multipliées par un facteur 10 dans les simulations.

3.6. CAPTEURS SOLAIRES

Nous avons testé 4 types de capteurs différents :

- à air
- plan vitré
- non vitré
- à tubes sous vide

Le Tableau 9 résume les différentes caractéristiques de ces capteurs [11] et [12].

Type de capteur	Rendement et coefficients de pertes rapportés à la surface d'encombrement du capteur	Rendement et coefficients de pertes rapportés à la surface d'absorbeur du capteur
A air	$\eta_0 = 0,8$ $a_1 = 16,7$ $a_2 = 0$	
Plan vitré (n° SPF C303)	$\eta_0 = 0,76$ $a_1 = 3,31$ $a_2 = 0,0128$	$\eta_0 = 0,849$ $a_1 = 3,70$ $a_2 = 0,0143$
Plan non vitré (n° SPF C420)	$\eta_0 = 0,82$ $a_1 = 10,62$ $a_2 = 0,02$	$\eta_0 = 0,95$ $a_1 = 12,28$ $a_2 = 0,023$
Tubes sous vide (n° SPF C815)	$\eta_0 = 0,521$ $a_1 = 0,79$ $a_2 = 0,0059$	$\eta_0 = 0,585$ $a_1 = 0,89$ $a_2 = 0,0066$

Tableau 9 : Résumé des performances des capteurs solaires utilisés dans les simulations.

Dans les résultats des simulations, la surface des capteurs solaires indiquée est rapportée à la surface totale d'encombrement et non à celle d'absorbeur.

3.7. STRATEGIE DE CONTROLE DU SYSTEME

3.7.1. Courbe de chauffe

La température de départ chauffage suit une courbe de chauffe simplifiée (linéaire) telle qu'elle est présentée à la Figure 9. La température maximale de consigne est de 55°C pour une température de l'air extérieur inférieur à -10°C. Puis, elle décroît linéairement jusqu'à 22° pour une température de l'air extérieur à 20°C.

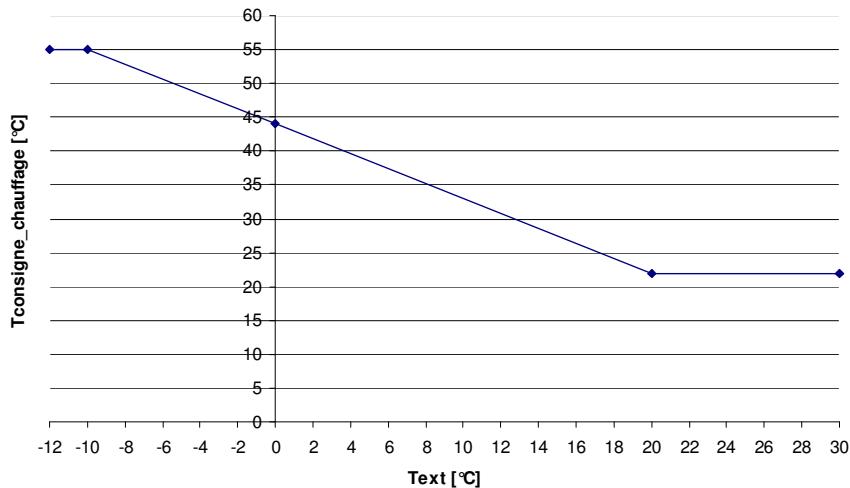


Figure 9 : Courbe de chauffage utilisée pour les 2 types de bâtiments.

3.7.2. Consigne ECS

La température de consigne du ballon de l'eau chaude sanitaire est fixée à 55 [°C] pour une température d'utilisation d'ECS de 50 [°C]. La demande en ECS est prioritaire sur la demande en chauffage.

3.7.3. PAC

L'enclenchement de la pompe à chaleur est ordonné lorsqu'il y a une demande en eau chaude sanitaire ou que la température dans l'accumulateur chauffage est trop basse par rapport à la courbe de chauffe.

3.7.4. Circuit primaire

Pour les variantes S1air, S1 et S2 bis, l'enclenchement du circuit primaire est lié directement à l'enclenchement de la PAC. Le nombre d'heures de fonctionnement de la pompe à chaleur et de l'aéro-réchauffeur est donc identique.

Pour la variante S2, l'aéro-réchauffeur s'enclenche dès que la PAC est en fonctionnement. En dehors de ces plages d'utilisation, le circuit solaire peut être enclenché selon la différence de températures entre le bas de cuve du ballon ECS et les capteurs solaires.

Pour la variante S3, l'enclenchement du circuit primaire est géré en fonction de la différence de température entre le stock primaire et la température extérieure ou celle des capteurs solaires. Comme il n'est pas directement lié au fonctionnement ou non de la PAC, le nombre d'heures de fonctionnement de la pompe à chaleur et de l'aéro-réchauffeur est différent. Pour ce dernier, le temps de fonctionnement est plus élevé que pour la PAC car durant la journée, il est possible de stocker de l'énergie en vue d'une utilisation ultérieure.

4. Hypothèses et définitions

4.1. CYCLE DE DEGIVRAGE

Dans cette étude, les cycles de dégivrage de l'aéro-réchauffeur n'ont pas été modélisés. Effectivement, il n'existe pas de modèle dans *TRNSYS* permettant de simuler le phénomène complexe du givrage qui dépend de la température et du taux d'humidité dans l'air. Cette hypothèse entraîne une augmentation du COP par rapport à la réalité car les cycles de dégivrage engendrent une consommation d'énergie supplémentaire. L'analyse des résultats doit tenir compte de cette hypothèse et c'est pour cela qu'une comptabilité du nombre d'heures de fonctionnement a été tenue pour lequel la température de l'air sortant de l'aéro-réchauffeur est inférieure à 0 [°C] ainsi que le nombre de degrés-heures en dessous de zéro.

4.2. DEFINITIONS DES COP

Il est possible de définir les différents coefficients annuels de performance suivants :

- $COP_{a,PAC}$ (coefficient de performance annuel PAC). Ce coefficient est calculé uniquement avec l'énergie fournie par le condenseur divisé par l'énergie électrique demandée par le compresseur.

$$COP_{a,PAC} = \frac{Q_{condenseur}}{W_{élect,compresseur}} \quad (2)$$

- $COP_{a,PAC+}$ (coefficient de performance annuel PAC+). Ce coefficient prend en compte en plus du $COP_{a,PAC}$, les pertes thermiques de l'accumulateur chauffage ainsi que la consommation électrique de l'aéro-réchauffeur et des différents circulateurs, hormis celui de la boucle de chauffage qui est de toute façon nécessaire dans une installation avec chaudière.

$$COP_{a,PAC+} = \frac{Q_{condenseur} - Q_{Pertes_accu_chauffage}}{W_{élect,compresseur} + W_{élect,aéro-réchauffeur} + W_{élect,circulateurs}} \quad (3)$$

- $COP_{a,Global}$ (coefficient de performance annuel global). Le calcul de ce coefficient est réalisé en divisant la demande en chaleur ($Q_{ECS} + Q_{chauffage}$) par la consommation totale d'électricité comme pour le $COP_{a,PAC+}$. Ceci permet de comparer les installations munies d'un chauffe-eau solaire dé-couplé de la pompe à chaleur (variantes S2 et S2bis).

$$COP_{a,Global} = \frac{Q_{ECS} + Q_{chauffage}}{W_{élect,compresseur} + W_{élect,aéro-réchauffeur} + W_{élect,circulateurs}} \quad (4)$$

$$Q_{Condenseur} = Q_{ECS} + Q_{chauffage} + Q_{Pertes_accu_chauffage} \quad (5)$$

Avec :

$Q_{condenseur}$	= énergie thermique fournie par la PAC pour le chauffage et l'ECS
$Q_{Pertes_accu_chauffage}$	= pertes thermiques de l'accumulateur de chauffage
$Q_{chauffage}$	= énergie thermique pour le chauffage
Q_{ECS}	= énergie thermique pour l'ECS (pertes Ballon ECS comprises)
$W_{élect,compresseur}$	= énergie électrique fournie au compresseur de la PAC
$W_{élect,aéro-réchauffeur}$	= énergie électrique fournie au moteur de l'aéro-réchauffeur
$W_{élect,circulateurs}$	= énergie électrique fournie aux circulateurs

Seul le $COP_{a,Global}$ est représentatif de la performance de l'installation. Il permet une comparaison entre les différents systèmes et il est directement lié à la consommation totale d'électricité. Toutefois, en analysant les autres COP entre eux, cela permet de comprendre où se situent les gains ou les pertes de ces différents systèmes.

4.3. DEFINITION D'UNE INSTALLATION DE REFERENCE AU MAZOUT

La norme SIA 380/1 donne 85 à 95% comme fraction utile pour une chaudière mazout ou gaz [14]. Nous prenons 95% pour les petites puissances puisqu'il est possible de choisir une chaudière mazout à condensation et 85% pour les puissances plus élevées demandées par le bâtiment administratif. Le Tableau 10 résume les consommations annuelles de mazout pour les différents bâtiments et climats.

	Berne	Lugano	Château-d'Oex
Maison Individuelle ($\eta=95\%$)	Chauff. 14'300 [kWh] ECS 3'250 [kWh] Conso. 1'816 [l]	Chauff. 10'900 [kWh] ECS 3'250 [kWh] Conso. 1'490 [l]	Chauff. 18'900 [kWh] ECS 3'250 [kWh] Conso. 2'332 [l]
Bâtiment Administratif ($\eta=85\%$)	Chauff. 119'600 [kWh] ECS 5'750 [kWh] Conso. 14'750 [l]	Chauff. 87'700 [kWh] ECS 5'750 [kWh] Conso. 10'995 [l]	Chauff. 162'300 [kWh] ECS 5'750 [kWh] Conso. 19'770 [l]

Tableau 10 : Consommation annuelle de mazout pour les différents sites et bâtiments.

5. Résultats

5.1. ANALYSE ENERGETIQUE

5.1.1. Comparaisons entre variantes

5.1.1.1. Villa

La Figure 10 présente les résultats du COPa pour la maison individuelle et le climat de Berne.

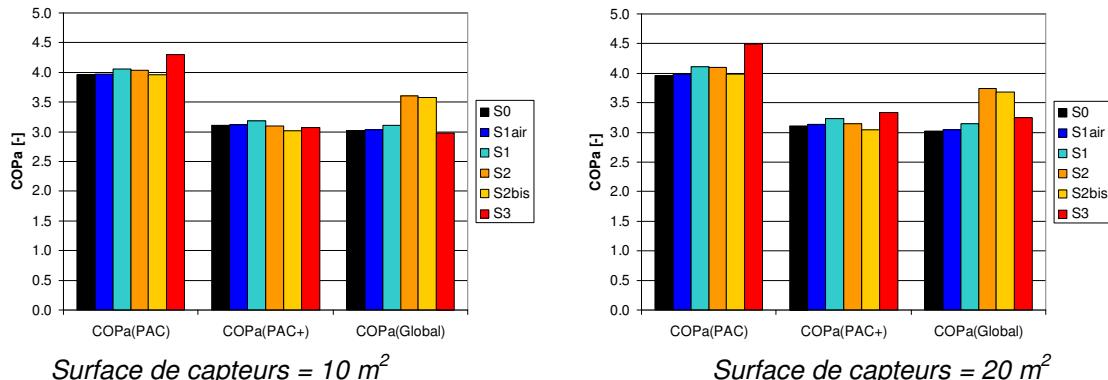


Figure 10 : COP pour le climat de Berne et la maison individuelle avec 10 et 20 m² de capteurs solaires plans vitrés.

