

Chaleur ambiante

Projet pilote et de démonstration

Installation de pompe à chaleur simplifiée

**pour le chauffage d'une maison familiale
à Prêles (BE)**

**Rapport final (saisons 1997/1998,
1998/1999 et 1999/2000)**

Projet OFEN no 19'278

P. Renaud, E. Guerra, M. Kernen, M. Chapatte
PLANAIR, Crêt 108A, CH - 2314 La Sagne

sur mandat de l'

Office fédéral de l'énergie

Juin 2001

Rapport final

TABLE DES MATIERES

1. RESUME	3
2. SITUATION	4
3. OBJECTIFS DU PROJET	4
4. METHODE	4
5. DESCRIPTION DU BATIMENT ET DE L'INSTALLATION	5
5.1 Description générale	5
5.2 Description du bâtiment	6
5.3 Description de l'installation	7
5.4 Description de la régulation	9
5.5 Comparatif des coûts	
6. CONCEPT DE MESURES, INSTRUMENTS ET ANALYSE DE DONNEES	11
6.1 Concept pour la détermination de la performance de la pompe à chaleur, l'amélioration du système de régulation et le bilan global	11
6.2 Instrumentation	12
6.3 Prise et traitement des mesures	
7. RESULTATS DE MESURE	14
7.1 Bilan énergétique du bâtiment	14
7.2 Consommation énergétique du chauffage de la maison	19
7.3 Fonctionnement de l'installation pompe à chaleur	32
7.4 Performance de l'installation pompe à chaleur	
8. BILAN GLOBAL	34
9. CONCLUSIONS	36
Annexe 1a Schéma de principe de l'installation (régulation normale)	
Annexe 1b Schéma de principe de l'installation (régulation simplifiée)	
Annexe 2 Plan d'installation du chauffage de sol	

1. RESUME

La villa de la famille Mages à Prêles est équipée d'une pompe à chaleur saumure-eau sans accumulateur thermique. L'eau chaude sanitaire est produite au moyen d'une installation solaire solkit. Les mesures effectuées pendant 3 ans sur cette installation montrent que :

- ce bâtiment, avec ~ 270 mega-joules par m^2 par an à une consommation basse, n'atteignant néanmoins pas le standard Minergie,
- la consommation d'eau chaude sanitaire est très faible, du fait d'un comportement particulièrement économe de l'eau chaude de la part de la famille Mages,
- l'installation de pompe à chaleur fonctionne sans problème et assure le confort des occupants.

Durant une saison de chauffage, une régulation simplifiée, ne tenant compte que de la température de retour de chauffage a été mise en place. Cette régulation fondée sur le principe de l'autorégulation de la température du plancher chauffant n'a pas fonctionné à satisfaction. Ceci est dû à une température d'eau de chauffage trop élevée qui découle d'une densité de tuyaux de chauffage de sol trop faible pour ce système.

Une régulation avec sonde de température extérieure, sonde d'ambiance et de retour de chauffage assure de nouveau le bon fonctionnement de l'installation.

Un comparatif économique montre que cette pompe à chaleur simplifiée est tout à fait concurrentielle face au gaz ou au mazout.

2. SITUATION

M. Mages désireux de choisir une installation de chauffage performante et compétitive a mandaté le bureau Planair pour une analyse des coûts et des performances de différents systèmes de chauffage. Sur la base de cette analyse, il a opté pour une pompe à chaleur simplifiée alliant coûts modérés et performances. Le caractère pilote de cette installation simplifiée a incité le bureau Planair à solliciter l'aide de l'office fédéral de l'énergie pour une campagne de mesures.

Le programme « Pilote et démonstration » dans le domaine des pompes à chaleur de l'OFEN soutient les mesures effectuées sur cette installation pilote.

3. OBJECTIFS DU PROJET

Ce projet vise à démontrer la viabilité d'une installation de pompe à chaleur à coût minimum pour les villas.

Objectifs fixés :

- la détermination de la performance de la pompe à chaleur,
- l'amélioration du système de régulation de l'installation,
- le fonctionnement de l'installation.

La diminution des coûts d'investissements de l'installation est possible en jouant sur les éléments suivants :

- la simplification de la régulation par chauffage au sol à très basse température,
- la réduction des coûts de l'installation (aucune accumulation thermique autre que celle dans les dalles),
- l'économie d'énergie électrique grâce à la suppression de circulateurs et appareils de régulation,
- la possibilité de profiter au maximum des apports solaires passifs.

Ce concept fonctionne dans des bâtiments bien isolés.

A la suite de ce projet, une analyse du fonctionnement de l'installation solaire nous a paru indispensable afin de déterminer un bilan global de la maison.

4. METHODE

Les méthodes choisies pour atteindre les objectifs cités au chapitre précédent sont les suivantes:

- Toutes les grandeurs nécessaires à l'établissement des performances de l'installation ainsi que celles déterminantes pour l'établissement du fonctionnement de la régulation sont mesurées sur une période s'étalant sur 3 saisons de chauffage. Les mesures sont dépouillées et analysées pour en tirer des bilans journaliers, hebdomadaires et saisonniers. Ces bilans serviront ensuite à l'amélioration de la régulation et donc du fonctionnement de l'installation.
- Les grandeurs nécessaires à l'analyse du fonctionnement de l'installation solaire sont mesurées sur une période d'une année. Les mesures permettront de déterminer la consommation d'énergie électrique pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS) ainsi que la production des capteurs solaires thermiques.

5. DESCRIPTION DU BATIMENT ET DE L'INSTALLATION

5.1 Description générale

Le bâtiment est une maison du type villa construite avec des éléments préfabriqués. La maison est située dans la commune de Prêles (Canton de Berne). La construction du bâtiment a été achevée à la fin du mois de novembre 1996 et la mise en service de l'installation au mois de décembre de la même année. A noter que la pose de l'isolation et la séparation entre sous-sol (cave et local technique non chauffés) et la partie d'habitation (rez-de-chaussée) n'ont été terminées qu'à l'été 1998.

Les besoins d'énergie pour le chauffage de la maison sont couverts par une pompe à chaleur eau/eau. L'énergie produite est transmise aux dalles par un chauffage par le sol au rez-de-chaussée et par des radiateurs au premier étage. Un fourneau suédois dans le salon sert de chauffage d'appoint. De plus, un four à bois (double manteau + circulateur d'air) à la cuisine fournit de la chaleur au rez-de-chaussée et au premier étage.

La production d'ECS est assurée par un système de capteur solaire SOLKIT qui couvre une part importante des besoins. L'appoint est assuré par un corps de chauffe (résistance électrique) de 3,6kW.

5.2 Description du bâtiment

La villa se compose de la partie chauffée ($t_i=20^\circ\text{C}$) et des caves non chauffées ($t_c=16^\circ\text{C}$). Les valeurs des coefficients k sont les suivantes :

• murs extérieurs	:	0.23 W/m ² ·K
• sol contre terrain	:	0.42 W/m ² ·K
• sol contre locaux non chauffés	:	0.40 W/m ² ·K
• plafond contre locaux non chauffés	:	0.19 W/m ² ·K
• toiture	:	0.23 W/m ² ·K
• fenêtres (y compris cadre)	:	1.60 W/m ² ·K

Ecartement des serpentins du chauffage de sol :

• atelier, cuisine et hall	:	30 cm
• salon	:	25 cm
• salle de bains	:	15 cm

La maison présente les caractéristiques suivantes :

Type	:	villa
Commune	:	Prêles
Altitude	:	846 m
Volume chauffé à 20°C	:	463 m ³
SRE chauffé à 20°C	:	229 m ²
Rapport de la surface vitrée à la SRE	:	0.18
Température max. à l'entrée du circuit de chauffage	:	45°C
Puissance de chauffage calculée	:	7 kW
Demande d'énergie de chauffage	:	272 MJ/m ² ·an
Valeur limite de la demande d'énergie de chauffage	:	309 MJ/m ² ·an

Demande d'énergie nécessaire pour la
production d'eau chaude sanitaire : 79 MJ/m².an
Demande globale en énergie thermique : 351 MJ/m².an

5.3 Description de l'installation

L'installation de chauffage se compose de :

- une pompe à chaleur
- un réseau de chauffage au sol au rez-de-chaussée, radiateurs à l'étage
- un fourneau à bois de type suédois
- un four à bois à la cuisine
- un système solaire thermique pour la production d'ECS

a) Pompe à chaleur eau/eau

La pompe à chaleur présente les caractéristiques suivantes (données du fabricant):

- modèle : PACC
- type : ZR 40
- puissance calorifique : 7.8 kW
- puissance absorbée : 2.5 kW
- coefficient de performance : 3.1 (source froide 0°C, source chaude 35°C)
- fluide frigorigène : R407C
- source froide : registre terrestre horizontal à 6 boucles de 100 m réparties sur terrain de 450 m²

Une mesure de la puissance calorifique réelle a été réalisée au point 6.3. Cette pompe à chaleur développe une puissance maximale de 7.7 kW dans ces conditions d'utilisation.

b) Réseau de chauffage au sol

La distribution de chaleur se fait par chauffage de sol au rez-de-chaussée et par radiateurs dans les chambres du premier étage.

Le chauffage de sol pour la maison présente de nombreux avantages :

- confort des habitants,
- aucun accumulateur hydraulique de chaleur n'est nécessaire (dans ce cas), la masse de béton des dalles faisant office de stockage. Ainsi la chaleur stockée la journée dans les dalles est restituée en partie après le coucher du soleil.
- Bon rendement de la pompe à chaleur (PAC) grâce à une température faible de distribution dû au chauffage au sol.

c) Fourneau à bois de type suédois

Un fourneau de type suédois, qui est installé dans le séjour, est utilisé comme chauffage d'appoint à la pompe à chaleur durant les moments très froids et seul durant l'entre saison. Le combustible utilisé est du sapin et du hêtre, sous forme de bûches.

d) Système solaire thermique

L'eau chaude sanitaire est produite à l'aide d'une installation solaire et possède les caractéristiques suivantes :

• Type	:	SOLKIT®
• Surface de captage	:	4.5 m ² de capteurs à vitrage sélectif
• Emplacement	:	sur le toit de la maison
• Inclinaison	:	35°
• Orientation	:	S-SE (-15°)
• Accumulateur	:	400 litres
• Système de liaison	:	tube FLEXTUBE (conduites d'aller et de retour et câble électrique)
• Système d'appoint	:	résistance électrique
• Température d'utilisation	:	55°C
• Puissance électrique du corps de chauffe	:	3,6 kW

Avec cette faible température d'utilisation, nous évaluons la part solaire pour la production de l'eau chaude sanitaire à plus de 60%.

5.4 Description de la régulation

Une modification de la régulation a été effectuée le 31 mars 1999. Lors de cette intervention le régulateur existant a été remplacé par un nouvel appareil qui règle le fonctionnement de la PAC uniquement en fonction de la température de retour du circuit de chauffage. Cette modification n'ayant pas apportée des résultats probants, nous sommes revenus le 6 janvier 2000 à la première régulation avec sondes de températures ambiantes et extérieures

Les chapitres 5.4.1, 5.4.2 et 5.4.3 présentent le détail de la régulation avant et après la modification.

5.4.1 Saison 1997/1998 et 1998/1999 (jusqu'au 31 mars 1999)

Le système de régulation de l'installation de chauffage est composé de :

- 1 régulateur Landis&Gyr RVP 54130
- 1 sonde pour la température ambiante
- 1 sonde pour la température de l'air extérieure
- 1 sonde pour la température de retour du circuit de chauffage

Il y a la possibilité de modifier la température de consigne de la température ambiante. Les fonctions de régulation importantes dans le projet de mesures sont explicitées ci-après.

a) Pompe à chaleur

L'enclenchement de la pompe à chaleur est commandé par la sonde d'ambiance, la sonde extérieure et la sonde sur le retour du chauffage. La température ambiante a la priorité sur les deux autres. Le circulateur du circuit de la source froide fonctionne en même temps que la pompe à chaleur.

b) Distribution de chaleur

La pompe à chaleur alimente le circuit de chauffage à l'aide d'un circulateur.

5.4.2 Saison 1999/2000 (du 31 mars 1999 au 6 janvier 2000)

Le système de régulation de l'installation de chauffage à partir du 31 mars 1999 est composé de :

- 1 régulateur Flica – PCR - 100
- 1 sonde pour la température de retour du chauffage

a) Pompe à chaleur

L'enclenchement de la pompe à chaleur est commandé par la sonde sur le retour du chauffage. Le circulateur du circuit de la source froide fonctionne en même temps que la pompe à chaleur.

b) Distribution de chaleur

La pompe à chaleur alimente le circuit de chauffage à l'aide d'un circulateur.

5.4.3 Saisons 2000 et suivantes (à partir du 6 janvier 2000)

Le système de régulation de l'installation de chauffage à partir du 6 janvier 2000 est composé de :

- 1 régulateur Landis&Gyr RVP 54130
- 1 sonde pour la température ambiante
- 1 sonde pour la température de l'air extérieure
- 1 sonde pour la température de retour du circuit de chauffage

Il y a la possibilité de modifier la température de consigne de la température ambiante. Les fonctions de régulation importantes dans le projet de mesures sont explicitées ci-après.

a) Pompe à chaleur

L'enclenchement de la pompe à chaleur est commandé par la sonde d'ambiance, la sonde extérieure et la sonde sur le retour du chauffage. La température ambiante a la priorité sur les deux autres. Le circulateur du circuit de la source froide fonctionne en même temps que la pompe à chaleur.

b) Distribution de chaleur

La pompe à chaleur alimente le circuit de chauffage à l'aide d'un circulateur.

5.5 Comparatif des coûts

Dans le tableau de la page suivante on a comparé les investissements et les frais annuels totaux pour différents type de producteurs de chaleurs.

Les montants que l'on retrouve dans le tableau tiennent compte de l'installation du producteur de chaleur (chaudière à mazout ou à gaz, PAC), de la régulation, jusqu'au départ des groupes de chauffage (prix 2001). Le but de ce tableau étant de comparer une chaudière et une PAC. Pour que la comparaison soit correcte, nous avons choisi une PAC combinée avec chauffe-eau du type *Vaillant GEOTHERM Exclusiv* de 8kW qui fonctionne à 2 niveaux de température : 35°C pour le chauffage (COP de 4.5), 50°C pour l'ECS (COP de 3) et un corps de chauffe d'appoint pour élever la température de 50°C à 55°C. A noter qu'une comparaison supplémentaire a été envisagée avec une PAC pour le chauffage et en remplacement des capteurs solaires thermiques (système actuel), un boiler-PAC. Ce système de moindre coût (~CHF3'000.-- de moins qu'avec le système actuel) utilise l'excédent de chaleur d'un local technique par exemple. Nous avons jugé cette solution inadaptée à la villa Mages qui ne présente aucun local technique et à fortiori pas de chaleur excédentaire utilisable.

