

DIS Projekt- Nr.: 33846
DIS Vertrags- Nr.: 74140

Programm
Geothermie

Pieux énergétiques avec distribution de chaleur et de froid intégrée dans la structure

Centre Scolaire Vers-l'Eglise / Fully

rédigé par
Michel Bonvin, Patrice Cordonier
Haute école valaisanne (HEVs)
Rte du Rawyl 47, 1950 Sion

par ordre de
Office fédéral de l'énergie

1. Tables des matières et des figures

1. TABLES DES MATIERES ET DES FIGURES.....	1
2. INTRODUCTION	3
3. SITUATION ET DESCRIPTION.....	3
a) Bâtiment	3
b) Pieux énergétiques.....	4
4. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT ET MESURES.....	5
a) Grandeurs mesurées.....	5
b) Grandeurs calculées.....	6
I. Situation hivernale	7
II. Situation estivale	7
5. ANALYSE DE MESURES	8
a) Les températures.....	8
b) Energies	9
I. Source froide.....	9
II. Répartition des diverses énergies, diagramme des flux	9
• Saison hivernale	9
• Saison estivale.....	10
III. Coefficient de performance des pompes à chaleur	11
c) Heure de fonctionnement, nombre d'enclenchements des compresseurs	11
6. CONCLUSIONS.....	12
7. ANNEXES.....	13
a) Résultats janvier 2001	
b) Résultats février 2001.....	
c) Résultats mars 2001.....	
d) Résultats avril 2001	
e) Résultats mai 2001.....	
f) Résultats juin 2001	
g) Résultats juillet 2001	
h) Résultats août 2001.....	
i) Résultats septembre 2001	
Figure 1: Prise de vue du bâtiment	3
Figure 2: Détail raccordement des pieux énergétiques: extrait plan TECNOSERVICE ENGINEERING SA à Martigny	4
Figure 3: Schéma simplifié de l'installation et des points de mesure	5
Graphique 1: Diagramme des flux, situation hivernale	7
Graphique 2: Diagramme de flux, situation estivale	7
Graphique 3: Evolution des températures intérieures et extérieures	8
Graphique 4: Charge / décharge du terrain	9
Graphique 5: Diagramme de Sankey saison d'hiver 2001	10
Graphique 6: Diagramme de Sankey saison d'été 2001	10
Graphique 7: COP, COP A moyenné sur 1 semaine pour le mois de février 2001	11
Graphique 8: Nombre d'heures de fonctionnement par jour des compresseurs	11
Graphique 9: Nombre d'enclenchement moyen par jour des compresseurs	12

2. Introduction

L'école primaire « Vers l'église » de Fully, construite au courant de l'année 2000 et mise en service depuis janvier 2001, a accueilli ses premiers élèves en septembre 2001. Ce rapport intermédiaire va donc relever les premières tendances observées durant cette première année d'exploitation.

3. Situation et description

a) Bâtiment

En raison de la nature du terrain, le bâtiment repose sur 118 pieux battus dont 41 pieux ont été équipés de sondes géothermiques double U

Ces pieux, **agissant comme échangeurs thermiques avec le sous-sol**, sont du type «évidés centrifugés» et équipés de sondes géothermiques avec remplissage de sable humide.

Les données du bâtiment sont les suivantes :

- Surface de référence énergétique	: 2'635 m ²
- Volume chauffé net	: 7'018 m ³
- Demande d'énergie de chauffage	: 126 MJ / m ² .an (92'225 Kwh/an)
- Puissance de chauffe	: 60 Kw
- Energie de rafraîchissement (recharge pieux énergétiques)	: ~ 50'000 Kwh/an
- Ventilation douce contrôlée avec récupérateur à plaques et petit puits canadien	: 4'000 m ³ / h

La volonté de construire un **bâtiment du type MINERGIE** a orienté la recherche du principe de production de chaleur vers un système de pompe à chaleur : en présence de façades largement vitrées, malgré une bonne isolation de l'enveloppe, l'application du standard MINERGIE ne pouvait être atteinte avec une production de chaleur conventionnelle.