Le gain constaté sur le COP_{a,PAC} est faible sauf pour la variante S3 qui possède un stock tampon sur le circuit primaire. Sans ce stock tampon, les capteurs solaires sont peu utilisés puisqu'en cas de beau temps, la demande en chauffage est faible. Par contre, le COP_{a,PAC+} de cette version S3 est au même niveau que les autres installations avec un léger avantage pour l'installation avec 20 m² de capteurs solaires. Ceci est dû à la consommation électrique plus élevée de l'aéro-réchauffeur dans cette variante S3. En effet, il a été vu au chapitre 0 que le temps de fonctionnement de cet aéro-réchauffeur est plus élevé que celui de la PAC. Le COP_{a,Global} montre que les installations avec le solaire direct pour l'eau chaude sanitaire assure un gain important.

Pour les autres climats, Lugano et Château-d'Oex, les résultats sont similaires comme le montrent la Figure 11 et la Figure 12.

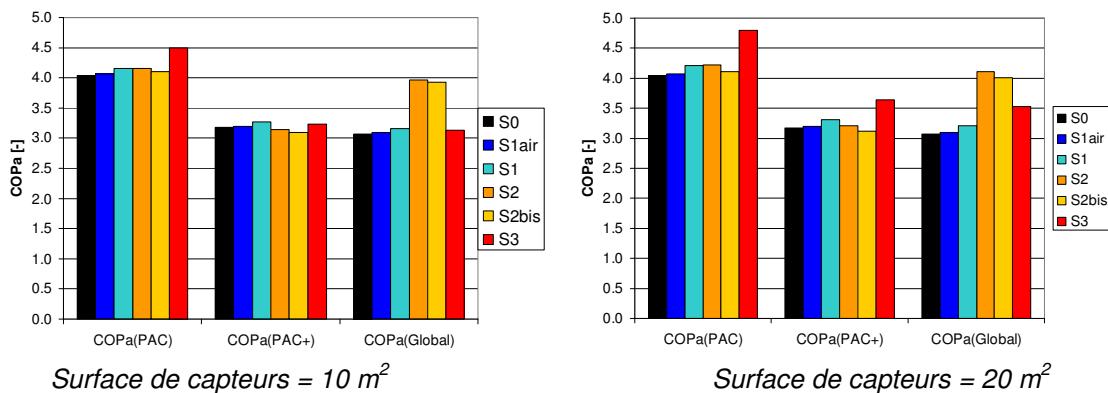


Figure 11 : COP pour le climat de Lugano et la maison individuelle avec 10 et 20 m² de capteurs solaires plans vitrés.

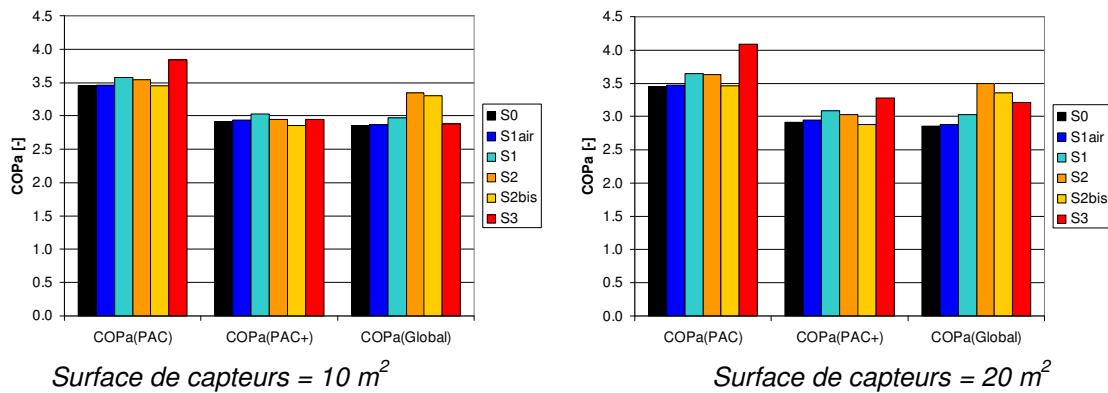


Figure 12 : COP pour le climat de Château-d'Oex et la maison individuelle avec 10 et 20 m² de capteurs solaires plans vitrés.

5.1.1.2. Bâtiment administratif

Pour le bâtiment administratif, les variantes avec le solaire direct pour l'ECS (S2 et S2bis) sont moins intéressantes, ceci est dû à la faible part de la demande d'énergie pour l'eau chaude sanitaire vis-à-vis de la demande en chauffage (Figure 13). Pour les autres installations, la remarque est identique à celle de la maison individuelle à savoir que le gain des capteurs dans la variante S3 est contrebalancé par la consommation électrique de l'aéro-réchauffeur.

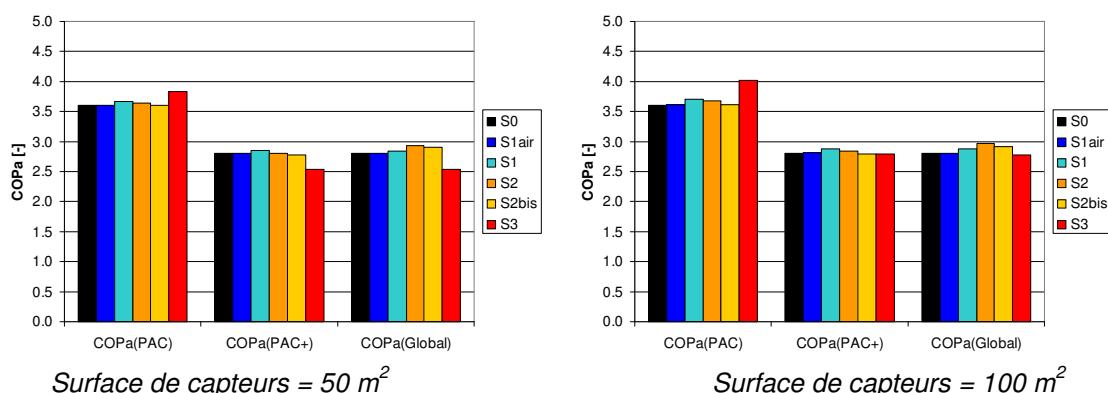


Figure 13 : COP pour le climat de Berne et le bâtiment administratif avec 50 et 100 m² de capteurs solaires plans vitrés.

5.1.2. Comparaisons entre types de capteurs

La comparaison a été réalisée avec les trois types de capteurs :

- plan vitré (V)
- plan non vitré (NV)
- à tube sous vide (TSV)

Cette analyse a été effectuée pour les installations S2 et S3, car le capteur à air (S1air) et la variante S1 ne semblent pas donner de gain intéressant par rapport à la variante S0.

La Figure 14 présente les COP pour Berne et la maison individuelle. Dans la légende, "10 m² V" signifie 10 m² de capteurs plans vitrés. NV et TSV sont les abréviations pour respectivement non vitré et tube sous vide.

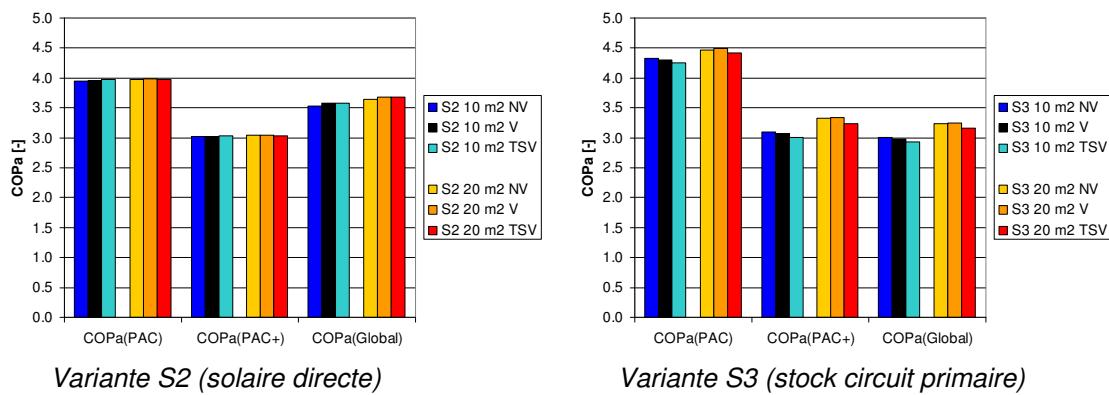


Figure 14 : COP pour le climat de Berne et la maison individuelle avec 10 et 20 m² de capteurs solaires.

Que ce soit pour les 3 climats et les deux types de bâtiments, les différences entre les types de capteurs sont similaires et du même ordre de grandeur. Le capteur à tube sous vide est moins performant que les capteurs plans vitrés ou non vitrés. En effet, comme le montre la Figure 15, les capteurs sont utilisés à basse température. La plage d'utilisation se fait principalement dans la partie gauche du graphique où le capteur tubes sous vide n'est pas plus performant, voire moins que les autres.

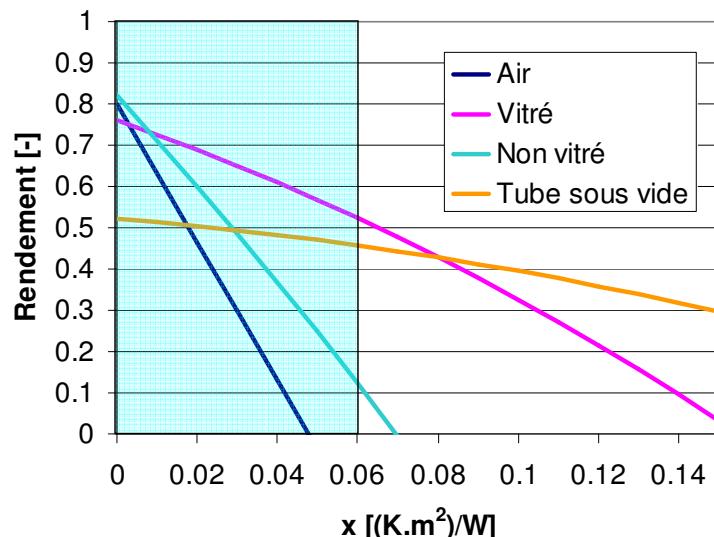


Figure 15 : Rendement des différents types de capteurs utilisés dans cette étude (rendement rapporté à la surface d'encombrement du champs de capteurs).

5.1.3. Variante S3 avec ou sans PCM (matériaux à changement de phase)

L'installation S3 a été également simulée avec des matériaux à changement de phase (PCM) dans le stock du circuit primaire. Cela permet de diminuer le volume de stockage pour une même quantité d'énergie emmagasinée ou d'augmenter l'énergie stockée pour un même volume. La paraffine utilisée possède un point de fusion aux alentours de 6 [°C].