Poste	Investissement pour le chauffage			
	au mazout	au gaz	pompe à chaleur normale	simplifiée
Production de chaleur (chaudière, brûleur, montage)	CHF 8'500	CHF 8'500	CHF 15'000	CHF 15'000
Raccordement électrique	CHF 1'500	CHF 1'500	CHF 1'500	CHF 1'500
Accumulateur thermique			CHF 2'000	
Boiler (ECS)	CHF 3'000	CHF 3'000		
Cheminée	CHF 2'500	CHF 2'500		
Citerne (2000 litres)	CHF 2'000			
Local citerne	CHF 1'000			
Introduction de la conduite de gaz		CHF 2'000		
Registres terrestres pour la PAC			CHF 5'000	CHF 5'000
TOTAL DES INVESTISSEMENTS	CHF 18'500 86%	CHF 17'500 81%	CHF 23'500 109%	CHF 21'500 100%
Poste	Coûts annuels (prix 2001)			
Frais de capitaux:				
Période d'amortissement [ans] 15				
Taux d'intérêts 6%	CHF 1'905	CHF 1'802	CHF 2'420	CHF 2'214
Frais de combustible:				
Consommation [kWh] 16'000				
Consommation ECS [kWh] 1'300				
Prix des combustibles:				
mazout [CHF/100kg] 47	CHF 644			
gaz [cts/kWh] 5.7		CHF 912		
Electricité moy. hiver [cts/kWh] 14.15				
Electricité moy. été [cts/kWh] 11.5			CHF 503	CHF 503
Taxe mensuelle [CHF/mois] 7.75			CHF 93	CHF 93
Electricité pour ECS (tarif moyen) [cts/kWh] 12.82			CHF 68	CHF 68
Mazout ou gaz pour ECS (voir tarif ci-dessus)	CHF 52	CHF 6		
Frais d'entretien:				
Entretien du brûleur, ramonage	CHF 400	CHF 400		
Contrôle et entretien de la PAC			CHF 200	CHF 200
Frais annuels totaux	CHF 3'002 98%	CHF 3'120 101%	CHF 3'284 107%	CHF 3'078 100%

Le montant de SFr. 1'000.—pris pour le local citerne tient compte du volume qu'occupe celle-ci (2 m3 à 500.-Fr./m3). Le volume occupé par une chaudière étant sensiblement égal à celui occupé par une PAC, ce volume n'a pas été pris en considération dans cette comparaison.

Le tableau de la page précédente appelle les commentaires suivants :

- on peut observer que les coûts totaux d'investissement pour la pompe à chaleur sont plus élevés que ceux de la chaudière à gaz et à mazout.
- les frais annuels totaux pour une PAC simplifiée sont équivalents par rapport à un système de production de chaleur à gaz ou à mazout.
- les besoins en énergie de chauffage de la villa estimés lors de cette étude correspondent aux besoins réels mesurés (en page 14).

6. CONCEPT DE MESURES, INSTRUMENTS ET ANALYSE DE DONNEES

Le concept de mesure découle directement des objectifs fixés à savoir :

- la détermination de la performance de la pompe à chaleur,
- l'amélioration du système de régulation de l'installation,
- le fonctionnement de l'installation,
- bilan global (avec eau chaude sanitaire).

6.1 Concept pour la détermination de la performance de la pompe à chaleur, l'amélioration du système de régulation et le bilan global

Les grandeurs à déterminer pour l'étude de la PAC sont :

- l'énergie chaleur consommée par l'installation de chauffage (PAC + fourneau à bois),
- l'énergie électrique consommée par l'installation (PAC + circulateurs),
- le coefficient de performance de la pompe à chaleur.

Les grandeurs à déterminer pour le bilan global avec l'installation solaire sont :

- L'énergie chaleur produite par l'installation solaire,
- L'énergie électrique consommée pour le chauffage d'appoint d'ECS (corps de chauffe),

6.2 Instrumentation

La liste complète des points de mesure se trouve en annexe.

a) Energie livrée à l'installation de chauffage par la pompe à chaleur

Un calculateur de chaleur AQUAMETRO CALEC® MB est utilisé pour la mesure de l'énergie chaleur délivrée à l'installation de chauffage. Il calcule cette valeur à l'aide des températures d'aller et de retour ainsi que du débit de l'installation de chauffage. Ensuite, les données sont transmises au Datalogger et enregistrées.

b) Energie produite par le fourneau suédois

L'énergie chaleur produite par le fourneau est déterminée à partir de la consommation de bois, estimée par M. Mages. Le rendement de combustion du fourneau a été estimé à 80%.

c) Energie électrique consommée pour la production de chaleur

Deux différents comptages de l'énergie électrique (heures creuses/heures pleines) sont faits en permanence pour l'installation pompe à chaleur ainsi que pour les circulateurs du circuit de la source froide et chaude relevés par M. Mages hebdomadairement.

Les Forces Motrices Bernoises (FMB) offrent un tarif préférentiel pour les installations pompe à chaleur appelé Econom 1 avec, en contrepartie, la possibilité pour les FMB d'arrêter l'installation 2 fois 2 heures par jour (interruptible).

d) Températures ambiante, extérieure, du circuit de chauffage et des serpentins

Les températures d'aller et de retour du circuit de chauffage sont mesurées par le calculateur de chaleur Calec MB à l'aide de sondes PT100. Celle d'entrée et de sortie ainsi que les températures ambiantes sont mesurées à l'aide de sondes de température. Ces données sont ensuite stockées dans le Datalogger.

e) Energie produite par l'installation solaire pour la production d'eau chaude sanitaire

Un calculateur de chaleur AQUAMETRO CALEC® MCL 200 est utilisé pour la mesure de l'énergie de chaleur totale délivrée en eau chaude sanitaire (ECS) par l'installation solaire. Il calcule cette valeur à l'aide de la température froide (avant capteurs solaires et corps de

chauffe électrique) et de la température chaude après accumulateur ainsi que du débit de cette installation solaire. Le taux de fonctionnement du corp de chauffe est mesuré à l'aide du nombre d'enclenchement par un relais. Ensuite, les données sont transmises au Datalogger et enregistrées.

6.3 Prise et traitement des mesures

Un Datalogger Mikromec-MULTISENS Mlm824p sert à :

- stocker des valeurs (mesures continues, etc.),
- afficher l'état du système,
- intervenir sur la marche du système.

6.3.1 Mesures automatiques :

- Energie délivrée à l'installation de chauffage par la pompe à chaleur,
- Températures ambiante, extérieure, du circuit de chauffage et des serpentins,
- Etat de la pompe à chaleur (enclenché/déclenché),
- Energie délivrée par l'installation solaire,
- Nombre d'enclenchement du chauffage d'appoint (corps de chauffe).

La mesure de l'énergie est la somme des impulsions sur un quart d'heure. Les températures sont mesurées toutes les minutes, ensuite la moyenne sur un quart d'heure est stockée. L'état de la PAC représente l'état au moment de la mesure (une tous les quarts d'heure).

L'unité de temps de un quart d'heure a été estimée suffisante pour tous les phénomènes liés à la thermique du bâtiment. Une unité de temps plus courte aurait alourdi le traitement des mesures.

Les mesures automatiques sont disponibles pour la saison de chauffe 97/98 à partir du 23 janvier 1998 jusqu'au 22 juin 1998. Les mesures de température automatiques pour le début de la période de chauffe ne sont pas disponibles car le système d'acquisition n'était pas encore en fonction. La pompe à chaleur a été arrêtée au début du mois de mai. Les données mesurées entre le 5 mai et le 22 juin n'ont donc pas été prises en compte dans le cadre de cette étude.

Les mesures automatiques sont disponibles pour la saison de chauffe 98/99 du 23 février jusqu'au 1 juin (2 mai). Les mesures de température automatiques pour le début de la période de chauffe ne sont pas disponibles car le système d'acquisition n'a pas enregistré les valeurs. La pompe à chaleur a été arrêtée au début du mois de mai. Les données mesurées entre le 2 mai et le 1^{er} juin n'ont donc pas été prises en compte dans le cadre de cette étude.

Les mesures automatiques sont disponibles pour la saison de chauffe 99/2000 du 22 décembre jusqu'à la fin de l'année 2000. Les mesures de température automatiques pour le début de la période de chauffe ne sont pas disponibles car le système d'acquisition n'a pas enregistré les valeurs. La pompe à chaleur a été arrêtée au début du mois d'avril. Les données mesurées entre le 3 avril et la fin de l'année n'ont donc pas été prises en compte pour le chauffage mais pour l'étude globale du bâtiment (ECS par capteurs solaires).

Les mesures stockées dans le Datalogger sont transférées via modem au bureau Planair. Les valeurs de mesures sont ensuite intégrées dans un fichier EXCEL.

6.3.2 Mesures manuelles

- Energie électrique consommée pour la production de chaleur
- Quantité de bois consommée

Toutes ces valeurs ont été relevées à la main par M. Mages une fois par semaine.

Les mesures manuelles sont disponibles à partir du 1 novembre 1997, début de la saison de chauffe, jusqu'au 5 mai 1998, jour de l'arrêt de l'installation.

Les mesures manuelles pour la deuxième saison sont disponibles à partir du 23 octobre 1998, début de la saison de chauffe, jusqu'au 2 mai 1999, jour de l'arrêt de l'installation.

7. RESULTATS DE MESURE

Les résultats de mesure pour la période de chauffage allant de 1^{er} novembre 1997 au 5 mai 1998 sont présentés ci-dessous.

7.1 Bilan énergétique du bâtiment

7.1.1 Période de chauffage

Période de chauffage			
Saison	1997/98	1998/99	1999/2000
Enclenchement de la pompe à chaleur	01.nov.97	23.oct.98	15.oct.99
Déclenchement de la pompe	05.mai.98	02.mai.99	02.avr.00
Nombre de jours de chauffage	186 jours	191 jours	169 jours

Tableau 1 Période de chauffage

7.2 Consommation énergétique du chauffage de la maison

Consommation pour le chauffage			
Saison	1997/98	1998/99	1999/2000
Nb de jours de chauffage	186	191	169
Degrés-jours 12/20 pour la période de chauffage [DJ]	3'120	3'460	3'017
Degrés-jours 12/20 fourni par Météonorm [DJ]	3'250	3'290	2'978
Surface de référence énergétique (SRE) [m²]	229	229	229
Consommation énergétique PAC [kWh]	15'610	15'702	13'249
Consommation énergétique bois [kWh]	1'640	2'197	1'252
Consommation TOTALE [kWh]	17'250	17'899	14'501
Indice de dépense énergétique brut [MJ/m².an]	271	281	228
Indice de dépense énergétique pondéré [MJ/m².an]	282	268	225

Tableau 2 Consommation énergétique du chauffage de la maison

a) Saison 97/98

Etant donné que nous avons les mesures qu'à partir du 23 janvier 1998 nous ne pouvons pas calculer la valeur des degrés-jour pour l'hiver 1997/98.

En faisant une comparaison des degrés-jour sur la saison de chauffe entre Prêles et le Val-de-Ruz à l'aide du logiciel Météonorm nous avons remarqué que les valeurs saisonnières sont identiques.

En connaissant les valeurs mesurées pendant tout l'hiver par le Service neuchâtelois de l'énergie au Val-de-Ruz nous avons pu reconstituer la période qui nous manquait (du 1^{er} novembre 1997 au 22 janvier 1998).

Exemple de calcul :

Cela nous amène à une valeur pour les degrés-jour de l'hiver 1997/98 de :

- Nombre de degrés-jours 12/20 durant cette période : 3'120 DJ
- Nombre de degrés-jours 12/20 fourni par Météonorm (hiver normal) du 1 novembre au 5 mai : 3'250 DJ

La période de chauffe 1997-1998 a donc été relativement clémente, notamment pendant les mois de novembre, décembre et janvier.

L'indice de dépense d'énergie de chauffage pour la villa est présenté ci-dessous :

- Consommation énergétique totale pour le chauffage pendant la période de chauffage 1 novembre 1997 au 5 mai 1998 :

pompe à chaleur	:	15'610 kWh		
fourneau à bois	:	1'640 kWh		
Total:	:	17'250 kWh	=>	62'100 MJ/m ² ·an

- Indice de dépense énergétique brut :

$$IDE = \frac{\text{Consommation}}{\text{SRE}} = \frac{62'100}{229} = 271 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{an}$$

- Indice de dépense énergétique pondérée :

$$IDE_{\text{pondéré}} = IDE \cdot \frac{DJ_{\text{théorique}}}{DJ_{\text{réel}}} = 271 \cdot \frac{3250}{3120} = 282 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{an}$$

Le calcul de l'indice de dépense énergétique pondéré a été fait pour avoir une valeur rapportée à une saison de chauffe « normale ». Cette valeur est très proche de la valeur théorique calculée pour la maison, qui était de 272 MJ/m²·an. La valeur limite calculée selon l'Ordonnance générale de l'énergie du Canton de Berne (309 MJ/m²·an) est respectée.

L'isolation ayant été terminée en été 1998, on peut s'attendre à une valeur inférieure au 282 MJ/m²·an pour la deuxième année de mesures.

b) Saison 98/99

En connaissant les valeurs mesurées pendant tout l'hiver par le Service neuchâtelois de l'énergie au Val-de-Ruz nous avons pu reconstituer la période qui nous manquait (du 23 octobre 1998 au 2 mai 1999).

Les calculs sont les mêmes que pour la saison 97/98.

c) Saison 99/00

Le data logger à fonctionné à partir du 22 décembre 1999. Nous avons reconstitué la période du 15 octobre 1999 au 21 décembre 2000.