Figure 1: Prise de vue du bâtiment

4. Principe de fonctionnement et mesures

Le chauffage est assuré par 4 pompes à chaleur en cascade avec commande et régulation intégrée. Ces modules s'enclenchent et se déclenchent en fonction d'une consigne dépendant de la température extérieure et de la température de retour du circuit primaire. Dans les salles de classe, le chauffage et le rafraîchissement s'effectuent par rayonnement du plafond (dalles actives). Ils sont complétés par une ventilation douce avec récupération de chaleur. La source froide des pompes à chaleur est composée de 41 pieux énergétiques sur lesquels repose le bâtiment. La production de froid est réalisée par simple échange sur la source froide et remplit presque gratuitement les fonctions de rafraîchissement et de recharge des pieux (à l'exception de l'énergie de pompage). La figure suivante présente le fonctionnement de l'installation.

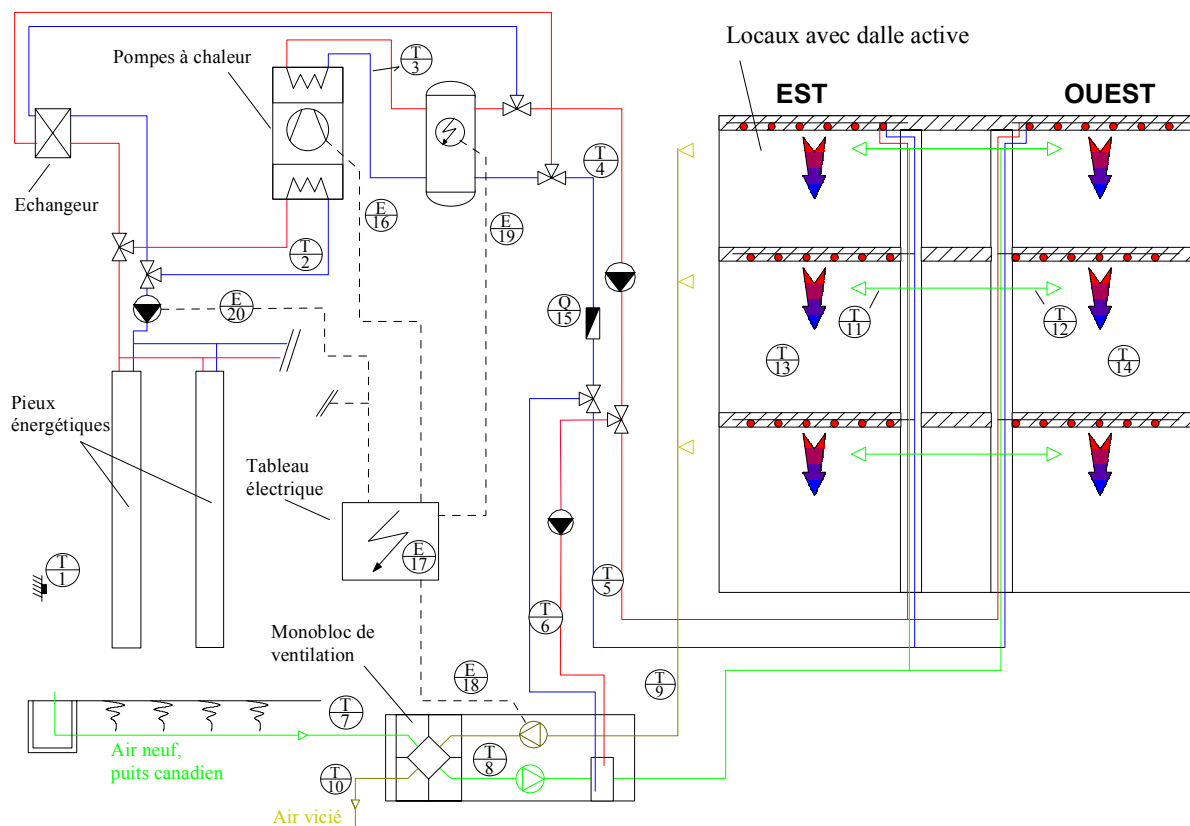


Figure 3: Schéma simplifié de l'installation et des points de mesure

a) Grandeurs mesurées

Le tableau suivant présente les différentes grandeurs mesurées selon la figure 3 :