Le modèle de cuve utilisé pour simuler ce type d'installation avec des PCM a été développé au sein de notre laboratoire dans le cadre de la Tâche 32 de l'AIE [15]. Durant cette Tâche, nous avons montré que l'utilisation des PCM peut être intéressante lorsque la variation de température du stock d'énergie est faible, environ 15 [K], et se situe autour du changement de phase [16]-[17].

Dans le cadre du projet SOL-PAC, les simulations annuelles ont confirmé ce comportement, et ont même montré un faible désavantage en utilisant ces PCM, car dans le cas d'un stock tampon sur le circuit primaire, la variation de température est plus importante que dans une installation solaire classique puisque la plage d'utilisation est de -15 à plus de 80 [°C].

5.1.4. Optimisation de la variante S3

Le principal facteur qui péjore les performances de la variante S3 est la consommation électrique de l'aéro-réchauffeur. Trois moyens sont possibles pour diminuer cette consommation :

- La stratégie de contrôle de l'enclenchement
- La puissance électrique du moteur
- Le volume de stockage de la boucle primaire et la surface de capteurs

5.1.4.1. Stratégie de contrôle

Afin de diminuer le temps d'enclenchement de l'aéro-réchauffeur et ainsi sa consommation, la régulation a été modifiée. La valeur du ΔT entre l'air extérieur et la température dans le stock primaire est augmentée. Il a été également tenu compte d'un ΔT entre les capteurs et le stock primaire. Ce dernier paramètre permet indirectement de savoir s'il y a suffisamment d'ensoleillement. La logique est la suivante :

Si	$T_{ext} - T_{haut_cuve}$	> 10 (au lieu de 5)	\rightarrow enclenchement de l'aéro-réchauffeur
Si	$T_{capteurs} - T_{haut_cuve}$	> 10	\rightarrow arrêt de l'aéro-réchauffeur

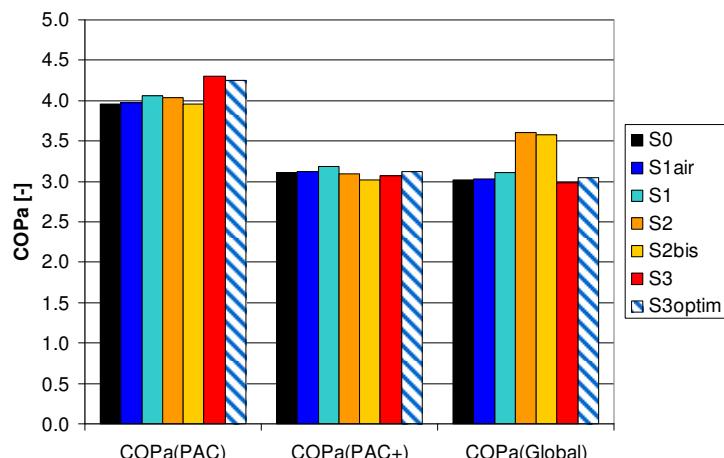


Figure 16 : COP pour le climat de Berne et la maison individuelle avec 10 m² de capteurs solaires plans vitrés.
En hachure la variante S3 optimisée.

Sur la Figure 16 il est possible de constater que le COP_{Global} de la variante S3 optimisée est légèrement plus élevé que pour S3 bien que sur le $COP_{a,PAC}$ soit un peu plus faible. Pour les autres variantes, la régulation est restée identique. Pour le bâtiment administratif, la même modification de performance a également été constatée.

5.1.4.2. Puissance électrique du moteur de l'aéro-réchauffeur

Pour la consommation des moteurs électriques, l'hypothèse d'une diminution de 25% a été prise en compte. Il est ainsi possible de visualiser l'importance de ce paramètre. La Figure 17 permet de constater que le gain ainsi obtenu ne permet pas de concurrencer la variante S2.

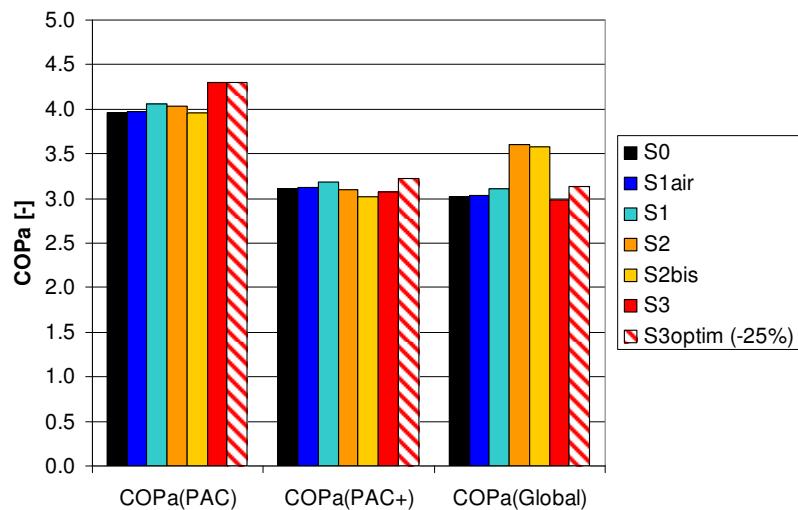


Figure 17 : COP pour le climat de Berne et la maison individuelle avec 10 m² de capteurs solaires plans vitrés.
En hachure la variante S3 avec une consommation de l'aéro-réchauffeur diminuée de 25%.

5.1.4.3. Volume de stock et surface de capteurs

Le volume de stockage du circuit primaire a varié de 500 à 2'000 litres et la surface de capteurs de 10 à 50 m². La Figure 18 représente les variations de COP_{global} . Pour la maison individuelle à Berne. Le Tableau 11 donne les valeurs utilisées pour faire varier la surface de capteurs et le volume du stock primaire (variante S3).

Variante	Surface de capteurs [m ²]	Volume stock circuit primaire [litre]
S2	10, 20, 30, 40 et 50	-
S3	10, 20, 30, 40 et 50	500, 1'000, 1'500 et 2'000

Tableau 11 : Valeurs des différents paramètres utilisés.

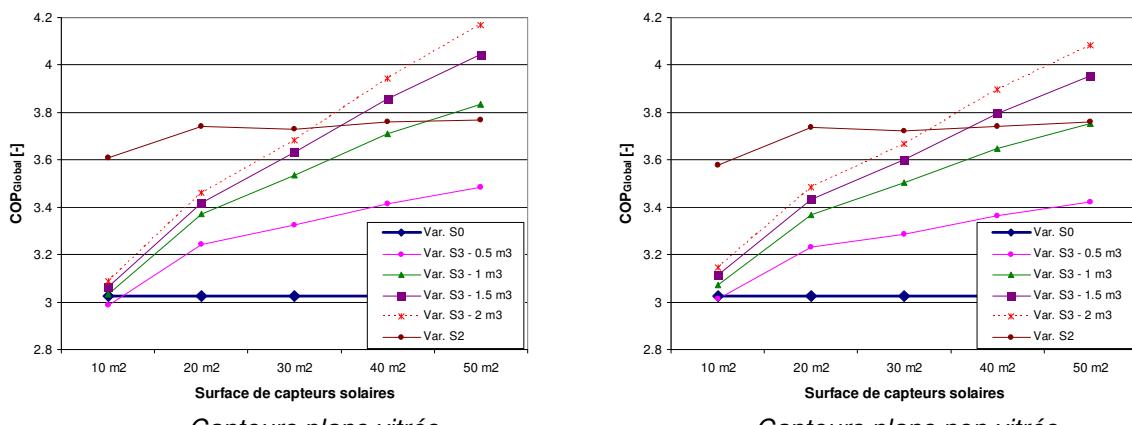


Figure 18 : COP pour le climat de Berne et la maison pour différents volumes de cuve de stockage du circuit primaire et de surfaces de capteurs.

Avec la variante S3, il faudrait avoir 30 m^2 de capteurs solaires avec un volume de stockage de $1,5 \text{ m}^3$ pour obtenir des performances identiques à la variante S2 et 10 m^2 de capteurs. La courbe de la variante S2 est relativement plate car l'apport solaire est en grande partie utilisé pour l'eau chaude sanitaire. Cette dernière est largement couverte par 10 m^2 de capteurs et l'augmentation au-delà de cette valeur de surface de capteurs n'apporte qu'un faible gain.

5.1.5. Mix entre les variantes S2 et S3

La variante S2+S3 permet en été de fonctionner directement au solaire et en hiver d'avoir un stock d'énergie sur le circuit primaire comme le montre la Figure 19. L'énergie solaire va directement dans le ballon ECS quand il n'y a pas de demande par la PAC.

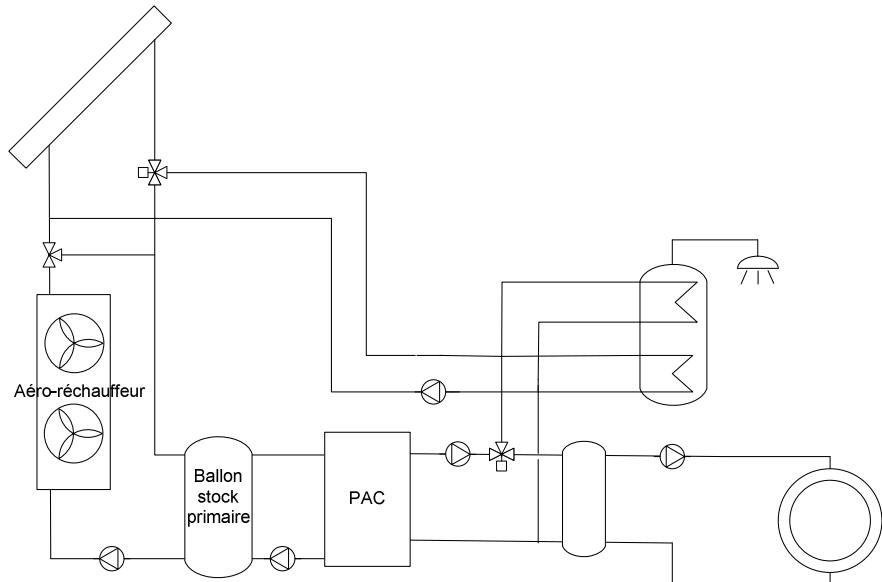
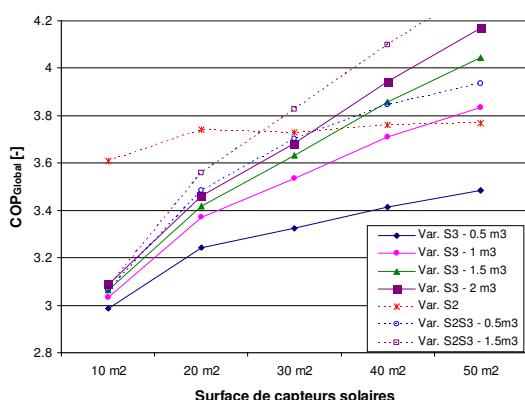
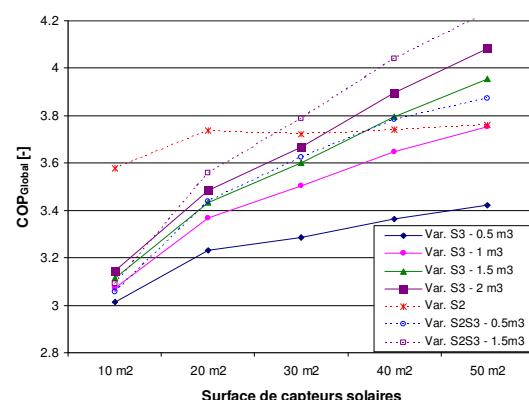


Figure 19 : Schéma de principe de la variante S2+S3.