Cela nous amène à une valeur pour les degrés-jour de l'hiver 1999/00 de :

- Nombre de degrés-jours 12/20 durant cette période : 3'017 DJ

Les calculs sont les mêmes que pour la saison 97/98.

d) Graphique des consommations

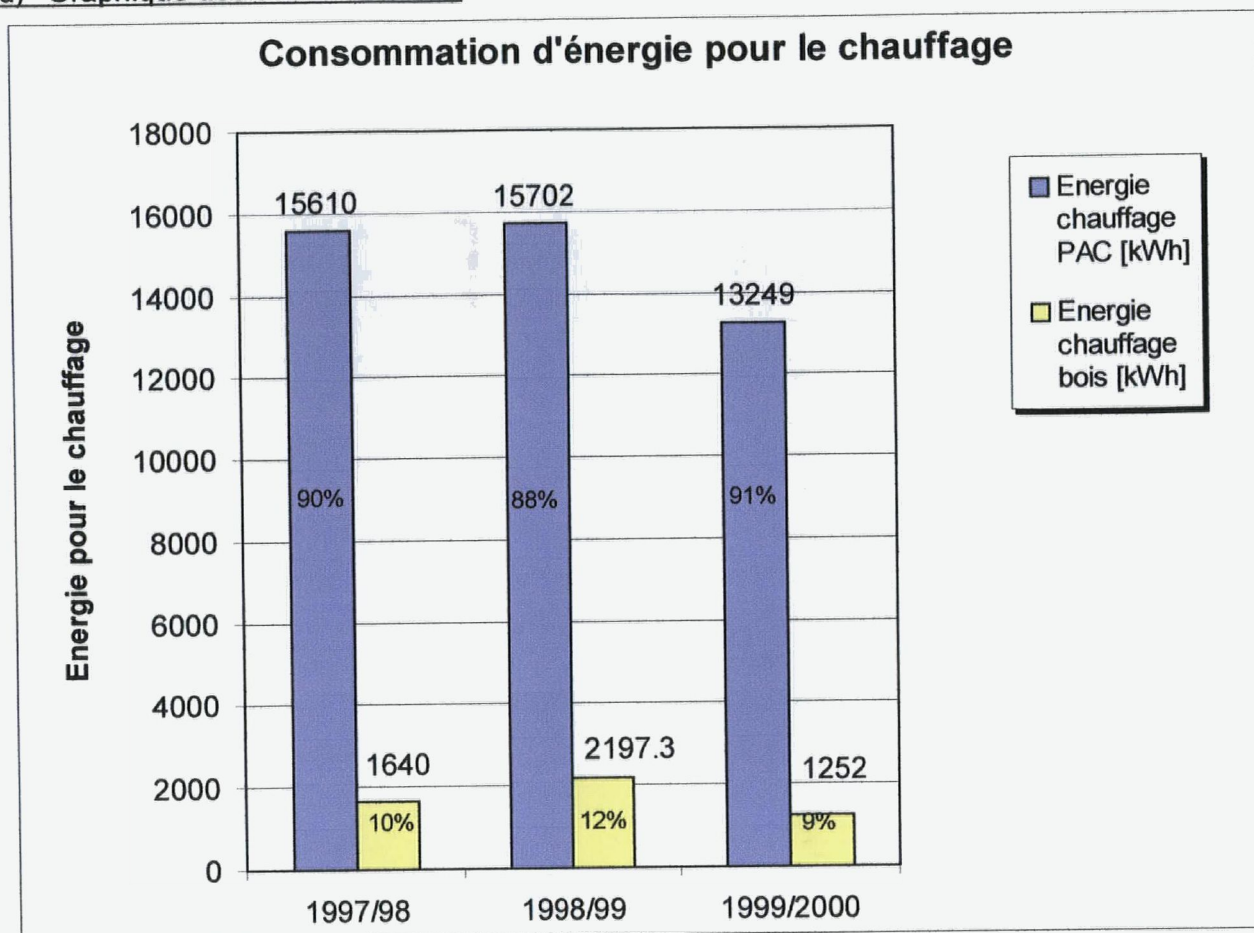


Figure 1 Consommation d'énergie de chauffage pour les trois saisons

La figure ci-dessus appelle les commentaires suivants :

- A la fin de la saison 99/00, la PAC a été arrêté au début du mois d'avril (début du mois de mai pour les deux autres saisons). Ceci explique la différence importante entre la consommation totale des deux première saison et la saison 99/00,
- le fourneau à bois est effectivement utilisé comme chauffage d'appoint et ne couvre que le 9 à 12% des besoins en énergie de chauffage de la maison.

e) Signatures énergétiques

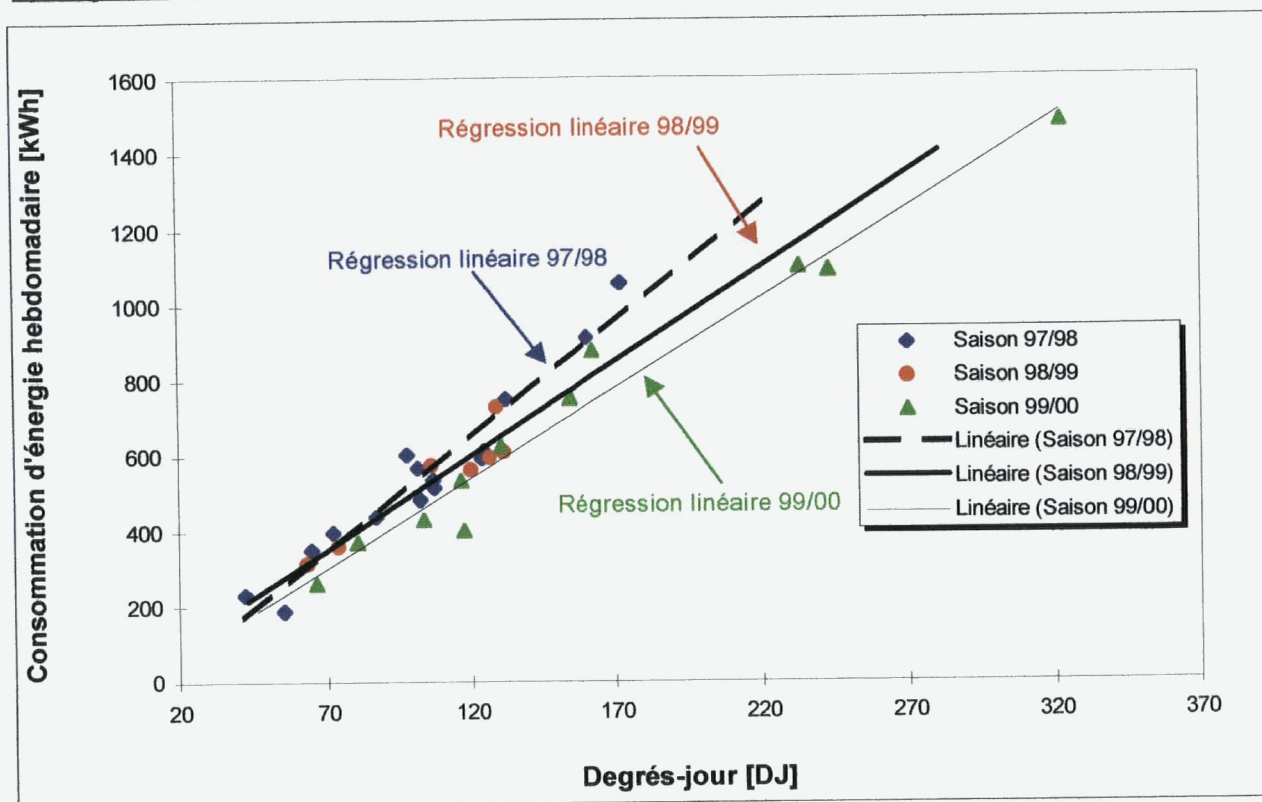


Figure 2 Signatures énergétiques

La figure 2 présente la signature énergétique de la villa pour la période du 24 janvier au 5 mai 1998, du 23 février au 2 mai 1999 et du 24 décembre 1999 au 2 avril 2000.

La figure précédente appelle les commentaires suivants :

- on peut observer que les mesures de l'énergie chaleur consommée sont alignées autour de leur droite de régression,
- les coefficients de corrélation sont de 0.93 (saison 1997/1998), de 0.89 (saison 1998/1999) et de 0.97 (saison 1999/2000)
- on ne peut pas remarquer un effet du vent sur la consommation.
- étant donné que l'on n'a pas de mesures de l'ensoleillement il est difficile de juger l'influence des apports solaires passifs. Une approche sur une période d'une journée est faite à la figure 3.
- Ce graphique confirme que les valeurs mesurées sont cohérentes.
- Les signatures énergétiques des années 98/99 et 99/00 sont très proche l'une de l'autre et l'écart pour la saison 97/98 est dû au fait que certaines pièces de la maison n'étaient pas encore isolées durant cette période de chauffage.

f) Apports solaires passifs au bâtiment

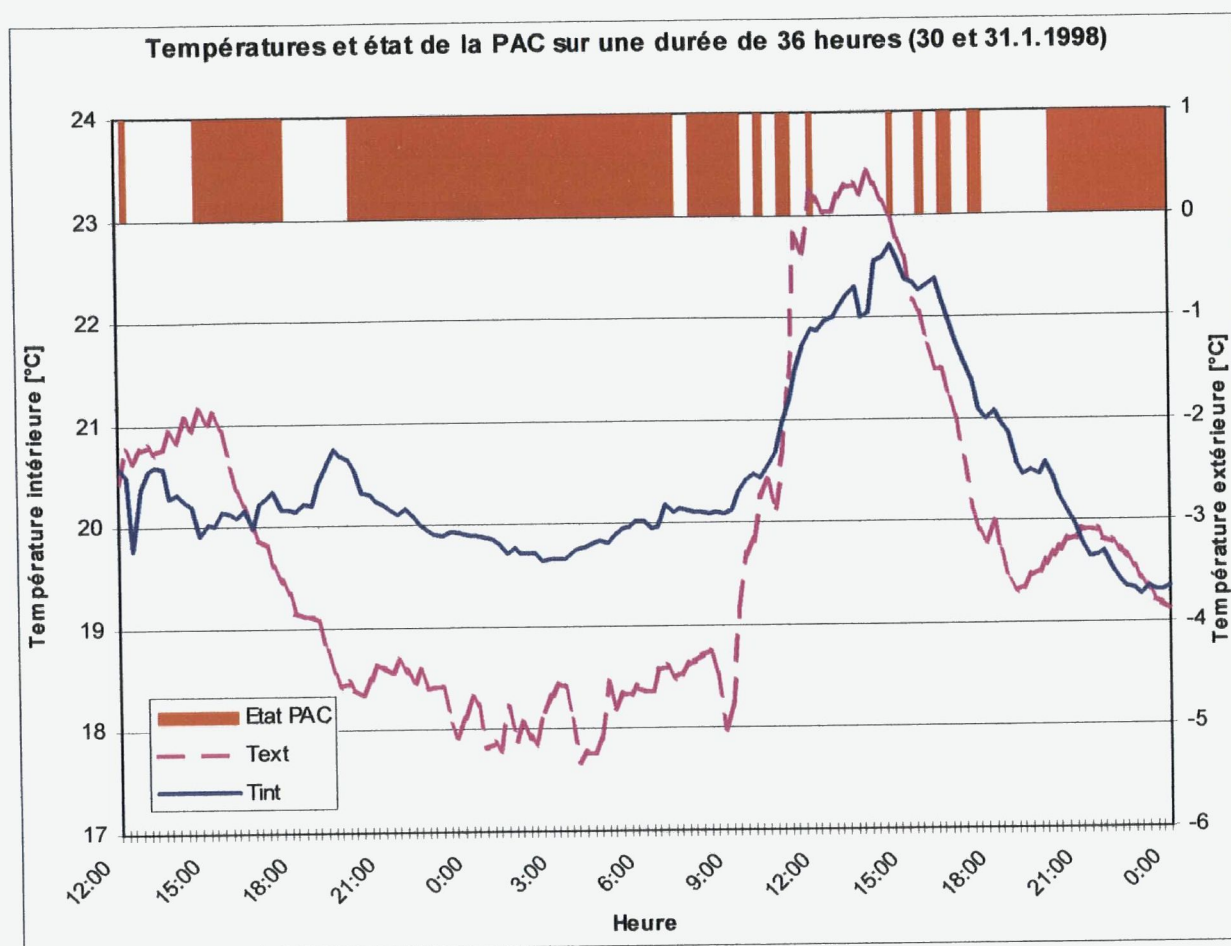


Figure 3 Fonctionnement de la pompe à chaleur et apports solaires

Les mesures effectuées dans ce projet ne permettent pas d'évaluer précisément des apports solaires passifs au bâtiment. En effet l'instrumentation nécessaire à cette mesure - solarimètre, mesures de température à divers endroits du bâtiment - n'a pas été prévue car cet aspect dépasse le cadre de ce mandat.

Cependant le graphique précédent montre certains effets des apports solaires sur le comportement de l'installation :

- le 30 janvier, entre 12h30 et 14h30 la PAC se déclenche suite à la hausse des températures intérieure et extérieure due au soleil. En fin d'après-midi, la PAC s'enclenche de nouveau.
- entre 18h et 20h on observe un déclenchement de la PAC, qui est probablement dû à l'utilisation du fourneau qui a engendré une hausse de la température ambiante. En fin de soirée, la PAC s'enclenche de nouveau.
- la PAC fonctionne pendant toute la nuit. Il faut remarquer que la température extérieure est située entre -4 et -5°C. Le fonctionnement en continu de la pompe à chaleur durant la nuit s'explique par la température extérieure très basse.
- dès l'arrivée du soleil, à 9h (le 31 janvier), on remarque une importante hausse des températures intérieure et extérieure, avec un déclenchement de la PAC,
- après la tombée de la nuit on observe une chute des températures, avec l'enclenchement de la PAC à environ 19h30.

7.3 Fonctionnement de l'installation pompe à chaleur

a) Comportement sur la saison

Les figures suivantes représentent le temps de fonctionnement hebdomadaire de la pompe à chaleur et la température extérieure moyenne sur une semaine durant la période allant du 24 janvier au 5 mai 1998, du 23 février au 2 mai 1999 et du 24 décembre 1999 au 4 avril 2000.