N°	Description	Abréviation
1	Température extérieure	T_{ext}
2	Température aller/retour source froide (plongeur)	T_{sf}
3	Température aller/retour primaire bac tampon (plongeur)	T_{pch}
4	Température aller/retour secondaire bac tampon (plongeur)	T_{chf}
5	Température aller/retour groupe très basse temp. (plongeur)	T_{sta}
6	Température aller/retour groupe ventilation (plongeur)	T_{ven}

7	Température air frais avant récupération (sonde de gaine)	$T_{av.rec}$
8	Température air frais après récupération (sonde de gaine)	$T_{ap.rec}$
9	Température air extrait (sonde de gaine)	$T_{air.extr}$
10	Température air évacué (sonde de gaine)	$T_{air.évac}$
11	Température de pulsion aile EST (sonde de gaine)	$T_{puls.est}$
12	Température de pulsion aile OUEST (sonde de gaine)	$T_{puls.ouest}$
13	Température ambiante aile EST (sonde sans réglage)	$T_{amb.est}$
14	Température ambiante aile OUEST (sonde sans réglage)	$T_{amb.ouest}$
15	Energie de chauffage ou de rafraîchissement (compteur de chaleur avec sondes de températures)	$Q_{chauffage} / Q_{rafraîchissement}$
16	Energie de compression (compteur d'énergie électrique)	E_{compr}
17	Energie totale tableau électrique (compteur d'énergie électrique)	E_{tot}
18	Energie des ventilateurs (compteur d'énergie électrique)	E_{ventil}
19	Energie des corps de chauffe (compteur d'énergie électrique)	E_{corps}
20	Energie auxiliaire PAC (compteur d'énergie électrique)	$E_{aux.pac}$

Tableau 1: Liste des mesures effectuées sur l'installation

L'installation est munie d'un interrupteur hiver/été pour permettre l'enclenchement et le déclenchement de la production de chaleur. De plus, le nombre d'heures de fonctionnement et le nombre d'enclenchements des compresseurs sont relevés séparément. Si besoin est, afin de compléter la demande d'énergie de chauffage, un appoint électrique est monté sur un vase tampon d'une contenance de 700 litres. (compteur électrique séparé n° 19). L'énergie auxiliaire PAC (n° 20) représente principalement l'énergie nécessaire au pompage du circuit primaire.

b) Grandeurs calculées

D'autres valeurs ont été déterminées à partir des mesures existantes selon les relations suivantes :

L'énergie auxiliaire totale (pompes chauffage, régulations, ...) :

$$E_{aux.tot} = E_{tot} - E_{ventil} - E_{corps} - E_{compr} - E_{aux.pac} \quad (a)$$

L'énergie extraite du sol (hiver):

$$Q_{sol-} = Q_{chauffage} - E_{compr} - E_{corps} - E_{aux.pac} \quad (b_1)$$

L'énergie fournie au sol (été) :

$$Q_{sol+} = Q_{rafraîchissement} + E_{aux.pac} \quad (b_2)$$

L'indice de performance ponctuel des pompes à chaleur:

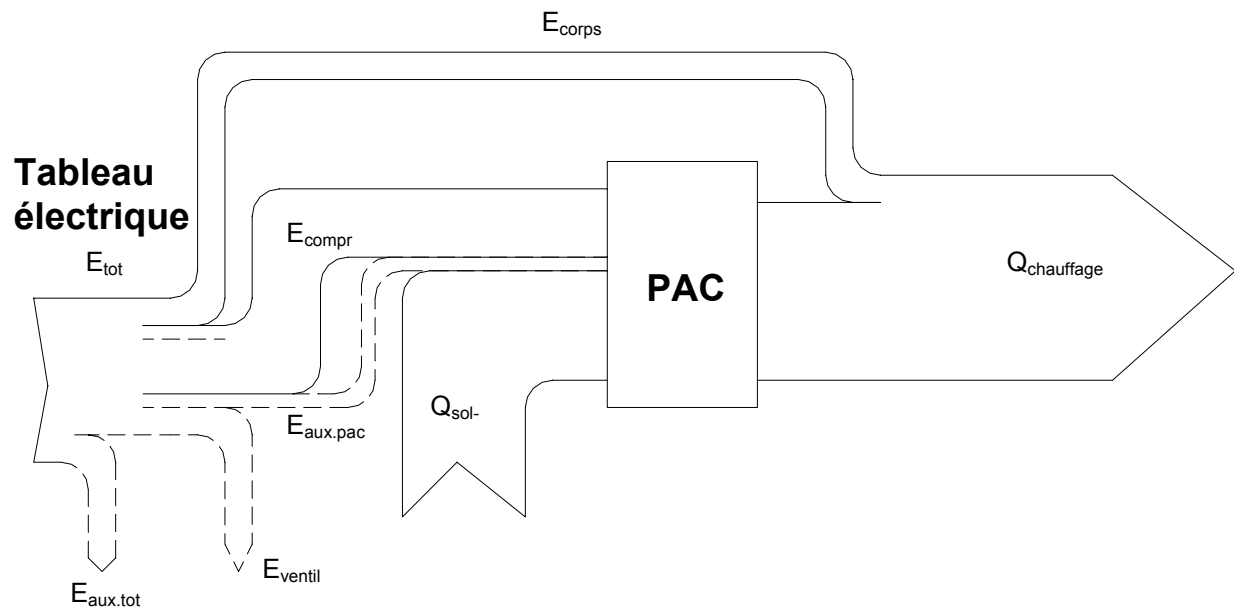
$$COP = \frac{Q_{chauffage} - E_{corps}}{E_{compr}} \quad (c)$$

L'indice de performance des pompes à chaleur tenant compte de l'énergie auxiliaire des PAC:

$$COP A = \frac{Q_{chauffage} - E_{corps}}{E_{compr} + E_{aux.pac}} \quad (d)$$

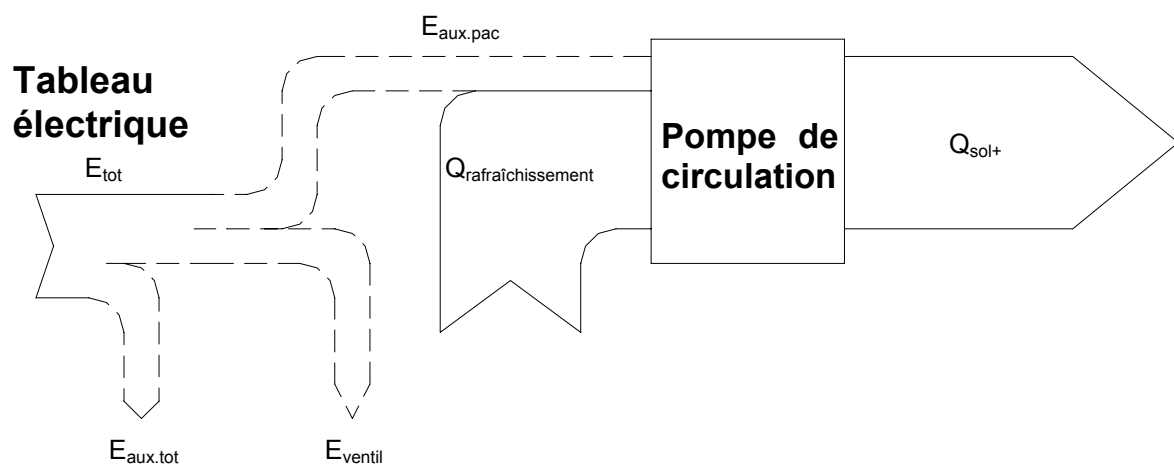
Le diagramme de flux ci dessous récapitule la situation :