Pour des surfaces de capteurs entre 10 et 20 m^2 , les simulations ont donné des performances comprises entre celles des variantes S2 et S3 avec un faible gain pour 10 m^2 . En effet, avec ces 10 m^2 il n'y a pas assez de réserve pour fournir de l'énergie au stock primaire et au ballon ECS. Lorsque la surface de capteurs augmente, il y a suffisamment d'énergie à fournir aux deux cuves. Cette variante est une amélioration par rapport à S3 puisque l'énergie solaire peut être directement utilisée. Pour des petites surfaces de capteurs (10 à 20 m^2), la surconsommation de l'aéro-réchauffeur pénalise S2+S3 par rapport à la variante S2. Pour les surfaces plus importantes, les capteurs diminuent le nombre d'heures de fonctionnement de l'aéro-réchauffeur permettant d'obtenir des COP_{Global} plus élevés que pour la variante S2.



Capteurs plans vitrés



Capteurs plans non vitrés

Figure 20 : Evolution du COP global en fonction de la surface de capteurs et des variantes (climat de Berne).

5.2. ANALYSE ECONOMIQUE

Dans cette partie, il n'a pas été pris en considération les variantes S1air et S1 car ces dernières ne semblent pas offrir de potentiel énergétique intéressant. Les variantes S0, S2, S3 et S2+S3 sont étudiées dans ce chapitre. Même si la variante S3 n'est pas la plus performante, il semble qu'elle offre un certain potentiel d'optimisation.

Capteur avec raccords et montage			
Plan vitré	AZUR6	937	CHF/m ²
Non vitré	Absorbeur ESSA	556	CHF/m ²
Groupe hydraulique			
Circulateur ST20/7	844	CHF	
Circulateur UPS 25-80	1'260	CHF	
Circulateur TOP-S 30/7	2'070	CHF	
Conduite (2x 15 m)			
DN 15	24	CHF/ml	
DN 20	39	CHF/ml	
Stock circuit primaire avec isolation ou accumulateur chauffage			
300 litres	1'126	CHF	
500 litres	1'347	CHF	
1000 litres	2'106	CHF	
1500 litres	2'686	CHF	
2000 litres	3'383	CHF	
5000 litres	9'400	CHF	
Antigel		4.10	CHF/l
Vase d'expansion			
60 litres	200	CHF	
80 litres	250	CHF	
100 litres	300	CHF	
150 litres	400	CHF	
200 litres	500	CHF	
250 litres	650	CHF	
300 litres	750	CHF	
500 litres	1'200	CHF	
700 litres	1'620	CHF	
900 litres	2'000	CHF	
Régulation		600	CHF
PAC avec accessoires			
VULCANIA 07	9'430	CHF	
VULCANIA 11	9'830	CHF	
KAPAG SW66/B-2	88'000	CHF	
Aéro-réchauffeur	Güntner		
GUH 067B/1-s(W)-F6/12P	2'800	CHF	
GFH 090.2D/3-N(D)-F6/3P	21'000	CHF	
Plus-value ballon ECS pour appoint solaire		2'000	CHF
Chaudière mazout	VITOLADENS 300C et W 12,9/19,3 kW	7'700	CHF
	VITOROND 100 -80 ou 100kW (monobloc)	14'000	CHF
Contrat de maintenance (mazout)		670	CHF/an
Mazout prix mai 2008		122	CHF/100litres
Electricité - Moyenne suisse (2008) (Département Fédéral de l'Economie)	Maison individuelle Bâtiment administratif	0.15 0.175	CHF/kWh

Tableau 12 : Coûts des différentes fournitures pour les installations étudiées.

Les coûts sont relatifs aux prix catalogue de différents fournisseurs [18] à [21]. Comme le but de cette étude est de comparer différentes installations pour la rénovation, nous ne tenons pas compte des plus-values dues à la fabrication du canal de cheminée, à la citerne à mazout et au volume supplémentaire nécessaire pour la citerne et le local chaufferie. De plus, nous ne prenons pas en compte les

coûts, de livraison, d'installation de la chaudière ou de la PAC, du ballon d'eau chaude sanitaire et du circuit de chauffage en lui-même (circulateur, vanne trois voies de régulation) puisque ces parties sont communes à toutes les installations PAC et chaudière. Les coûts liés à l'exploitation sont comptabilisés (consommations et entretien) ainsi que les coûts de montage qui sont inclus dans le prix des capteurs solaires. Il n'y aura pas l'analyse avec des capteurs à tube sous vide étant donné qu'ils sont plus chers et moins performants dans la plage de températures utilisée pour les installations étudiées. Le Tableau 12 donne les coûts pour les fournitures des différentes installations.

Le Tableau 13 permet de chiffrer les différents postes pour la maison individuelle à Berne. Hormis la PAC, le poste des capteurs solaires est le plus important et représente environ un tiers de l'investissement total pour 10 m² et deux tiers pour 50 m² (Tableau A4 en annexe).

	Référence	S0	S2	S3	S2+S3
Circuit primaire	Capteurs + raccords	-	-	9'370	9'370
	conduite	-	720	1'440	720
	stock tampon	-	-	-	1'350
	Eau glycolée	-	100	190	2'240
	Régulation	-	600	600	600
	groupe circulateur	-	840	1'690	840
	Vase d'expansion	-	300	300	300
	aéro-réchauffeur	-	2'800	2'800	2'800
	Plus-value ballon ECS	-	-	2'000	-
PAC	VULCANIA 07		9'430	9'430	9'430
Chaudière		7'700			
Circuit secondaire	Accumulateur	-	1'130	1'130	1'130
	Total	7'700	15'920	28'950	28'780
					32'350

Tableau 13 : Investissement pour la maison individuelle à Berne et 10 m² de capteurs plans vitrés.

Le Tableau 14 permet de comparer les coûts annuels. Nous avons choisi comme hypothèse une durée de vie de l'installation de 15 ans avec un taux d'intérêt fixe de 4,87% (UBS juillet 2008).

	Référence	S0	S2	S3	S2+S3
Consommation	[kWh]	18'160	5'796	4'859	5'874
	Coût du kWh [CHF]	0.122	0.15	0.15	0.15
	Coût consom.	2'216	869	729	881
Entretien	[CHF]	670	-	-	-
Amortissement	4.87%	735	1'520	2'765	2'748
	Total	3'621	2'390	3'494	3'630
					3'948

Tableau 14 : Coût annuel pour différentes installations pour la maison individuelle à Berne et 10 m² de capteurs plans vitrés.

Il est à noter que le prix du mazout a une forte influence sur le coût annuel puisqu'il représente environ les 2/3 du coût annuel global alors que pour la pompe à chaleur sans capteurs solaires (variante S0), le coût lié à la consommation électrique totale est équivalent à un tiers. Pour un même pourcentage d'augmentation du mazout et de l'électricité, les résultats n'en seront que meilleurs pour les PAC.

La Figure 21 présente l'évolution du coût annuel selon les variantes utilisées et la surface de capteurs. Les capteurs plans vitrés sont en trait plein alors que les non vitrés sont en pointillés. D'un point de vue coût, la variante S0 est celle qui est la plus avantageuse. La Figure 22 est identique à la Figure 21 mais la cuve de stockage du circuit primaire est de 1500 litres au lieu des 500 litres pour les variantes S3 et S2+S3. Toutefois, les cycles de dégivrage n'ont pas pu être simulés. Dans ces figures, le coût annuel est calculé en additionnant les annuités liées à l'investissement de départ, l'entretien et la consommation d'énergie.

$$\text{Coût annuel} = \text{annuité} + \text{entretien} + \text{consommation d'énergie}$$

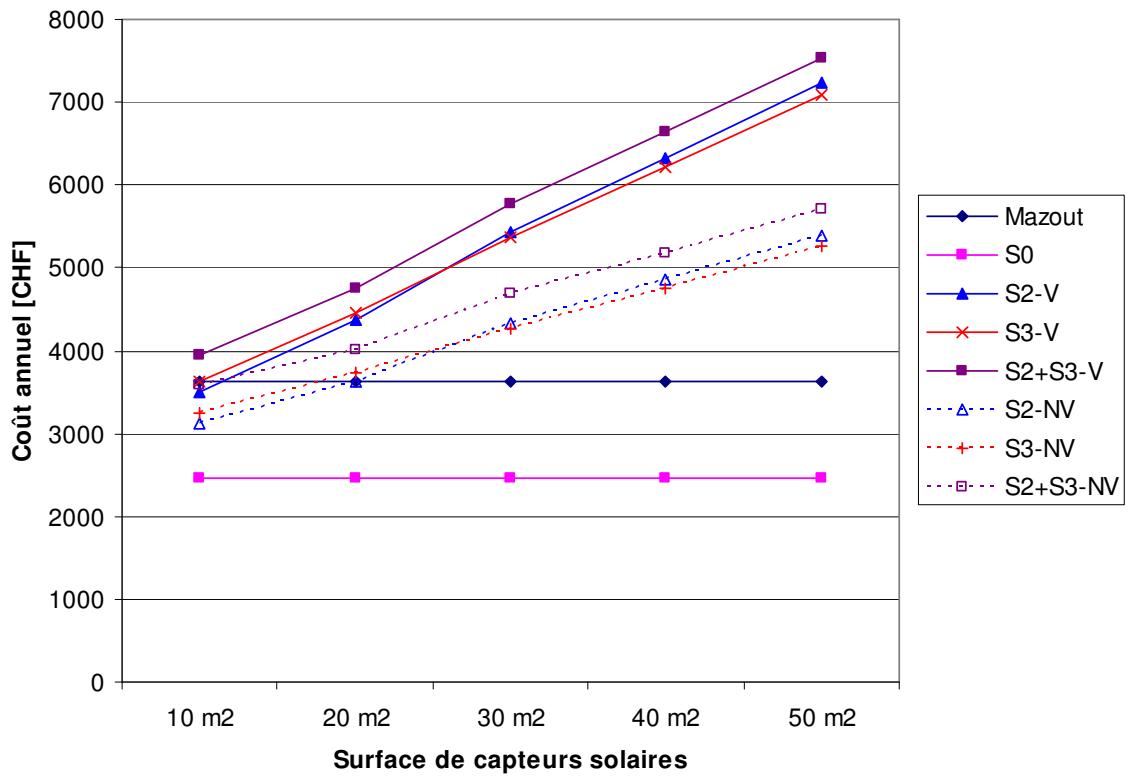


Figure 21 : Evolution du coût annuel en fonction des surfaces de capteurs solaires et des variantes pour la maison individuelle, climat de Berne. V=plan vitré ; NV=plan non vitré.