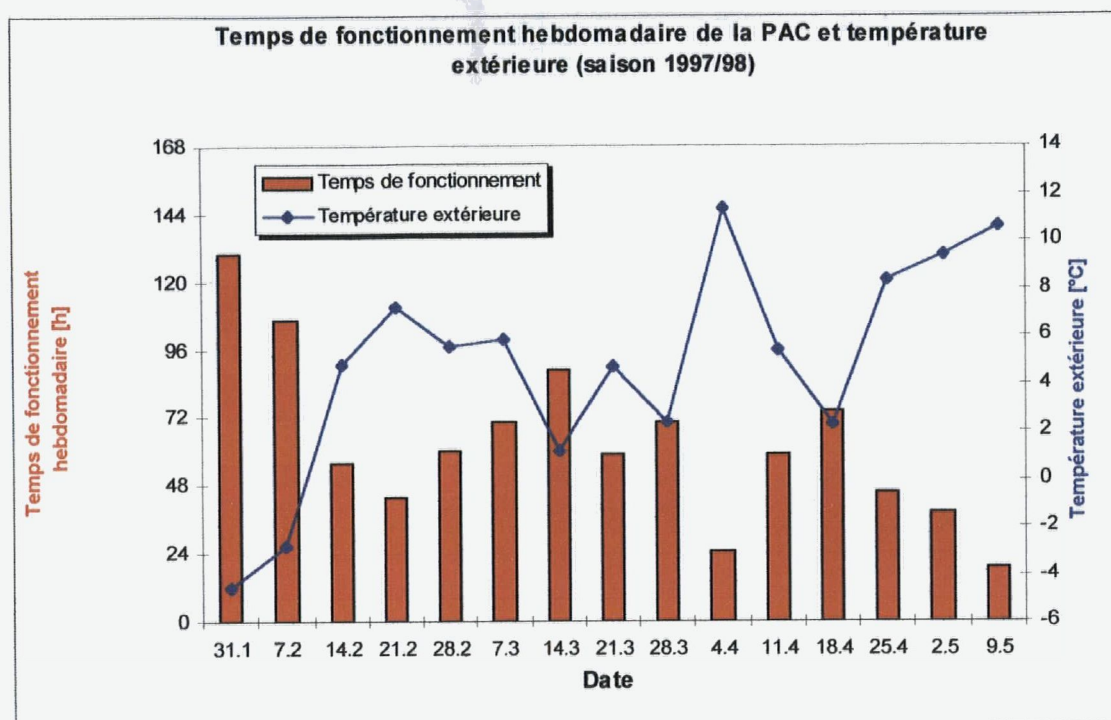


Figure 4 a Temps de fonctionnement de la PAC (saison 1997/1998)

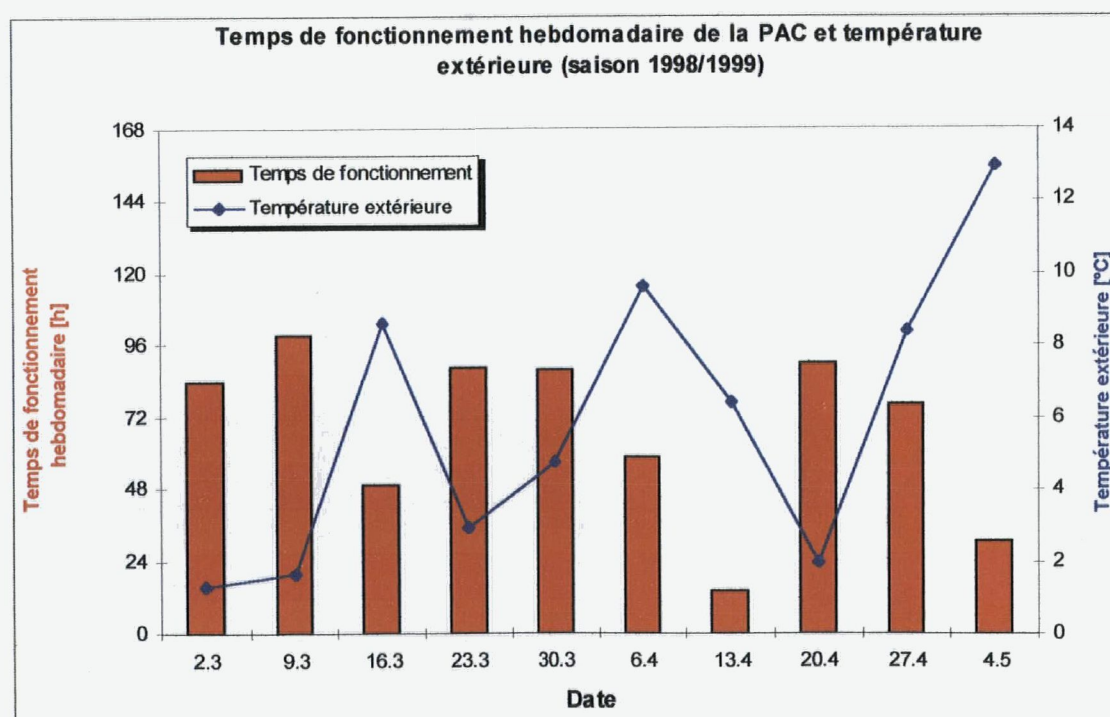


Figure 4 b Temps de fonctionnement de la PAC (saison 1998/1999)

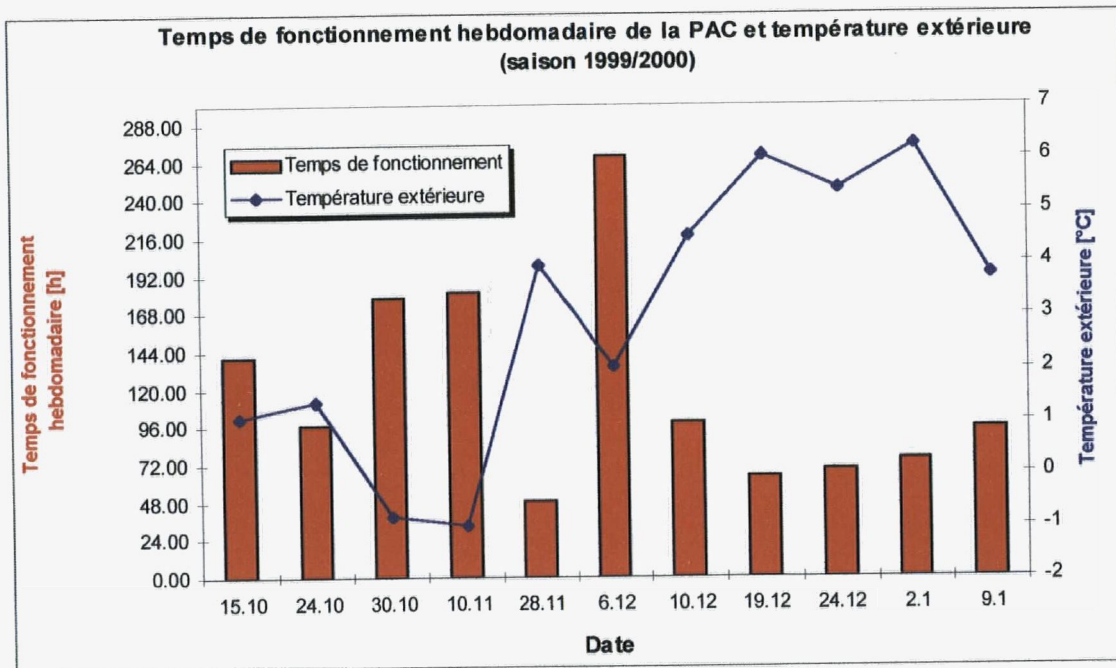


Figure 4 c Temps de fonctionnement de la PAC (saison 1999/2000)

Les figures précédentes amènent les commentaires suivants :

- on remarque très bien que le temps de fonctionnement de la pompe à chaleur est inversement proportionnel à la valeur de la température extérieure,
- le temps de fonctionnement de la pompe à chaleur pendant la semaine la plus froide de l'hiver 1997/98 est d'environ 130 heures, cela correspond au 77% du temps total. La puissance de la PAC est donc suffisante. On dispose encore d'une marge de puissance pour les cas où la température extérieure descend à des valeurs plus basses,
- On constate que les mesures pour les trois saisons sont comparables.

Les figures suivantes représentent les températures moyennes des circuits durant la période entre le 24 janvier et le 5 mai 1998 et le 23 février et le 4 mai.

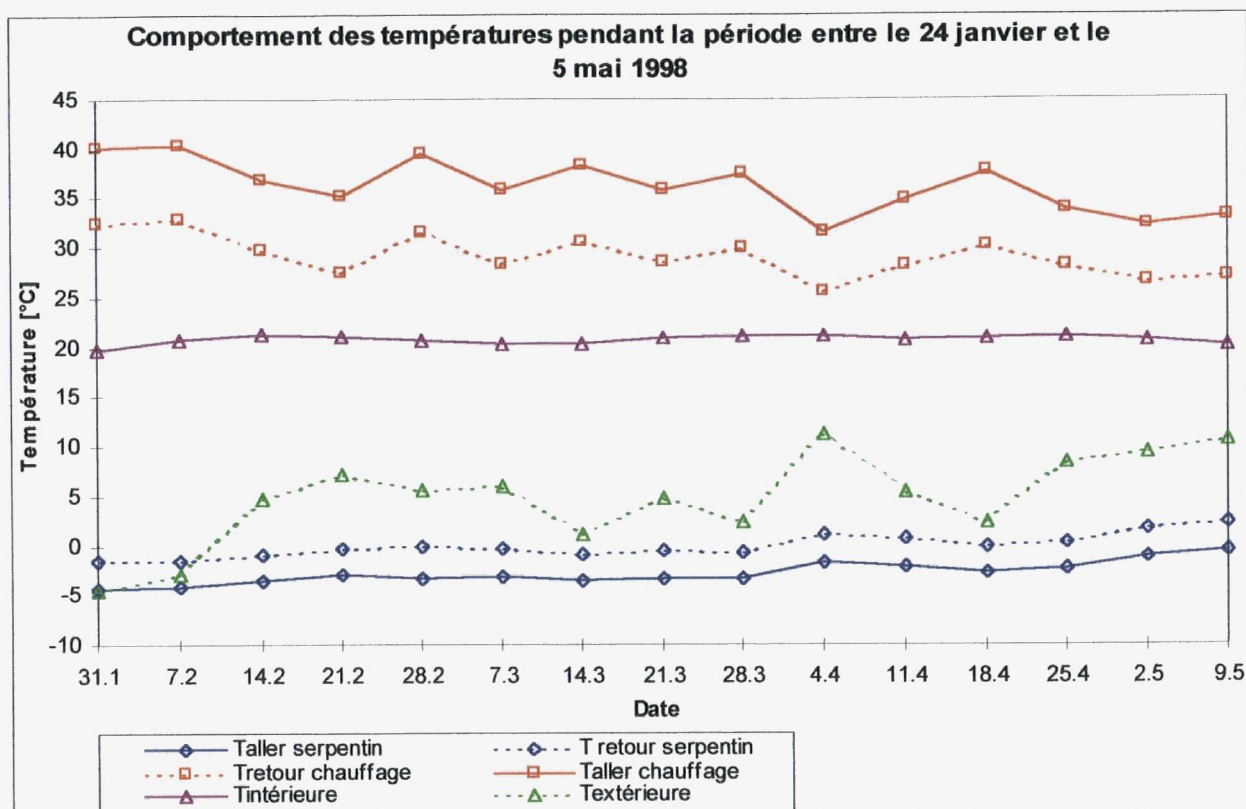


Figure 5 a Comportement de l'installation pendant la période entre le 24 janvier et le 5 mai 1998

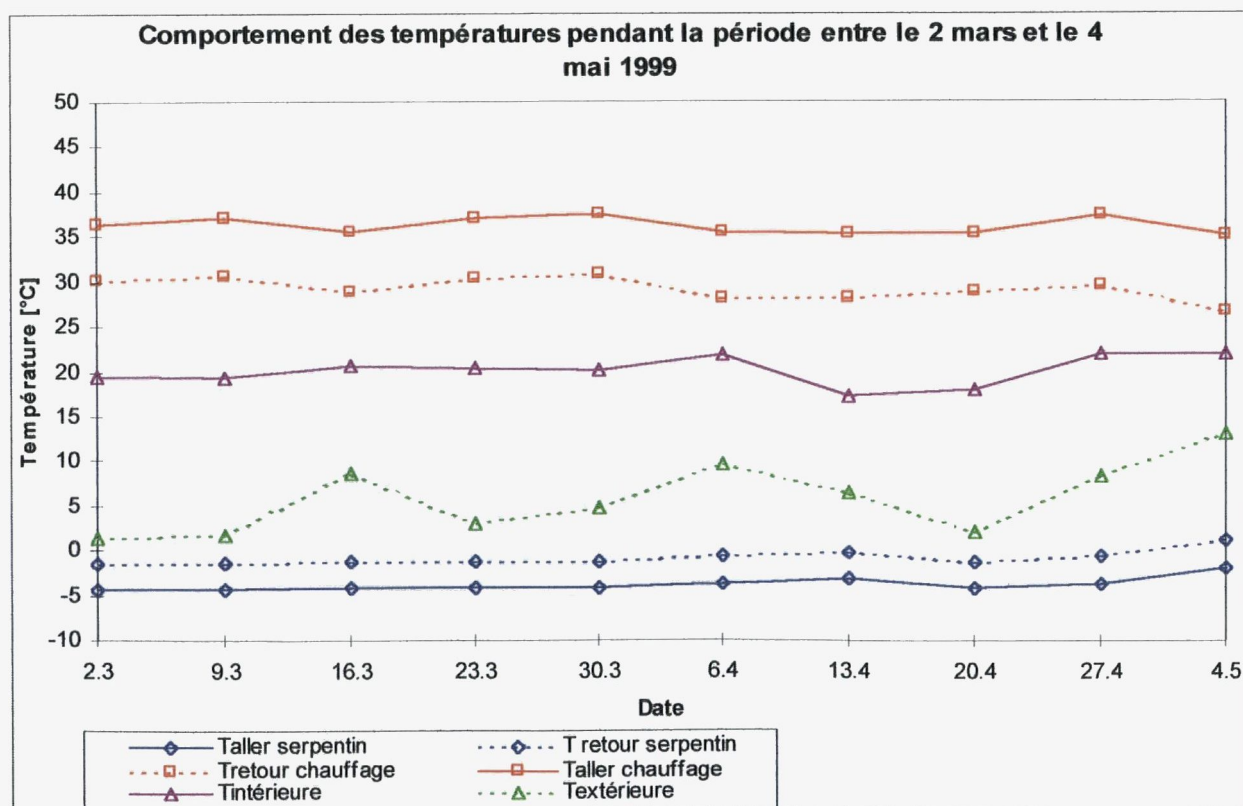


Figure 5 b Comportement de l'installation pendant la période entre le 2 mars et le 4 mai 1999

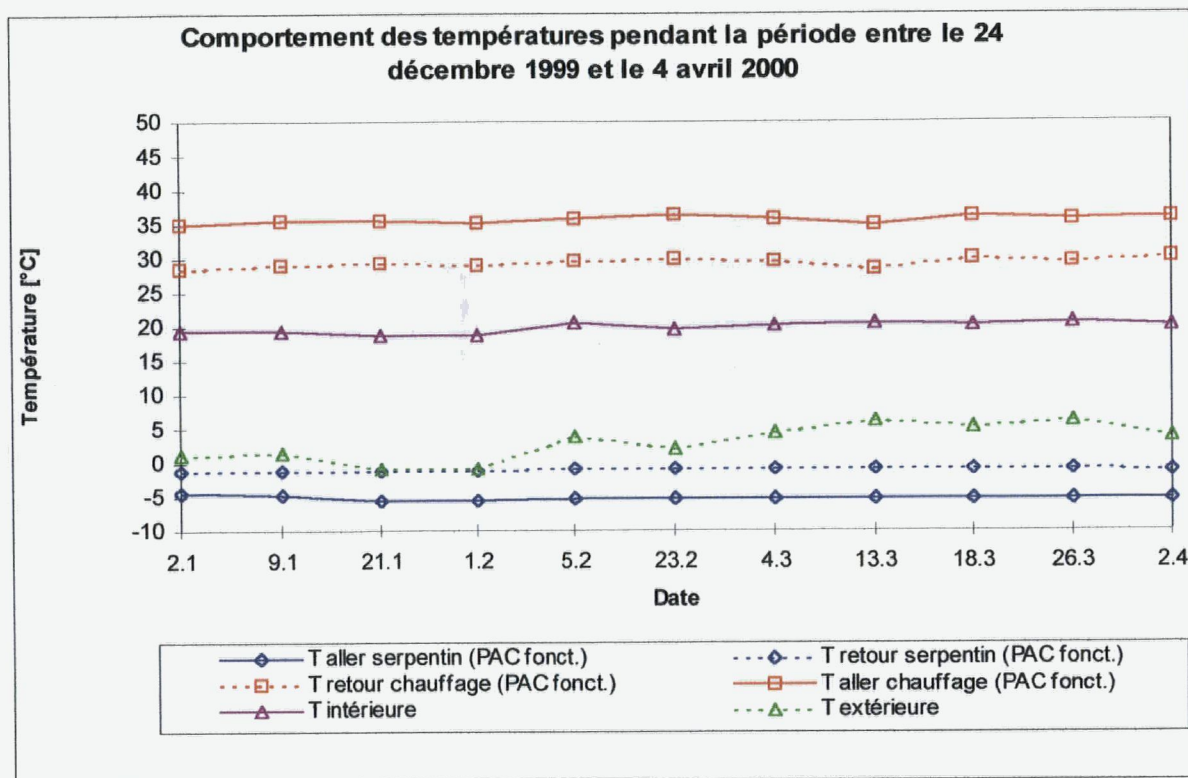


Figure 5 c Comportement de l'installation pendant la période entre le 24 décembre 1999 et le 4 avril 2000

Les figures de la page précédente amènent les commentaires suivants :

- les températures de fonctionnement de l'installation de chauffage s'élèvent à 40°C/33°C pendant les périodes de grand froid (saison 1997/1998). Pendant les périodes entre 5 et 10°C de température extérieure, les températures de chauffage se situent à 35°C/28°C environ.
- la différence de température entre l'aller et le retour du chauffage reste assez constante tout le long de la période de chauffage ($\Delta T=5-8$ K), ce qui dénote la stabilité du système.
- la pompe à chaleur et le fourneau à bois garantissent toujours une température ambiante supérieure à 20°C. L'installation est donc suffisamment puissante.
- la température de la source froide augmente légèrement tout au long de la saison. Cela signifie que l'installation n'épuise pas thermiquement le terrain.
- la différence de température entre l'aller et le retour de la source froide est constante tout le long de la saison ($\Delta T=3$ °K),
- la chute de la température ambiante qu'on observe entre le 6 et le 13 avril 1998/1999, est due à un arrêt du chauffage.

b) Comportement sur une semaine

Saison 1997/1998

La figure suivante représente le comportement des températures et l'état de fonctionnement de la pompe à chaleur durant une semaine froide entre le 31 janvier et le 7 février 1998.

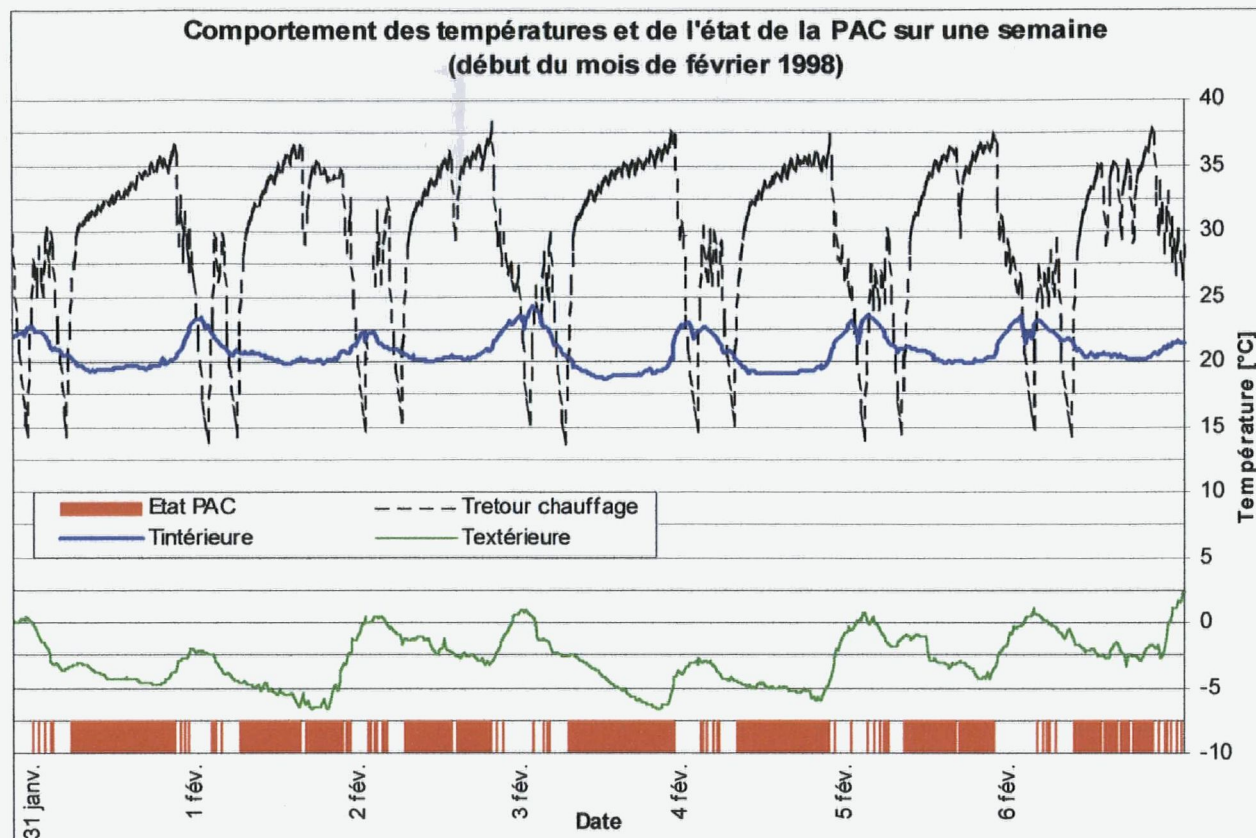


Figure 6 a Comportement des températures et de l'état de la PAC pendant une semaine froide

La semaine prise en considération commence le 31 janvier à midi pour se terminer le 7 février à 11h59.

La figure précédente amène les commentaires suivants :

- pendant une semaine froide, on observe que la PAC fonctionne en continu pendant toute la nuit et une bonne partie de la matinée. Comme on peut également le remarquer sur la figure 8, la machine s'enclenche aussi pendant la journée pour des périodes relativement courtes.
- quand la PAC fonctionne pendant une longue période, la température de retour du circuit chauffage monte à des valeurs de 36/37°C. Cela représente l'accumulation d'énergie dans les dalles.
- la température ambiante suit de manière amortie les variations de la température extérieure.
- l'analyse de la température extérieure nous indique que cette semaine a été très probablement ensoleillée, avec du soleil tous les jours.
- le nombre d'heures de fonctionnement de la PAC pendant les semaines froides est très élevé.

La figure suivante représente le comportement des températures et l'état de fonctionnement de la pompe à chaleur durant une semaine de mi-saison entre le 4 et le 11 avril 1998.

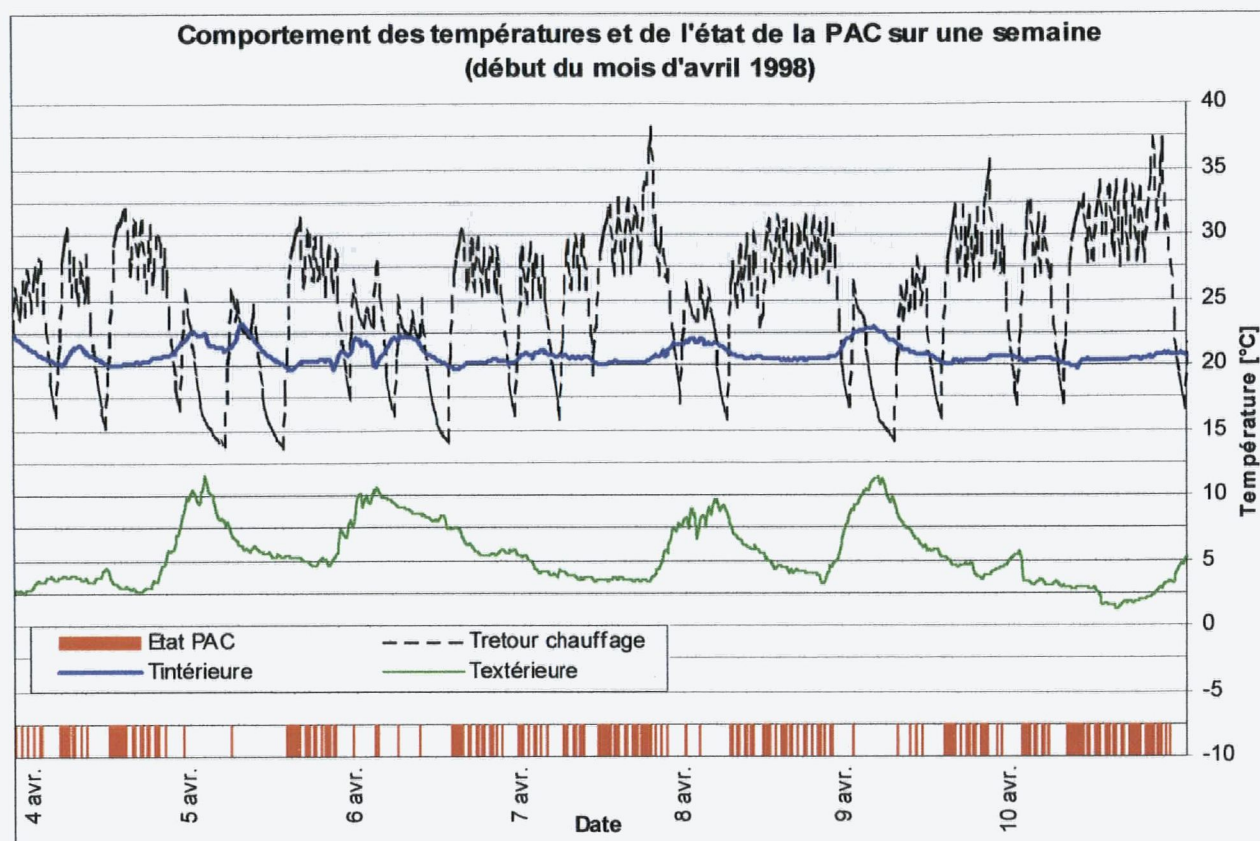


Figure 6 b Comportement des températures et de l'état de la PAC pendant une semaine de mi-saison

La semaine prise en considération commence le 4 avril à midi pour se terminer le 11 avril à 11h59

Cette figure amène les commentaires suivants :

- étant donné que la PAC fonctionne pendant des courtes périodes, la température de retour du circuit chauffage n'arrive pas à monter au-dessus de 32/33°C. Cela montre un plus faible potentiel d'accumulation par rapport à l'exemple précédent (figure 7).
- pendant cette semaine on remarque 4 pics sur la température extérieure qui indiquent les journées ensoleillées. Pendant les jours sans soleil on remarque que la PAC fonctionne un plus grand nombre d'heures que durant les jours ensoleillés.
- les enclenchements de la pompe à chaleur au milieu de l'après-midi pour des durées d'un quart d'heure montrent une régulation mal adaptée du système.

L'analyse du nombre d'enclenchements de la pompe à chaleur pendant la semaine dénote une différence importante entre les comportements en hiver et à la mi-saison (figures 6 et 7). Ceci est dû à la différence de la demande d'énergie de chauffage.

Saison 1998/1999

La figure suivante représente le comportement des températures et l'état de fonctionnement de la pompe à chaleur durant une semaine de mi-saison entre le 23 et le 30 mars 1999.

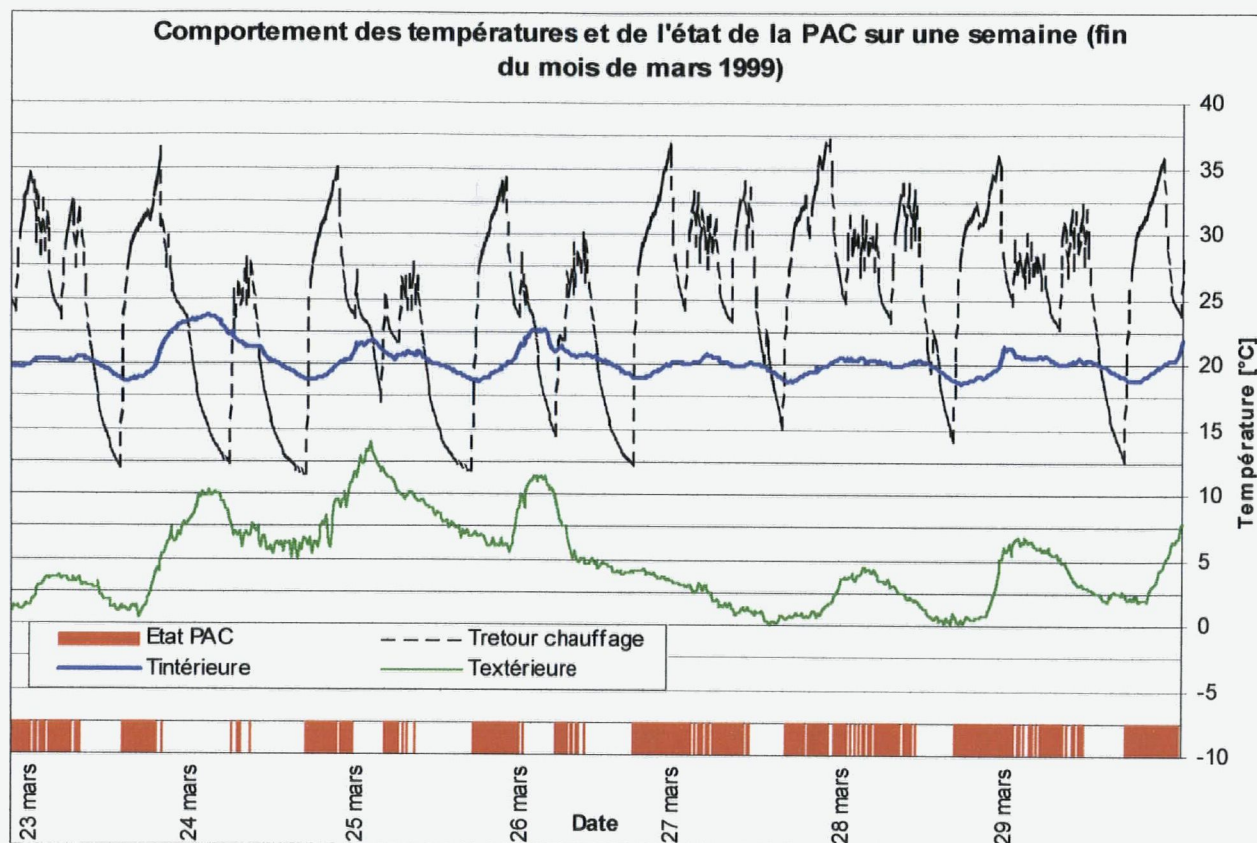


Figure 7 a Comportement des températures et de l'état de la PAC pendant une semaine de mi-saison, avant modification de la régulation.