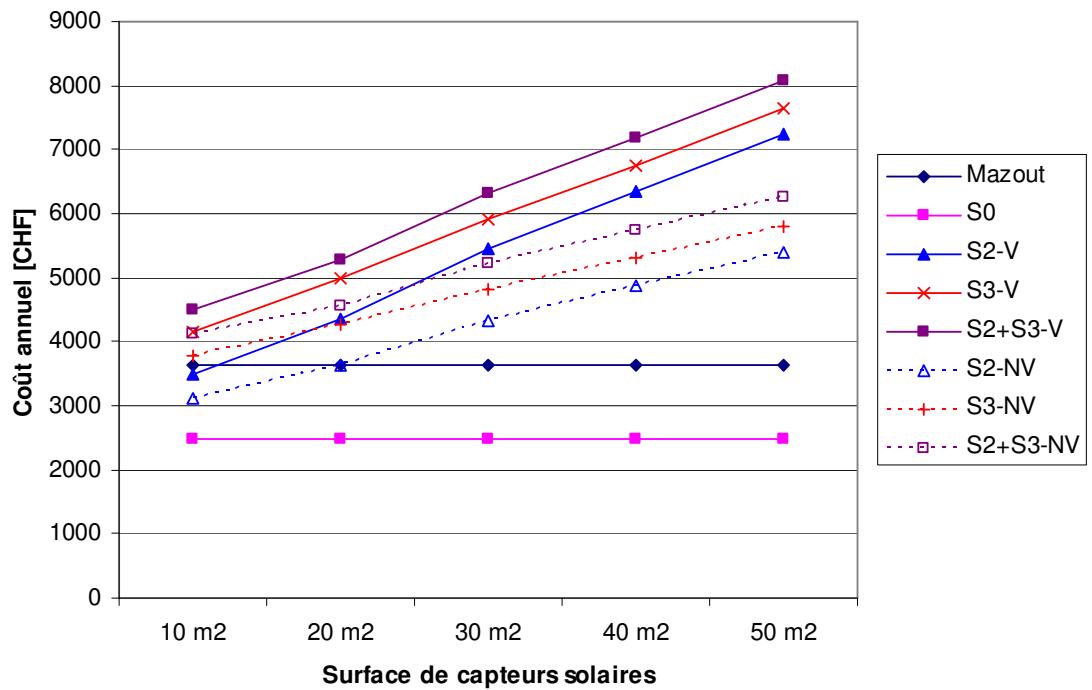


Figure 22 : Evolution du coût annuel en fonction des surfaces de capteurs solaires et des variantes pour la maison individuelle, climat de Berne avec une Cuve de stockage primaire de 1500 litres. V=plan vitré ; NV=plan non vitré.

La Figure 23 montre les résultats pour le bâtiment administratif.

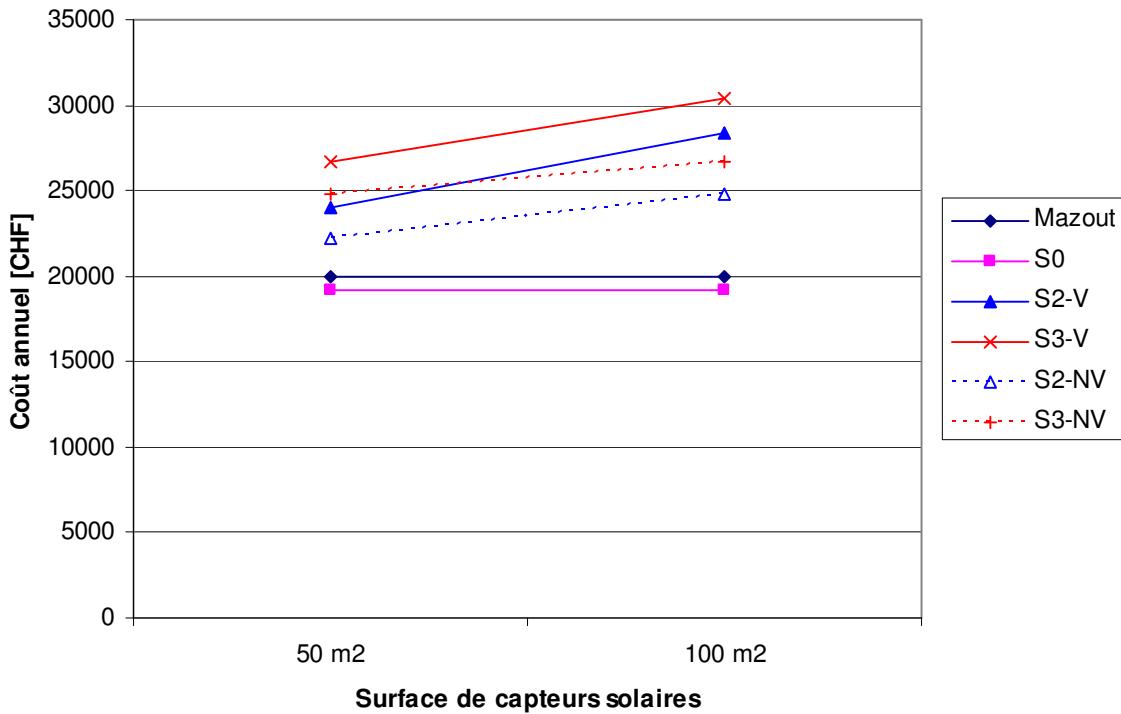


Figure 23 : Evolution du coût annuel en fonction des surfaces de capteurs solaires et des variantes pour le bâtiment administratif, climat de Berne. V=plan vitré ; NV=plan non vitré.

Il est à constater que certaines variantes, même avec des petites surfaces de capteurs solaires sont plus avantageuses que celle utilisant une chaudière à mazout (référence).

Dans un premier temps, des subventions n'ont pas été prises en compte, qu'elles soient liées aux capteurs solaires ou à la PAC (Genève). En effet, les subventions étant différentes d'un canton à l'autre, il est difficile d'établir une comparaison pour chaque cas. Dans un deuxième temps, il a été réalisé trois graphiques pour les cantons de Berne, Genève et Vaud (Figure 24 à Figure 26) incluant les subventions cantonales. Le Tableau 15 résume ces subventions en fonction des cantons choisis.

	PAC air/eau	Solaire thermique
Berne	-	150 CHF/m ²
Genève	5'000 CHF	1'500 CHF
Vaud	-	300 CHF/m ²

Tableau 15 : Subventions cantonales pour Berne, Genève et Vaud.

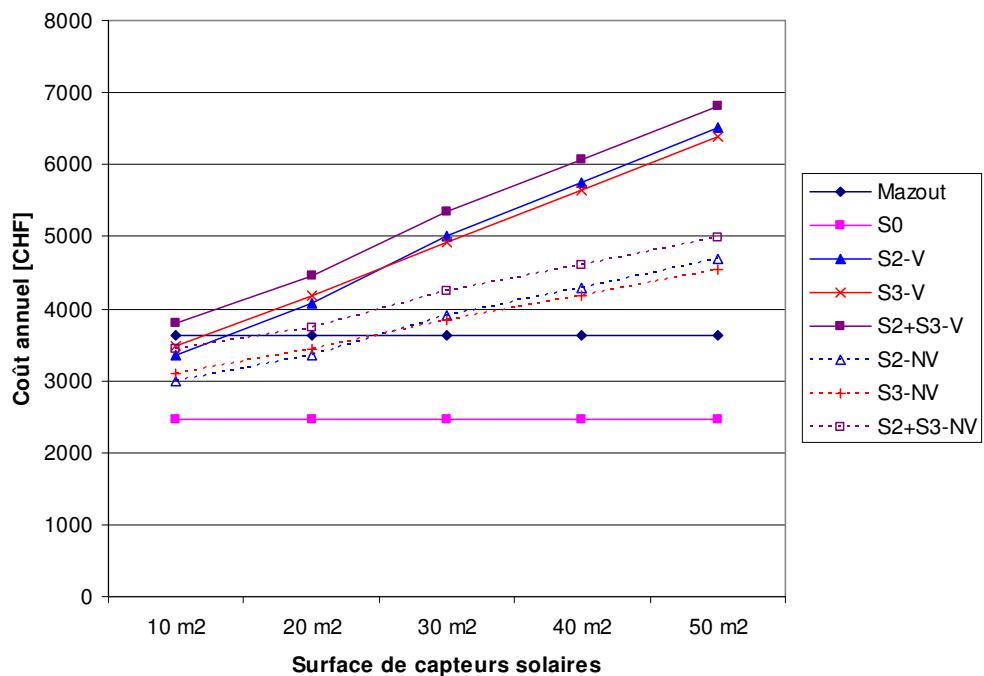


Figure 24 : Evolution du coût annuel en fonction des surfaces de capteurs solaires et des variantes pour la maison individuelle, climat de Berne. V=plan vitré ; NV=plan non vitré (subventions selon le canton de Berne).

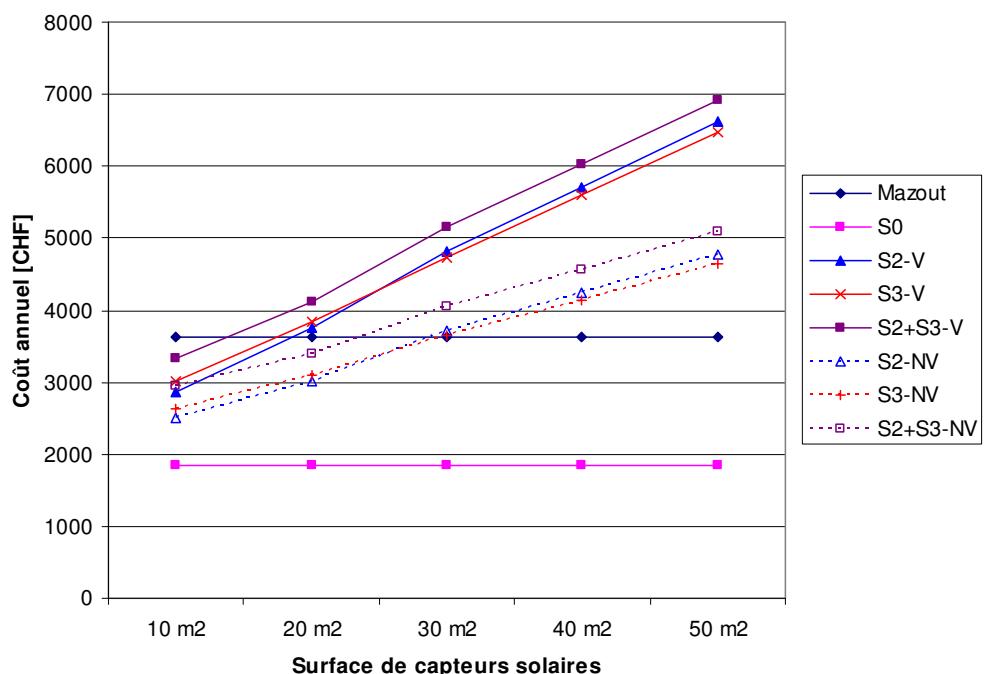


Figure 25 : Evolution du coût annuel en fonction des surfaces de capteurs solaires et des variantes pour la maison individuelle, climat de Berne. V=plan vitré ; NV=plan non vitré (subventions selon le canton de Genève).