La semaine prise en considération commence le 23 mars à midi pour se terminer le 30 mars à 11h59.

Cette figure amène les commentaires suivants :

- comparée aux mêmes conditions de fonctionnement que l'année précédente (figure 6b) on remarque que la PAC fonctionne plus longtemps et plus pendant la journée. Cela est probablement dû à la réduction nocturne de la température ambiante (18°C) qui entraîne une baisse de la température pendant la nuit et une demande de chaleur le matin,
- pendant cette semaine on remarque les pics sur la température extérieure dues au soleil. On remarque que les jours avec peu d'heures de fonctionnement de la PAC correspondent aux pics de la température extérieure.

La figure suivante représente le comportement des températures et l'état de fonctionnement de la pompe à chaleur durant une semaine de mi-saison entre le 18 et le 25 avril 1999.

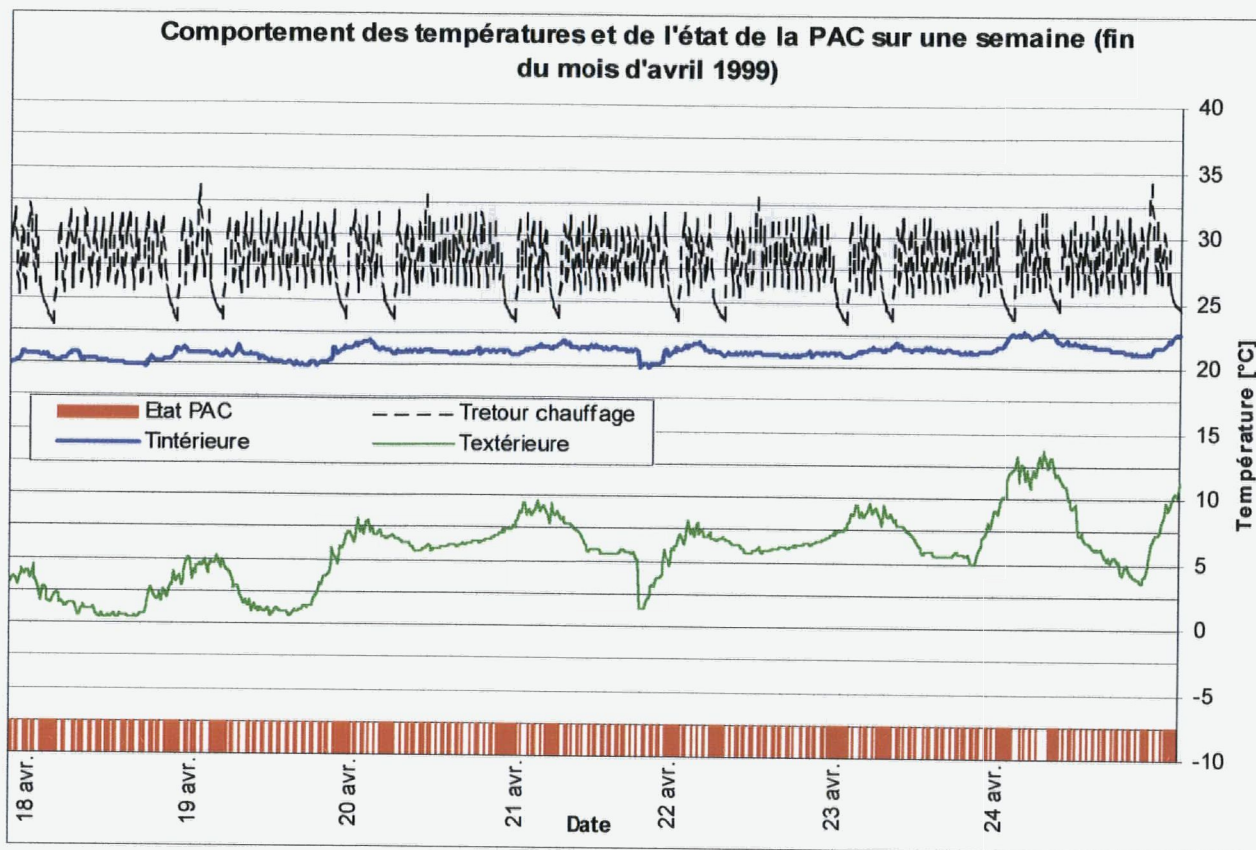


Figure 7 b Comportement des températures et de l'état de la PAC pendant une semaine de mi-saison, après modification de la régulation.

La semaine de mi-saison prise en considération commence le 18 avril à midi pour se terminer le 25 avril 1999 à 11h59.

Cette figure amène les commentaires suivants :

- comparée aux figures avec des conditions de fonctionnement semblables on remarque tout de suite une allure complètement différente des courbes. Cette différence est due à la régulation, en effet à la fin du mois de mars un nouveau système de régulation a été installé. La PAC travaille maintenant seulement en fonction de la température de retour du chauffage,
- une hausse de la température ambiante est observée avec une moyenne d'environ 22°C, cette valeur est fixée par le régulateur et peut être modifiée. Une mise au point de la régulation pourra être effectuée au début de la prochaine saison de chauffage,
- la PAC fonctionne à intervalles réguliers pendant la journée. Une augmentation de l'intervalle enclenchement/déclenchement de la PAC en fonction de la température de retour devrait réduire le nombre d'enclenchement ainsi qu'augmenter le temps de fonctionnement par enclenchement.

Saison 1999/2000

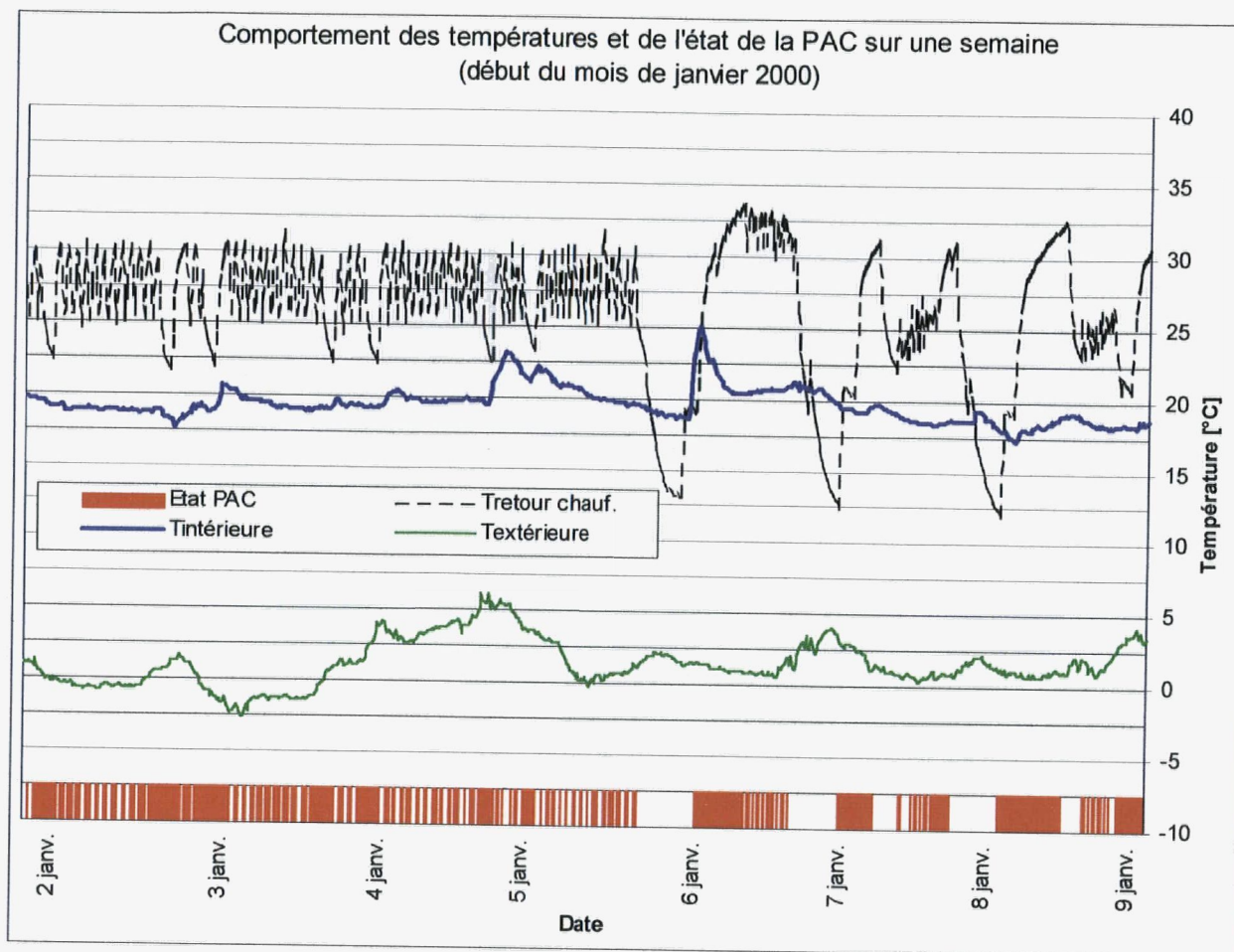


Figure 7 c Comportement des températures et de l'état de la PAC pendant une semaine lors de la modification de la régulation (retour à la première régulation).

La semaine en considération commence le 2 janvier à 16h00 pour terminer le 9 janvier à 16h00.

Cette figure amène le commentaire suivant :

Nous avons testé un type de régulation simplifié. Cette régulation montre un fonctionnement de la PAC très élevé (partie de gauche de la figure 7c). Après 9 mois de fonctionnement avec cette régulation simplifiée, nous sommes revenus à la régulation de base permettant d'obtenir un fonctionnement de l'installation où le nombre d'enclenchement de la PAC est acceptable (partie de droite de la figure 7c).

c) Comportement sur une journée

Saison 1997/1998

La figure suivante représente le comportement des températures et l'état de fonctionnement de la pompe à chaleur durant un jour froid, le 31 janvier 1998.

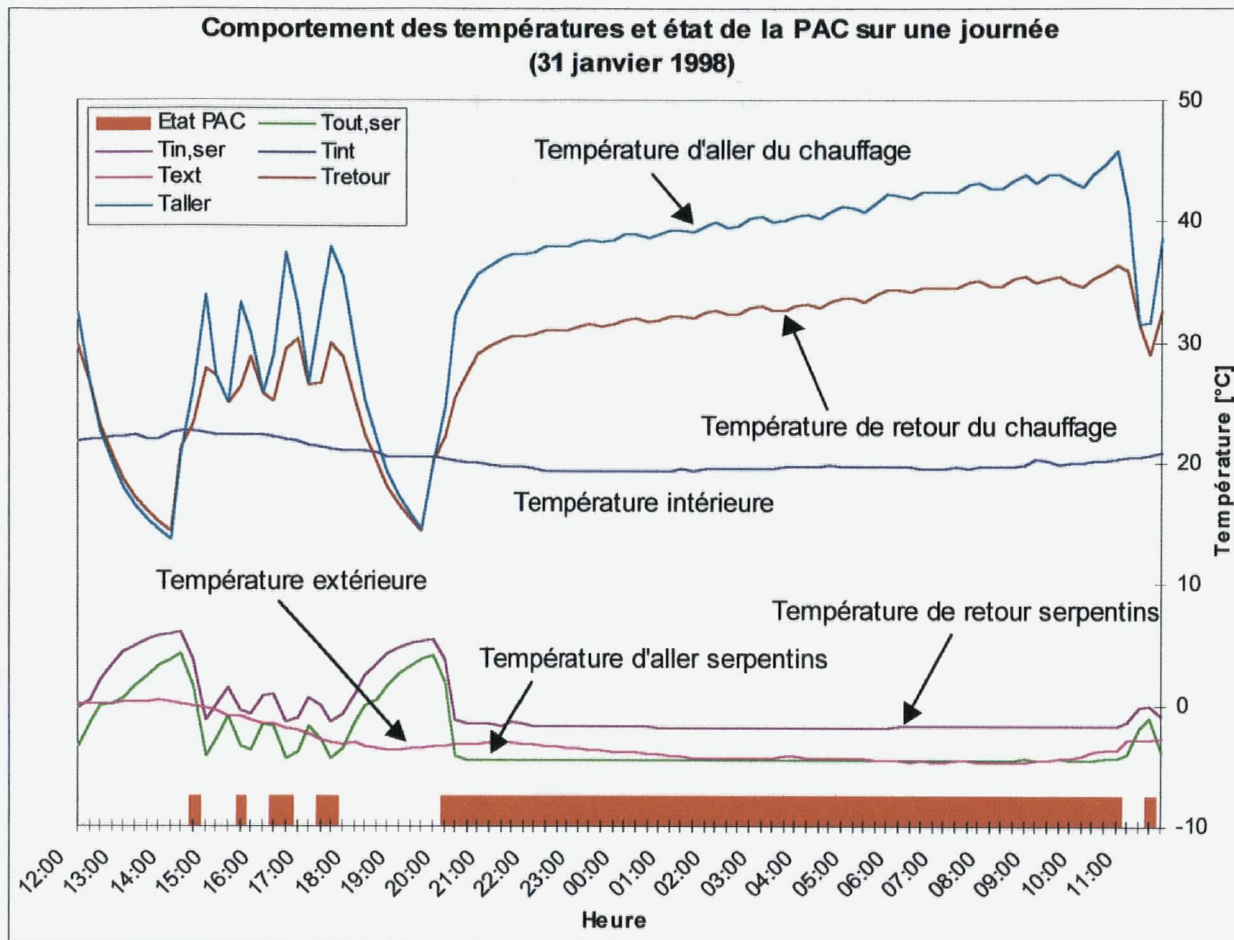


Figure 8 a Comportement des températures et de l'état de la PAC pendant un jour froid

Cette figure amène les commentaires suivants :

- pendant une journée froide on observe que la PAC fonctionne en continu pendant toute la nuit et une bonne partie de la matinée (de 20h à 11h le matin). La machine s'enclenche aussi pendant la journée mais pour des périodes de temps relativement courtes.
- dès l'enclenchement de la PAC, les températures du circuit chauffage montent rapidement à 38°C/30°C. Ensuite, les températures s'élèvent régulièrement jusqu'à 45°C/38°C, dénotant le stockage d'énergie thermique dans les dalles de chauffage de sol.
- pendant le fonctionnement prolongé de la PAC les températures de la source froide restent stables.
- la température d'ambiance durant les 24 heures varie de 3.4°C, en gardant une moyenne supérieure à 20°C.

La figure suivante représente le comportement des températures et l'état de fonctionnement de la pompe à chaleur durant un jour de mi-saison, le 4 avril 1998.

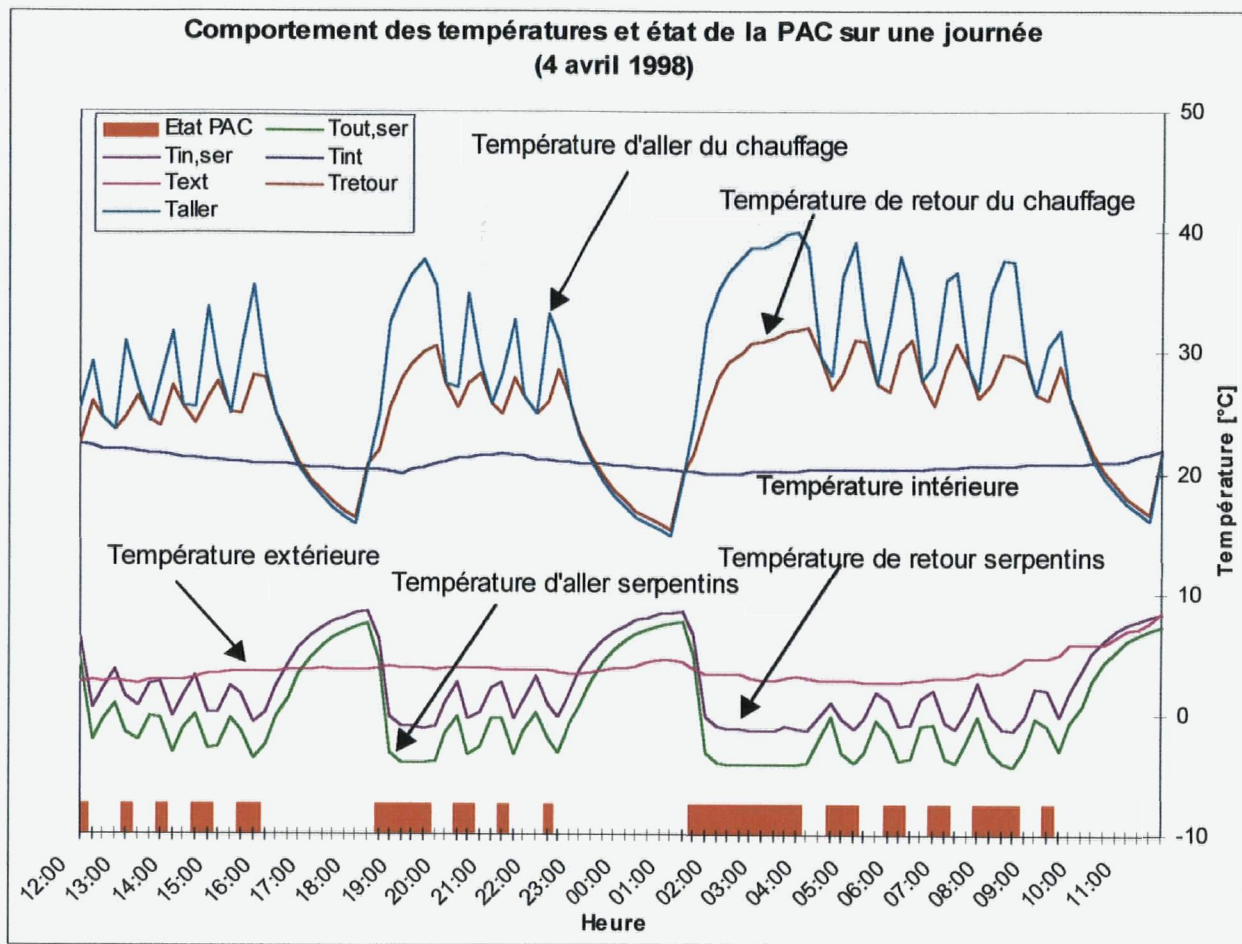


Figure 8 b Comportement des températures et de l'état de la PAC pendant un jour de mi-saison

Cette figure amène les commentaires suivants :

- pendant une journée froide de mi-saison, on observe que la PAC fonctionne de façon intermittente pendant les 24 heures.
- du fait du fonctionnement non continu de la pompe à chaleur, la température d'aller du chauffage n'atteint que 40°C. L'effet d'accumulation est donc nettement plus faible que lors d'un fonctionnement en continu de la PAC.
- la température ambiante moyenne est toujours supérieure à 20°C,

Pour pouvoir travailler à plus basse température ($t_{\text{aller}}=35^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{retour}}=28^{\circ}\text{C}$) et garantir une température ambiante de 20°C, il faudrait augmenter le transfert de chaleur. Pour ce faire il y a qu'une seule possibilité, à savoir la diminution de l'écartement des serpentins du chauffage de sol (écartement de 5 cm au lieu de 25 cm). Cette proposition se révèle techniquement très difficile à réaliser sur cette installation existante mais est tout à fait envisageable pour une installation à réaliser.

Dans les figures 8a et 8b l'on remarque une hausse des températures du circuit serpentin lors de l'arrêt de la PAC. Ceci est normal car le circulateur du circuit source froide s'arrête également et la température mesurée (près de la PAC) s'élève. On n'a pas tenu compte de ces valeurs dans tous les calculs.

Saison 1998/1999

La figure suivante représente le comportement des températures et l'état de fonctionnement de la pompe à chaleur durant un jour de mi-saison, 8 mars 1999.

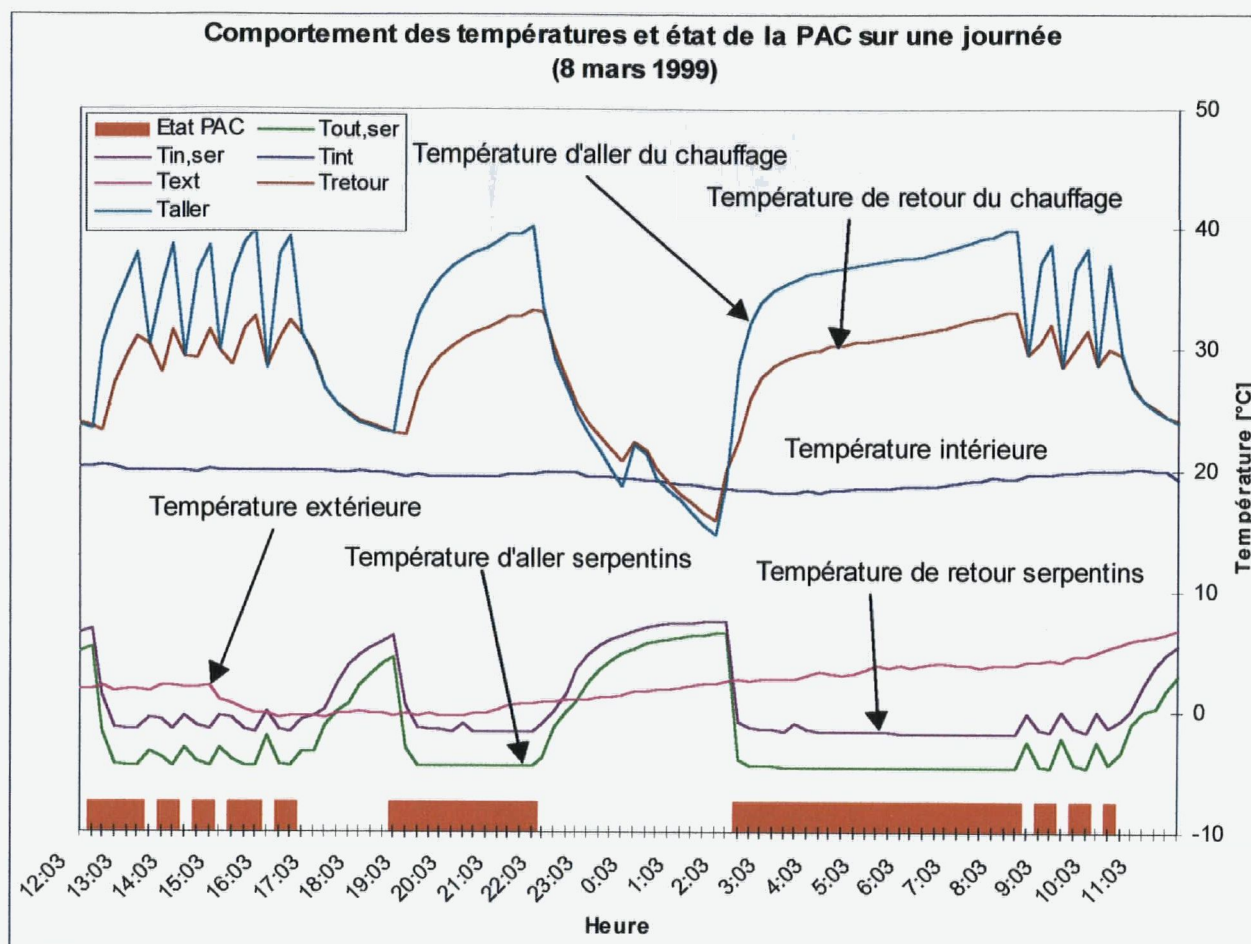


Figure 9 a Comportement des températures et de l'état de la PAC pendant un jour de mi-saison, avant modification de la régulation.

Cette figure amène les commentaires suivants :

- si on la compare à la figure 8b, on constate que le comportement est identique. La différence réside dans le nombre d'heures de fonctionnement. En effet la PAC fonctionne plus longtemps le 8 mars 1999 (figure 9a) que le 4 avril 1998 (figure 8b) du fait d'une température extérieure plus faible et d'une température ambiante inférieure à 20°C.

La figure suivante représente le comportement des températures et l'état de fonctionnement de la pompe à chaleur durant un jour de mi-saison, 19 avril 1999.

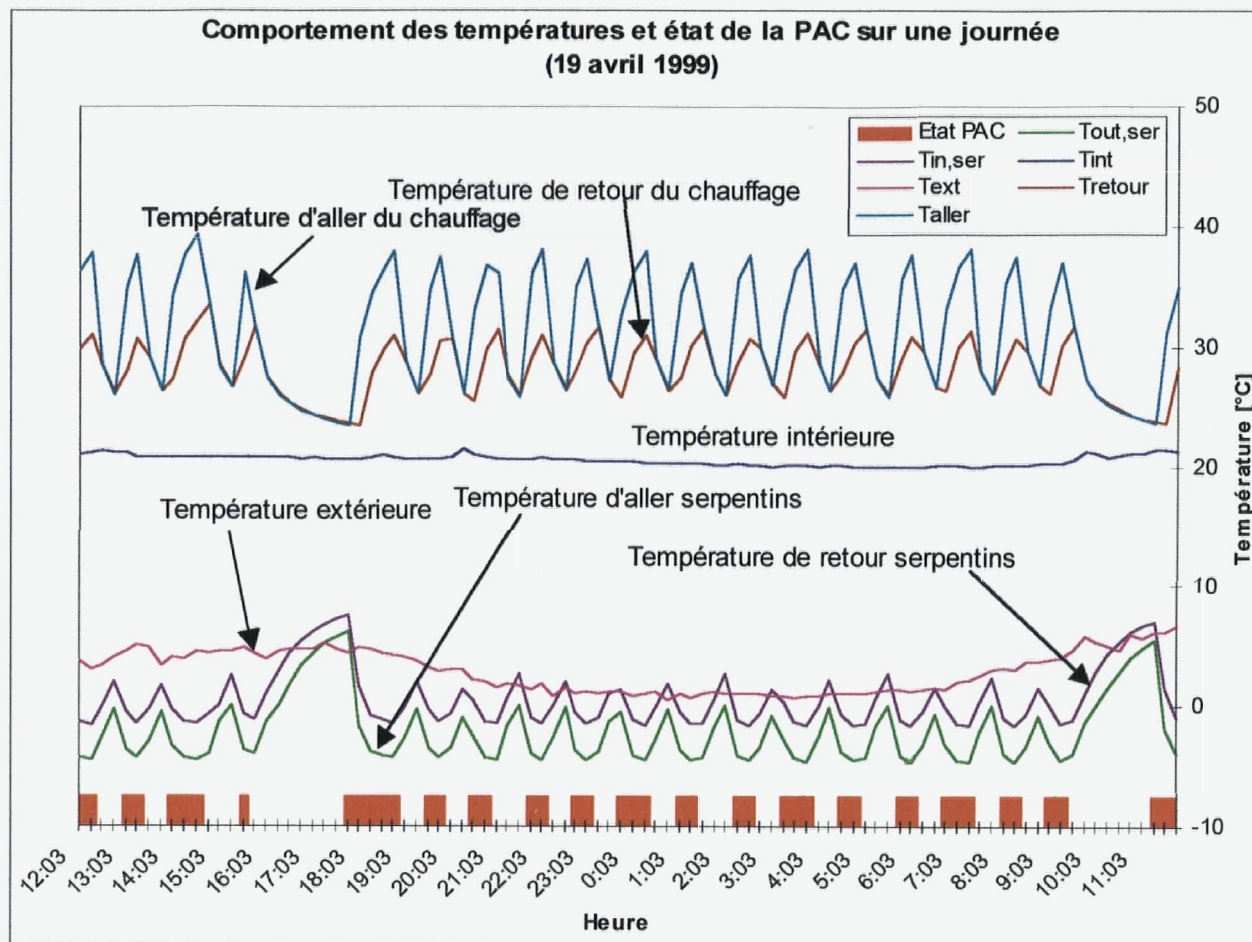


Figure 9 b Comportement des températures et de l'état de la PAC pendant un jour de mi-saison, après modification de la régulation.