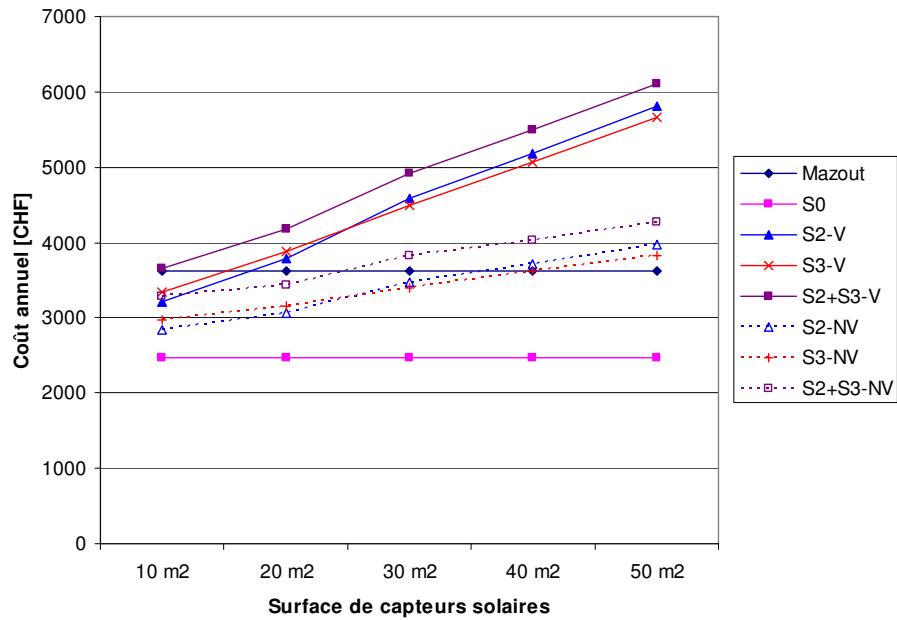


Figure 26 : Evolution du coût annuel en fonction des surfaces de capteurs solaires et des variantes pour la maison individuelle, climat de Berne. V=plan vitré ; NV=plan non vitré (subventions selon le canton de Vaud).

La constatation est que les subventions ne changent pas l'allure générale des graphiques, mais elles permettent d'augmenter l'intérêt à installer des pompes à chaleur avec des capteurs solaires par rapport à une chaudière à mazout. Pour Genève et Vaud toutes les variantes avec 10 m² de capteurs solaires sont plus intéressantes que la référence au mazout.

On remarque qu'avec le prix du mazout actuel (mai 2008), il est avantageux d'installer une pompe à chaleur sans capteurs solaires thermiques (S0), quelque soit le climat.

Avec une installation solaire de 10 m², le surcoût de la partie solaire thermique est au minimum d'environ 15% (en fonction des subventions) par rapport à la PAC (S0). Cette différence augmente avec la surface vitrée (Cf. Figure 24 à Figure 26).

6. Synthèse des résultats

6.1. ENERGIE

Comme constaté dans le chapitre 0, les capteurs plans vitrés sont légèrement plus performants que les plans non vitrés. D'un autre côté, le prix plus bas de ces derniers entraîne logiquement un coût annuel plus intéressant que pour les capteurs plans vitrés et a fortiori que pour les tubes sous vide.

Les variantes S1air et S1 n'offrent pas d'amélioration significative par rapport à la variante S0. En effet, il n'y a pas de stockage solaire. Les capteurs sont ainsi mal utilisés.

La variante S3 est la plus performante thermiquement si la frontière du système est uniquement la PAC. Malheureusement, la consommation électrique de l'aéro-réchauffeur entraîne une diminution du COP_{Global}. En effet, la charge du stock du circuit primaire entraîne une augmentation du temps d'enclenchement de cet aéro-réchauffeur. Cette variante semble donc moins intéressante que S2. Même s'il est possible d'optimiser S3, il semble difficile de le faire de manière à obtenir les performances de la variante S2.

Enfin, la variante S2+S3 est plus intéressante énergétiquement que S2 et S3 pour des grandes surfaces de capteurs solaires (Figure 20). D'un point de vue de la rentabilité financière, cette variante est la moins bonne puisqu'elle nécessite un investissement supplémentaire par rapport aux deux autres variantes S2 et S3 (double conduites solaire/aéro-réchauffeur additionné d'un stockage circuit primaire).

6.2. COUTS

Il est intéressant d'analyser le prix du kWh utile pour comparer financièrement les variantes étudiées. Le kWh "utile" est défini par la demande en chauffage additionnée à celle pour l'ECS. Du Tableau 16 au Tableau 20, on indique le prix du kWh utile, pour la variante S0 (PAC sans solaire) et la variante S2 (la plus intéressante des variantes avec solaire thermique pour des surfaces < 20 m²), pour les différents climats.

	Demande Chauffage [kWh]	ECS [kWh]	Coût annuel [CHF]	Prix du kWh "utile" [CHF]
Berne - Maison individuelle	14'300	3'250	2'390	0.136
Berne - Bâtiment administratif	119'600	5'750	19'200	0.153
Lugano - Maison individuelle	10'900	3'250	2'200	0.155
Lugano - Bâtiment administratif	87'700	5'750	17'000	0.182
Château-d'Oex - Maison individuelle	18'900	3'250	2'680	0.121
Château-d'Oex - Bâtiment administratif	162'300	5'750	22'200	0.132

Tableau 16 : Coût du kWh "utile" pour la variante S0.

	Demande Chauffage [kWh]	ECS [kWh]	Coût annuel [CHF]	Prix du kWh "utile" [CHF]
Berne - Maison individuelle	14'300	3'250	3'130	0.178
Lugano - Maison individuelle	10'900	3'250	2'940	0.208
Château-d'Oex - Maison individuelle	18'900	3'250	3'400	0.153

Tableau 17 : Coût du kWh "utile" pour la variante S2 avec 10m² de capteurs plans non vitrés.

	Demande Chauffage [kWh]	ECS [kWh]	Coût annuel [CHF]	Prix du kWh "utile" [CHF]
Berne - Maison individuelle	14'300	3'250	3'630	0.207
Lugano - Maison individuelle	10'900	3'250	3'445	0.243
Château-d'Oex - Maison individuelle	18'900	3'250	3'880	0.175

Tableau 18 : Coût du kWh "utile" pour la variante S2 avec 20m² de capteurs plans non vitrés.

	Demande Chauffage [kWh]	ECS [kWh]	Coût annuel [CHF]	Prix du kWh "utile" [CHF]
Berne - Bâtiment administratif	119'600	5'750	24'000	0.191
Lugano - Bâtiment administratif	87'700	5'750	21'800	0.233
Château-d'Oex - Bâtiment administratif	162'300	5'750	26'900	0.160

Tableau 19 : Coût du kWh "utile" pour la variante S2 avec 50m² de capteurs plans non vitrés.

	Demande Chauffage [kWh]	ECS [kWh]	Coût annuel [CHF]	Prix du kWh "utile" [CHF]
Berne - Bâtiment administratif	119'600	5'750	28'400	0.227
Lugano - Bâtiment administratif	87'700	5'750	26'200	0.280
Château-d'Oex - Bâtiment administratif	162'300	5'750	31'200	0.186

Tableau 20 : Coût du kWh "utile" pour la variante S2 avec 100m² de capteurs plans non vitrés.

En analysant ces tableaux, la variante S2 entraîne une augmentation du coût annuel du kWh "utile" (sans les subventions) par rapport à la variante S0 et selon les trois climats choisis de :

- 25 à 35% pour 10 m² de capteurs plans non vitrés avec la maison individuelle.
- 50 à 70% pour 20 m² de capteurs plans non vitrés avec la maison individuelle.
- 20 à 30% pour 50 m² de capteurs plans non vitrés avec le bâtiment administratif.
- 40 à 55% pour 100 m² de capteurs plans non vitrés avec le bâtiment administratif.

Il faut noter que les prix ci-dessus peuvent diminuer lorsqu'il y a un soutien cantonal lors de l'installation d'une PAC, comme c'est le cas à Genève où il y a une subvention de 5'000 CHF pour les PAC air/eau. Par exemple, dans le cas de la variante S0 pour la maison individuelle, le coût de kWh "utile" serait de 0,113 [CHF] au lieu de 0,136 [CHF], soit 20% de diminution. Dans le cas de la solution S2 avec 20m² de capteurs non vitrés, le coût serait également réduit de 20% car à Genève, la subvention pour le solaire thermique n'est que de 1'500 [CHF] quelque soit la surface de capteurs.

6.3. DEGIVRAGE

Afin d'estimer le potentiel de diminution du phénomène de dégivrage lié aux capteurs solaires, un raisonnement inverse a été mené. Les performances des différentes variantes ont été analysées sans tenir compte des cycles de givrage/dégivrage. Ce phénomène va engendrer un coût supplémentaire de l'énergie, par le biais de l'électricité consommée par la PAC lors des cycles (soit entre 5% et 15% de la consommation totale). Or le couplage de la PAC avec l'installation solaire thermique va réduire cette consommation d'électricité car elle va réduire le nombre d'heures de givrage, tout en augmentant le coût de l'installation globale. Dans le meilleur des cas, le solaire thermique serait à même de garder hors givre l'aéro-réchauffeur en tout temps. Dans ce cas, le coût annuel de la PAC couplée au solaire ne va pas changer. Par contre, dans le cas de la PAC sans solaire thermique, le coût annuel va augmenter à cause de l'énergie électrique nécessaire aux cycles de dégivrage. Pour que la PAC reste rentable, il faut que le surcoût engendré par électricité reste inférieur à la différence de coût entre la PAC (S0) et la PAC couplée au solaire (S2) avec 20 m² de capteurs plans non vitrés.

Pour le climat de Berne et la maison individuelle, le Tableau 21 présente les surconsommations électricques nécessaires pour être financièrement rentable.

Variante	Coût annuel [CHF]	Déférence du coût annuel avec la variante S0 [CHF]	Surconsommation électrique équivalent pour le dégivrage [kWh]
S0	2'390	-	-
S2 20 [m²]	3'630	1'240	8'270

Tableau 21 : Energie pour le dégivrage avant rentabilité financière.

Avec le coût actuel de l'électricité (15cts/kWh), il faudrait que le dégivrage entraîne une surconsommation électrique de 8'200 kWh pour que cette variante S2 soit concurrentielle par rapport à la variante S0, ce qui représenterait 140% de la consommation de la PAC !

En tenant compte des subventions du solaire thermique, la différence des coûts annuels diminue entre la PAC et la PAC solaire. Par exemple, avec les subventions du canton de Vaud, ces 8'200 kWh se réduisent à 4'500 kWh. Cette surconsommation représente presque la consommation annuelle PAC sans solaire. Il faudrait une très forte augmentation du coût du kWh électrique pour que la PAC solaire puisse devenir rentable.

Or selon les sources du GSP, la surconsommation d'électricité pour les cycles de dégivrage représente environ 10% de la consommation totale de la PAC, soit dans notre cas environ 500 kWh par année.

La Figure 27 représente pour la variante S2 avec 20 m² de capteurs non vitrés et pour le climat du plateau Suisse, la surconsommation minimale des cycles de dégivrage pour que la PAC solaire soit rentable avec les subventions du canton de Vaud (pour autant que le solaire puisse éviter le givrage en tout temps).

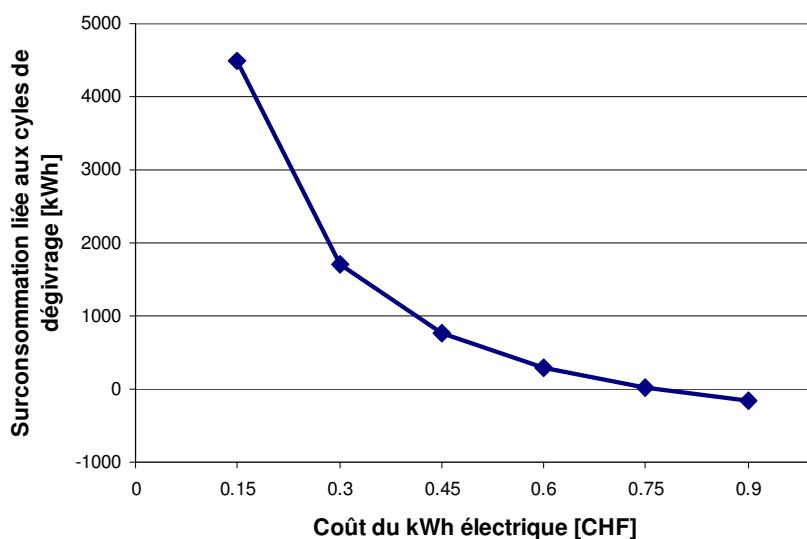


Figure 27 : Surconsommation minimale due aux cycles de dégivrages pour être financièrement viable en fonction du coût du kWh électrique. Valable pour le Canton de Vaud, variante S2 avec 20m² de capteurs solaires plan non vitrés, maison individuelle.

On constate que pour 500 kWh, il faudrait un prix de l'électricité supérieur à 50 cts/kWh. La situation est encore plus défavorable pour les autres systèmes étudiés.

Pour pouvoir quantifier avec plus de précision l'effet sur le bilan énergétique et économique du couplage d'une installation thermique solaire avec une PAC, il serait utile de pouvoir améliorer la modélisation des cycles de givrage / dégivrage d'une PAC.

7. Conclusions

Dans cette étude, les performances d'une pompe chaleur standard ont été comparées à une PAC couplée avec différents types d'installations solaires thermiques.

Il ressort de cette étude que le couplage d'une installation solaire thermique de type S2 améliore les performances globales par rapport à une PAC traditionnelle (S0) de 15% pour le climat de Château-d'Oex à 36% pour le climat de Lugano ($COP_{a(\text{Global})}$ de Figure 10 à Figure 12). Les impacts environnementaux (émissions de gaz à effet de serre, énergie primaire cumulée, etc.) devraient être diminués d'une même quantité.

Toutefois, ces résultats doivent être relativisés, si on tient compte du coût de l'investissement de l'installation solaire. En effet, la PAC sans solaire thermique (S0) est la plus rentable financièrement puisque le coût du kWh utile est le plus bas. Par exemple, avec une PAC (S0) pour une maison individuelle à Berne, le kWh utile est inférieur de 7 cts/kWh par rapport à la variante S2 avec 10 m² de capteurs solaires thermiques non vitrés.

Il faut rappeler que dans cette étude, l'effet des cycles givrage/dégivrage n'a pas été inclus au niveau de la simulation car il n'existe pas de modèle à disposition. Il est donc délicat de comparer précisément les résultats des variantes entre eux étant donné que ces simulations n'ont pas pris en compte l'énergie électrique consommée lors des cycles de dégivrage. Dans le meilleur des cas, la PAC solaire deviendrait rentable si le prix de l'électricité était supérieur à environ 50 cts/kWh.

Dans la meilleure des configurations étudiées, le surcoût annuel d'une PAC solaire reviendrait au maximum pour une maison individuelle sur le Plateau Suisse à environ 1'250 CHF, soit 3.40 CHF par jour, environ le prix d'un café.

Pour terminer, il faut rappeler que ces résultats ne sont que le fruit de simulations et d'aucune mesure expérimentale.

Répertoire des symboles et abréviations

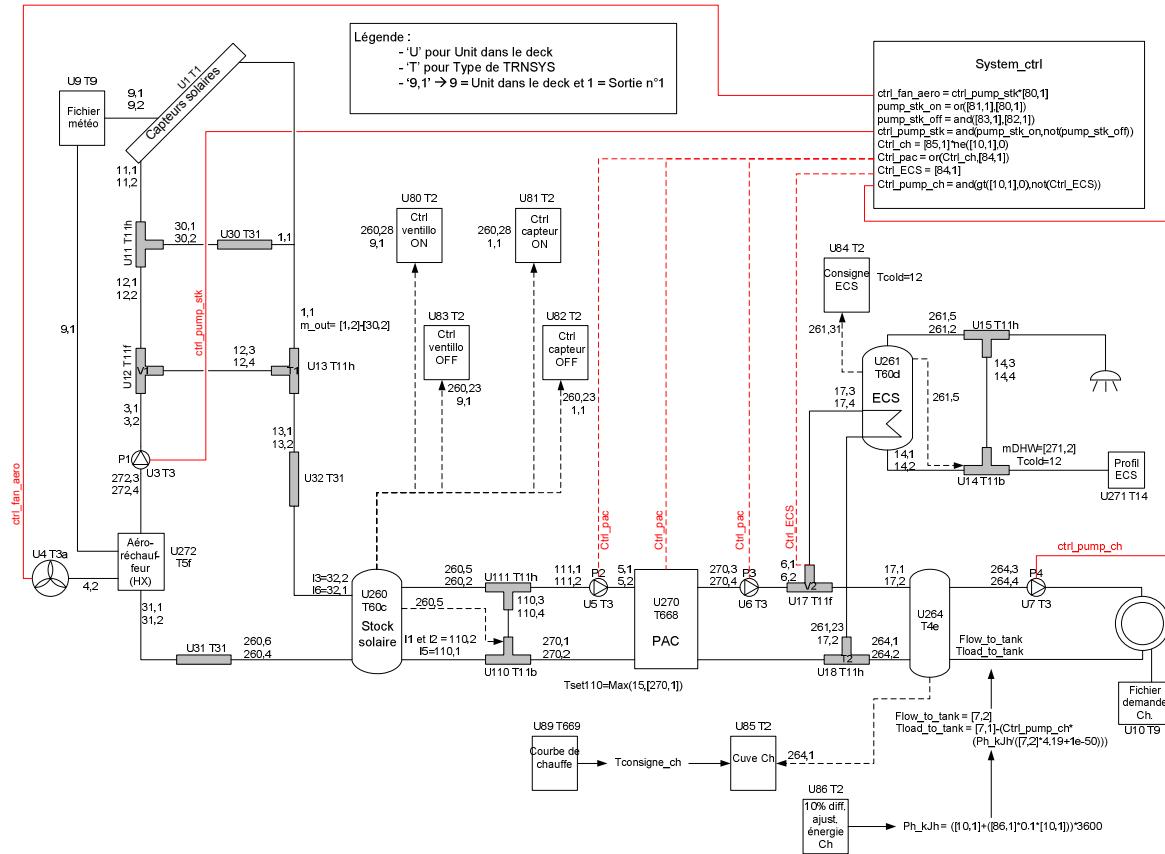
- AIE SHC : Agence Internationale de l'Energie programme Solar Heating and Cooling.
- Capteur NV : capteur non-vitré
- Capteur TSV : capteur à tubes sous vide
- Capteur V : capteur vitré
- COP : coefficient de performance
- COPa : coefficient de performance annuel
- ECS : Eau Chaude Sanitaire
- PAC : pompe à chaleur
- PCM : matériaux à changement de phase
- SGV : sonde géothermique verticale
- SRE : surface de référence énergétique
- WPZ : Wärmepumpen-Testzentrum

Références

- [1] Ozer Kara, Koray Ulgen, Arif Hepbasli : ***Exergetic assessment of direct-expansion solar-assisted heat pump systems: Review and modelling***, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12 (2008), p. 1383-1401.
- [2] Huang, B. J., J. P. Lee et al. : ***Heat pipe enhanced solar assisted heat pump water***, Solar energy, 78 (2005), p. 375-381.
- [3] Anderson, T. N and G. L. Morrison : ***Effect of load pattern on solar-boosted heat pump water heater performance***, Solar Energy, 81(2007), p. 1386-1395.
- [4] V. Trillat-Berdal, B. Souyri, G. Achard : ***Coupling of geothermal heat pumps with thermal solar collectors***, Applied Thermal Engineering, 27 (2007), p. 1750-1755.
- [5] Richard Heimrath Michel Haller : ***The Reference Heating System, the Template Solar System***, report of IEA SHC task 32, (2007).
- [6] Raoul Payot : ***Projet de rénovation de la Maison des Associations***, travail de diplôme HEIG-VD (2007).
- [7] Christophe Brunner, Niklaus Herzog : ***Conditionnement des locaux : études de cas***, Programme RAVEL.
- [8] U. Frei, P. Vogelsanger, D Homberger : ***Domestic hot water systems: testing, development, trends***, Eurusun (2000).
- [9] Bulletin du WPZ, édition 02-2007.
- [10] TRNSYS, manuel de référence, University of Wisconsin.
- [11] <http://www.solarenergy.ch/>
- [12] Søren Østergaard Jensen, Miroslav Bosanac : ***Connectable solar air collectors***, Solar Energy Centre Denmark, Danish Technological Institute, (février 2002).
- [13] Pompe à chaleur, Planification, construction et exploitation des installations de pompes à chaleur électriques, RAVEL (cahier3).
- [14] L'énergie thermique dans le bâtiment, norme SIA 380/1.
- [15] W. Streicher et al. : ***Simulation models of PCM storage units***, Report C5 of Subtask C from IEA SHC Task32, (2007).
- [16] Stéphane Citherlet, Jacques Bony, System Simulation Report C6.1 of Subtask C from IEA SHC Task32, (2007).
- [17] Jacques Bony, Stéphane Citherlet, Rapport Power-PCM, OFEN, (2008).
- [18] Catalogue AGENA, Moudon (2007).
- [19] Catalogue Güntner, Allemagne (2007).
- [20] Offre Viessmann, Chavornay (2008).
- [21] Offre Kapag, Zumikon (2008).