Cette figure amène les commentaires suivants :

- de même que le 4 avril 1998 (figure 8b) la PAC fonctionne en continu à l'exception des coupures de courant des FMB (entre 16 et 18 heures, et entre 10h et 11h30). Pour limiter cet effet, comme dit précédemment, il faudra augmenter l'intervalle enclenchement/déclenchement sur la température de retour du chauffage,
- la température ambiante reste stable à 20°C.

Saison 1999/2000

Pour cette saison, le fonctionnement de la PAC est identique à celui durant la saison 1997/1998. Autant pour le début de saison que pour la mi-saison.

7.4 Performance de l'installation pompe à chaleur

La figure suivante représente l'évolution du coefficient de performance annuel (COPA selon définition de la publication RAVEL « Pompes à chaleur » et de la puissance de la pompe à chaleur durant la période de chauffage entre 23 janvier et le 5 mai 1998, entre le 23 février et le 2 mai 1999 et entre le 24 décembre 1999 et le 2 avril 2000.

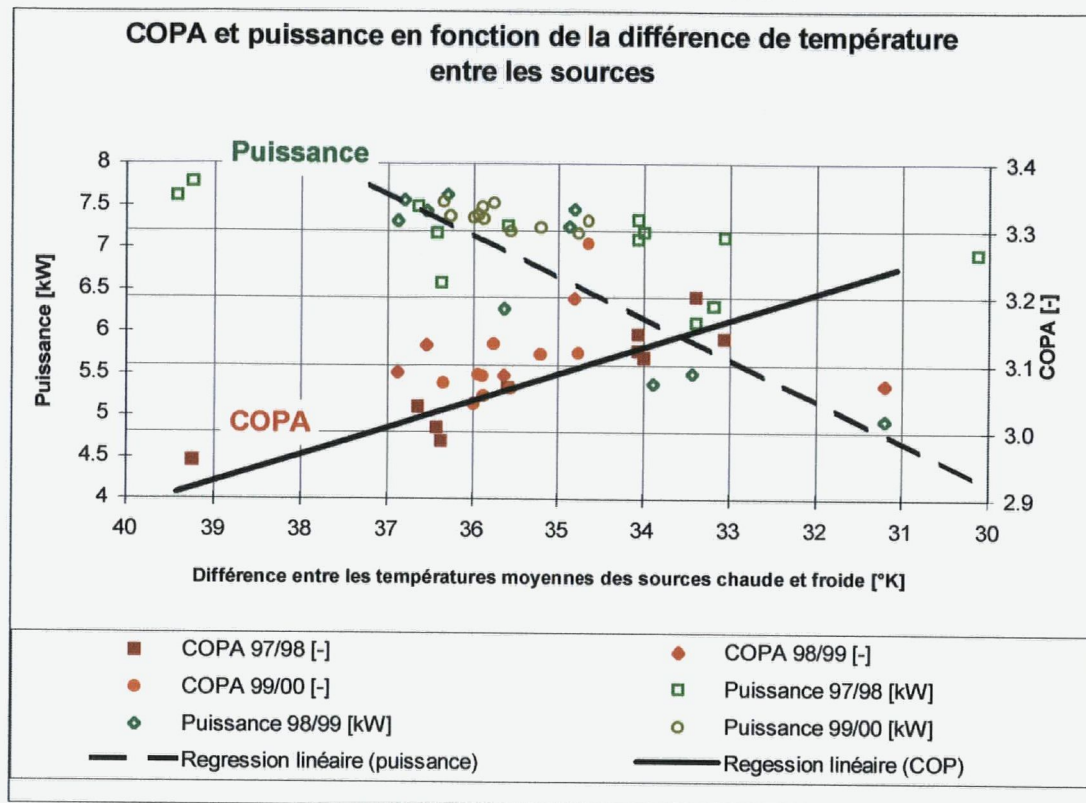


Figure 10 COPA et puissance en fonction de la différence de température entre les sources

Conformément à la définition, le COPA tient compte de la consommation du circulateur du registre terrestre. Ceci n'est pas le cas des résultats dans le « Bulletin d'information du Centre de test des pompes à chaleur à Winterthour-Töss (WPZ) ». Dans notre cas, le COP comparable à celui mené à Töss est de 3,4 (la puissance de la pompe de circulation dans le registre terrestre est de 245W). Ce résultat doit être comparé à celui des PAC mesurées à Töss en 1996, année de réalisation de l'installation, à savoir entre 3 et 4. L'installation de la villa Mages est donc tout à fait dans la moyenne de l'époque.

Saison 1997/1998

Cette figure appelle les commentaires suivants :

- les droites représentées sur le graphique (régressions linéaires pour la saison 1997/1998) regroupent deux séries de points de mesure, on observe que les valeurs du coefficient de performance et de la puissance sont alignés autour de ces droites. Cela montre bien que le COP est inversement proportionnel à la différence de température entre les sources et que la puissance est directement proportionnelle à cette différence de température.
- la valeur théorique du coefficient de performance fourni par le fabricant est de 3.1 (pour des températures moyennes des sources de 0°C et 35°C). Le calcul du COP fait à partir de la facture détaillée des FMB et des mesures de consommation du chauffage nous donne une valeur d'environ 2.96,
- la puissance théorique de la pompe à chaleur déclarée par le fabricant est de 7.8 kW. Dans cette figure on remarque que la puissance mesurée atteint une valeur maximale de 7.8 kW.

Saison 1998/1999

- On observe que les mesures du COP pour la deuxième saison sont tout à fait cohérentes avec celles de la saison précédente. On remarque une légère dispersion des points qui sont relativement peu nombreux. Le calcul du COP fait à partir de la facture détaillée des FMB et des mesures de consommation du chauffage nous donne une valeur d'environ 3.03,

Ce graphique confirme la cohérence des mesures.

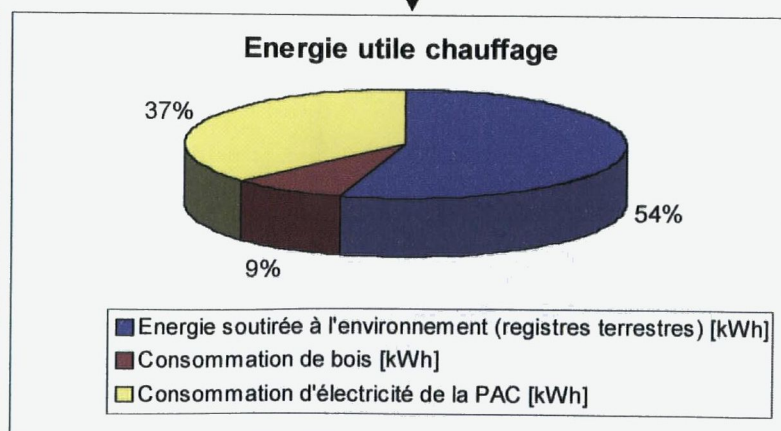
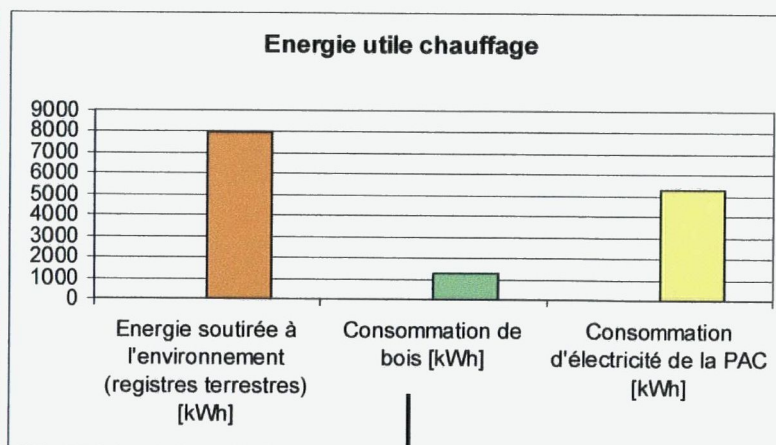
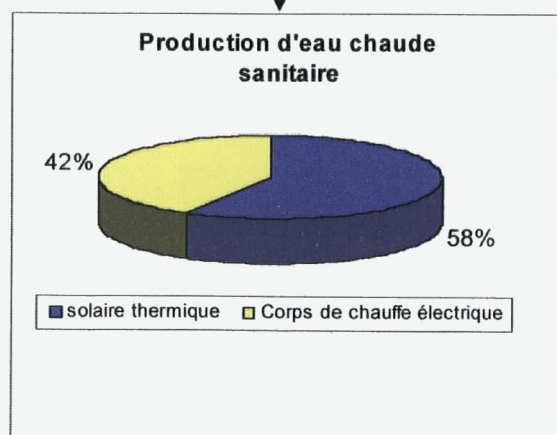
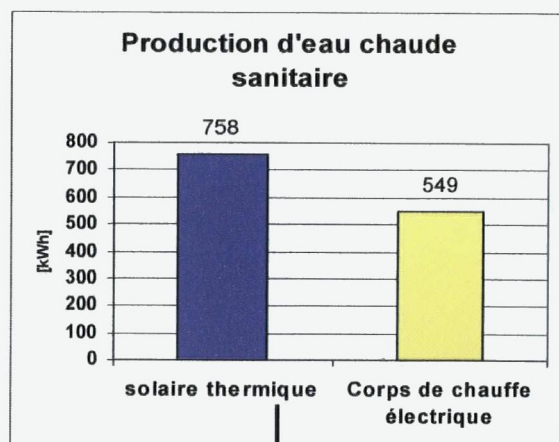
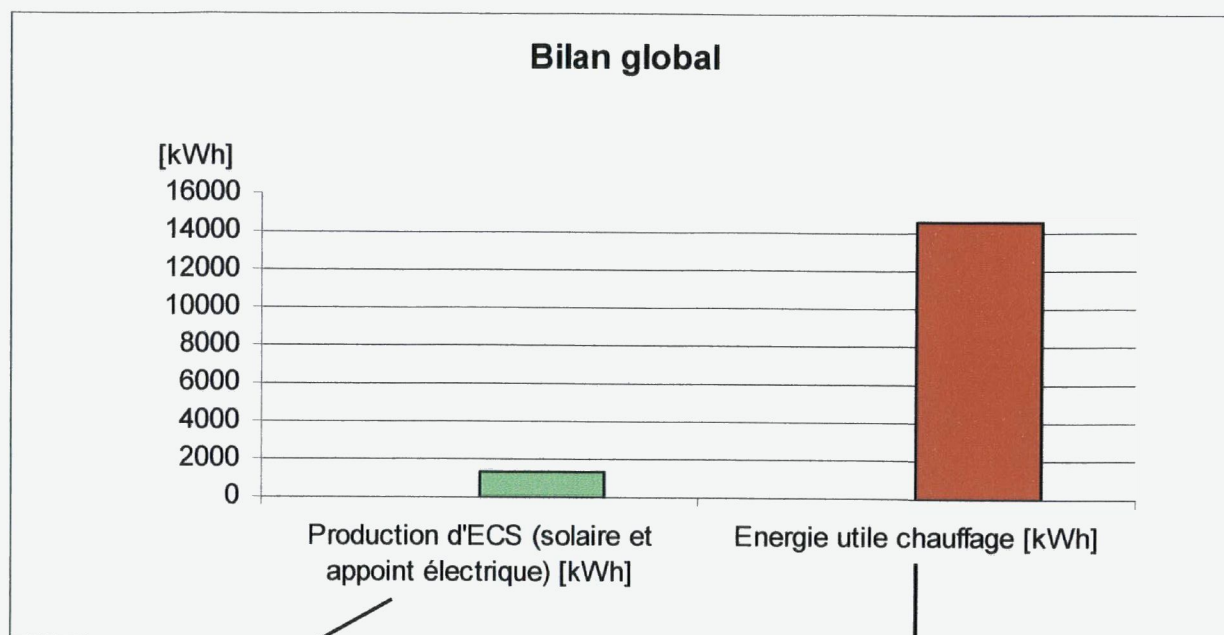
Saison 1999/2000

- On observe que les mesures du COP pour la troisième saison sont tout à fait cohérentes avec celles de la saison précédente. On remarque une légère dispersion des points qui sont relativement peu nombreux. Le calcul du COP fait à partir de la facture détaillée des FMB et des mesures de consommation du chauffage nous donne une valeur d'environ 3.19,

Le graphique de la page précédente confirme la cohérence des mesures.

8. BILAN GLOBAL

Les mesures effectuées durant 3 saisons de chauffage sur la PAC ainsi que celles effectuées sur les panneaux solaires nous permettent de définir le bilan global de la maison.



Ces résultats nous permettent de comparer les valeurs de la demande d'énergie de chauffage ainsi que de la demande d'énergie nécessaire à la production d'eau chaude sanitaire (ECS) pour les valeurs cibles, calculées et réelles.

Comparatifs des demandes d'énergie			
	Valeurs cibles (Recommandation SIA 380/1)	Valeurs calculées (logiciel Lesosai)	Valeurs réelles (mesurées) saison 99/00
Demande d'énergie de chauffage	280	272	258
Demande d'énergie à la production d'ECS	60	79	20.5

Ces valeurs sont en **MJ/m² an**

Remarques :

Nous pouvons remarquer que les valeurs mesurées sont bien en dessous des valeurs calculées.

Cela peut s'expliquer par les faits suivants :

- niveau de température intérieure bas (< 20°C dans certaines parties peu utilisées de la maison en plein hiver)
- utilisation rationnelle de l'eau chaude sanitaire.

D'une manière générale, nous pouvons dire que la famille Mages vit d'une façon très économique au niveau consommation d'énergie.

9. CONCLUSIONS

L'installation d'une pompe à chaleur avec une régulation simplifiée nous montre les éléments suivants :

1. La régulation simplifiée est économiquement intéressante,
2. La régulation simplifiée sans accumulateur de chaleur n'abaisse pas le coefficient de performance de la PAC (par rapport à une régulation normale), ni sa fiabilité.
3. Les niveaux de température sont pratiquement similaires avec les deux types de régulation,
4. La température intérieure est moins stable avec la régulation simplifiée et le nombre d'enclenchement de la PAC n'est pas acceptable (vieillesse trop rapide de la PAC) dû au mauvais comportement auto-régulant du chauffage au sol. Cela est dû à l'espacement trop grand des serpentins dans la dalle.
5. Le système de capteurs solaires couvre le 58% de la production d'eau chaude sanitaire,
6. La consommation globale de l'habitation est faible pour ce type de bâtiment.

Signatures :

M.Kernen

M. Chapatte

PLANAIR ; PR, MK, EG, MC ; La Sagne, juin 2001