Annexes

ANNEXE A1 : SCHEMA DE PRINCIPE DU DECK DE SIMULATION POUR LA VARIANTE S3



ANNEXE A2 : TABLEAUX DES COUTS ANNUELS POUR DIFFERENTES VARIANTES

Investissement

	Référence	S0	S2	S3	S2+S3
Circuit primaire	Capteurs + raccords	-	-	18'670	18'670
	conduite	-	720	1'440	720
	stock tampon	-	-	-	1'350
	Eau glycolée	-	100	300	2'350
	Régulation	-	600	600	600
	groupe circulateur	-	840	1'690	840
	Vase d'expansion	-	300	300	300
	aéro-réchauffeur	-	2'800	2'800	2'800
	Plus-value ballon ECS	-	-	2'000	-
PAC	VULCANIA 07	-	9'430	9'430	9'430
Chaudière		7'700	-	-	-
Circuit secondaire	Accumulateur	-	1'130	1'130	1'130
Total		7'700	15'920	38'360	38'190
					41'760

Coûts annuels d'exploitation

	Référence	S0	S2	S3	S2+S3
Consommation	[kWh]	18'160	5'796	4'689	5'407
	Coût du kWh [CHF]	0.122	0.15	0.15	0.15
	Coût consom.	2'216	869	703	811
Entretien	[CHF]	670	-	-	-
Amortissement	4.87%	735	1'520	3'663	3'647
Total		3'621	2'390	4'367	4'458
					4'743

Tableau A1 : Maison familiale, climat de Berne pour 20 m² de capteurs solaires plans vitrés

Investissement

	Référence	S0	S2	S3	S2+S3
Circuit primaire	Capteurs + raccords	-	-	27'970	27'970
	conduite	-	1'170	2'340	1'170
	stock tampon	-	-	-	1'350
	Eau glycolée	-	100	400	2'450
	Régulation	-	600	600	600
	groupe circulateur	-	1'260	2'520	1'260
	Vase d'expansion	-	400	400	400
	aéro-réchauffeur	-	2'800	2'800	2'800
	Plus-value ballon ECS	-	-	2'000	-
PAC	VULCANIA 07	-	9'430	9'430	9'430
Chaudière		7'700	-	-	-
Circuit secondaire	Accumulateur	-	1'130	1'130	1'130
Total		7'700	16'890	49'590	48'560
					52'990

Coûts annuels d'exploitation

	Référence	S0	S2	S3	S2+S3
Consommation	[kWh]	18'160	5'796	4'704	4'830
	Coût du kWh [CHF]	0.122	0.15	0.15	0.15
	Coût consom.	2'216	869	706	725
Entretien	[CHF]	670	-	-	-
Amortissement	4.87%	735	1'613	4'736	4'637
Total		3'621	2'482	5'441	5'362
					5'771

Tableau A2 : Maison familiale, climat de Berne pour 30 m² de capteurs solaires plans vitrés

Investissement

	Référence	S0	S2	S3	S2+S3
Circuit primaire	Capteurs + raccords	-	-	37'270	37'270
	conduite	-	1'170	2'340	1'170
	stock tampon	-	-	-	1'350
	Eau glycolée	-	100	510	2'560
	Régulation	-	600	600	600
	groupe circulateur	-	1'260	2'520	1'260
	Vase d'expansion	-	400	400	400
	aéro-réchauffeur	-	2'800	2'800	2'800
	Plus-value ballon ECS	-	-	2'000	-
	PAC	VULCANIA 07	-	9'430	9'430
Chaudière		7'700	-	-	-
Circuit secondaire	Accumulateur	-	1'130	1'130	1'130
	Total	7'700	16'890	59'000	57'970
					62'400

Coûts annuels d'exploitation

	Référence	S0	S2	S3	S2+S3
Consommation	[kWh]	18'160	5'796	4'662	4'549
	Coût du kWh [CHF]	0.122	0.15	0.15	0.15
	Coût consom.	2'216	869	699	682
Entretien	[CHF]	670	-	-	-
Amortissement	4.87%	735	1'613	5'634	5'536
	Total	3'621	2'482	6'334	6'218
					6'643

Tableau A3 : Maison familiale, climat de Berne pour 40 m² de capteurs solaires plans vitrés

Investissement

	Référence	S0	S2	S3	S2+S3
Circuit primaire	Capteurs + raccords	-	-	46'570	46'570
	conduite	-	1'170	2'340	1'170
	stock tampon	-	-	-	1'350
	Eau glycolée	-	100	620	2'670
	Régulation	-	600	600	600
	groupe circulateur	-	1'260	2'520	1'260
	Vase d'expansion	-	500	500	500
	aéro-réchauffeur	-	2'800	2'800	2'800
	Plus-value ballon ECS	-	-	2'000	-
	PAC	VULCANIA 07	-	9'430	9'430
Chaudière		7'700	-	-	-
Circuit secondaire	Accumulateur	-	1'130	1'130	1'130
	Total	7'700	16'990	68'510	67'480
					71'910

Coûts annuels d'exploitation

	Référence	S0	S2	S3	S2+S3
Consommation	[kWh]	18'160	5'796	4'652	4'335
	Coût du kWh [CHF]	0.122	0.15	0.15	0.15
	Coût consom.	2'216	869	698	650
Entretien	[CHF]	670	-	-	-
Amortissement	4.87%	735	1'623	6'543	6'444
	Total	3'621	2'492	7'240	7'094
					7'536

Tableau A4 : Maison familiale, climat de Berne pour 50 m² de capteurs solaires plans vitrés

Investissement

	Référence	S0	S2	S3	S2+S3
Circuit primaire	Capteurs + raccords	-	-	5'560	5'560
	conduite	-	720	1'440	720
	stock tampon	-	-	-	1'350
	Eau glycolée	-	100	190	2'240
	Régulation	-	600	600	600
	groupe circulateur	-	840	1'690	840
	Vase d'expansion	-	200	200	200
	aéro-réchauffeur	-	2'800	2'800	2'800
	Plus-value ballon ECS	-	-	2'000	-
	PAC	VULCANIA 07	-	9'430	9'430
Chaudière		7'700	-	-	-
Circuit secondaire	Accumulateur	-	1'130	1'130	1'130
	Total	7'700	15'820	25'040	24'870
					28'440

Coûts annuels d'exploitation

	Référence	S0	S2	S3	S2+S3
Consommation	[kWh]	18'160	5'796	4'902	5'821
	Coût du kWh [CHF]	0.122	0.15	0.15	0.15
	Coût consom.	2'216	869	735	873
Entretien	[CHF]	670	-	-	-
Amortissement	4.87%	735	1'511	2'391	2'375
	Total	3'621	2'380	3'127	3'248
					3'577

Tableau A5 : Maison familiale, climat de Berne pour 10 m² de capteurs solaires plans non vitrés

Investissement

	Référence	S0	S2	S3	S2+S3
Circuit primaire	Capteurs + raccords	-	-	11'050	11'050
	conduite	-	720	1'440	720
	stock tampon	-	-	-	1'350
	Eau glycolée	-	100	300	2'350
	Régulation	-	600	600	600
	groupe circulateur	-	840	1'690	840
	Vase d'expansion	-	200	200	200
	aéro-réchauffeur	-	2'800	2'800	2'800
	Plus-value ballon ECS	-	-	2'000	-
	PAC	VULCANIA 07	-	9'430	9'430
Chaudière		7'700	-	-	-
Circuit secondaire	Accumulateur	-	1'130	1'130	1'130
	Total	7'700	15'820	30'640	30'470
					34'040

Coûts annuels d'exploitation

	Référence	S0	S2	S3	S2+S3
Consommation	[kWh]	18'160	5'796	4'695	5'429
	Coût du kWh [CHF]	0.122	0.15	0.15	0.15
	Coût consom.	2'216	869	704	814
Entretien	[CHF]	670	-	-	-
Amortissement	4.87%	735	1'511	2'926	2'910
	Total	3'621	2'380	3'630	3'724
					4'016

Tableau A6 : Maison familiale, climat de Berne pour 20 m² de capteurs solaires plans non vitrés

Investissement

	Référence	S0	S2	S3	S2+S3
Circuit primaire	Capteurs + raccords	-	-	16'540	16'540
	conduite	-	1'170	2'340	1'170
	stock tampon	-	-	-	1'350
	Eau glycolée	-	100	400	2'450
	Régulation	-	600	600	600
	groupe circulateur	-	1'260	2'520	1'260
	Vase d'expansion	-	250	250	250
	aéro-réchauffeur	-	2'800	2'800	2'800
	Plus-value ballon ECS	-	-	2'000	-
	PAC	VULCANIA 07	-	9'430	9'430
Chaudière		7'700	-	-	-
Circuit secondaire	Accumulateur	-	1'130	1'130	1'130
	Total	7'700	16'740	38'010	36'980
					41'410

Coûts annuels d'exploitation

	Référence	S0	S2	S3	S2+S3
Consommation	[kWh]	18'160	5'796	4'715	4'871
	Coût du kWh [CHF]	0.122	0.15	0.15	0.15
	Coût consom.	2'216	869	707	731
Entretien	[CHF]	670	-	-	-
Amortissement	4.87%	735	1'599	3'630	3'532
	Total	3'621	2'468	4'337	4'262
					4'680

Tableau A7 : Maison familiale, climat de Berne pour 30 m² de capteurs solaires plans non vitrés

Investissement

	Référence	S0	S2	S3	S2+S3
Circuit primaire	Capteurs + raccords	-	-	22'030	22'030
	conduite	-	1'170	2'340	1'170
	stock tampon	-	-	-	1'350
	Eau glycolée	-	100	510	2'560
	Régulation	-	600	600	600
	groupe circulateur	-	1'260	2'520	1'260
	Vase d'expansion	-	250	250	250
	aéro-réchauffeur	-	2'800	2'800	2'800
	Plus-value ballon ECS	-	-	2'000	-
	PAC	VULCANIA 07	-	9'430	9'430
Chaudière		7'700	-	-	-
Circuit secondaire	Accumulateur	-	1'130	1'130	1'130
	Total	7'700	16'740	43'610	42'580
					47'010

Coûts annuels d'exploitation

	Référence	S0	S2	S3	S2+S3
Consommation	[kWh]	18'160	5'796	4'686	4'619
	Coût du kWh [CHF]	0.122	0.15	0.15	0.15
	Coût consom.	2'216	869	703	693
Entretien	[CHF]	670	-	-	-
Amortissement	4.87%	735	1'599	4'165	4'066
	Total	3'621	2'468	4'868	4'759
					5'184

Tableau A8 : Maison familiale, climat de Berne pour 40 m² de capteurs solaires plans non vitrés

Investissement

	Référence	S0	S2	S3	S2+S3
Circuit primaire	Capteurs + raccords	-	-	27'520	27'520
	conduite	-	1'170	2'340	1'170
	stock tampon	-	-	-	1'350
	Eau glycolée	-	100	620	2'670
	Régulation	-	600	600	600
	groupe circulateur	-	1'260	2'520	1'260
	Vase d'expansion	-	250	250	250
	aéro-réchauffeur	-	2'800	2'800	2'800
	Plus-value ballon ECS	-	-	2'000	-
PAC	VULCANIA 07	-	9'430	9'430	9'430
Chaudière		7'700	-	-	-
Circuit secondaire	Accumulateur	-	1'130	1'130	1'130
	Total	7'700	16'740	49'210	48'180
					52'610

Coûts annuels d'exploitation

	Référence	S0	S2	S3	S2+S3
Consommation	[kWh]	18'160	5'796	4'664	4'435
	Coût du kWh [CHF]	0.122	0.15	0.15	0.15
	Coût consom.	2'216	869	700	665
Entretien	[CHF]	670	-	-	-
Amortissement	4.87%	735	1'599	4'699	4'601
	Total	3'621	2'468	5'399	5'266
					5'704

Tableau A9 : Maison familiale, climat de Berne pour 50 m² de capteurs solaires plans non vitrés