I. Situation hivernale



Graphique 1 : Diagramme des flux, situation hivernale

II. Situation estivale

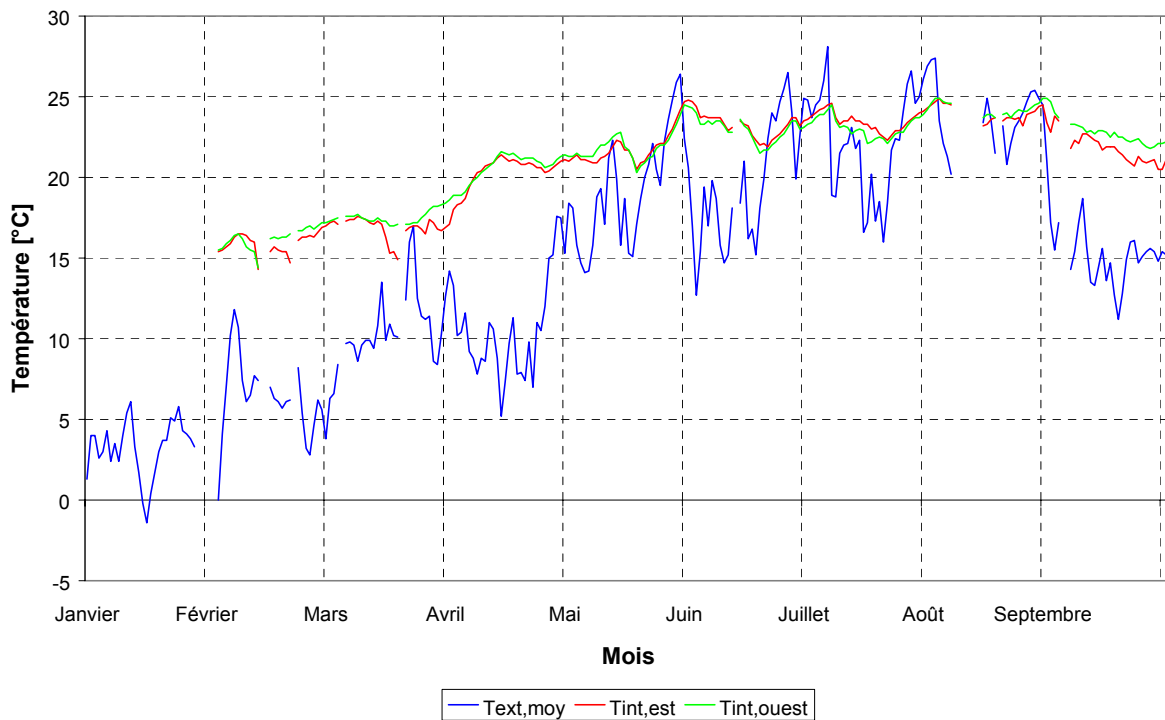


Graphique 2: Diagramme de flux, situation estivale

5. Analyse de mesures

a) Les températures

Le graphique 3 montre l'évolution des températures intérieures (est & ouest) et extérieure.



Graphique 3: Evolution des températures intérieures et extérieures

Sur le graphique 3, nous pouvons remarquer que les températures intérieures de février à avril (période de chauffage) sont assez faibles (de l'ordre de 16°C). Ceci s'explique par le fait qu'à cette période, le bâtiment était encore en construction. Seulement trois modules PAC sur quatre fonctionnaient afin de ne pas épuiser la source froide. Pour les mêmes raisons, l'appoint électrique a également contribué à chauffer le bâtiment durant la construction, ce qui sera en principe évité dans le futur lors de l'utilisation normale de l'école. L'importante masse du bâtiment agit en faveur d'une bonne stabilité de la température intérieure.

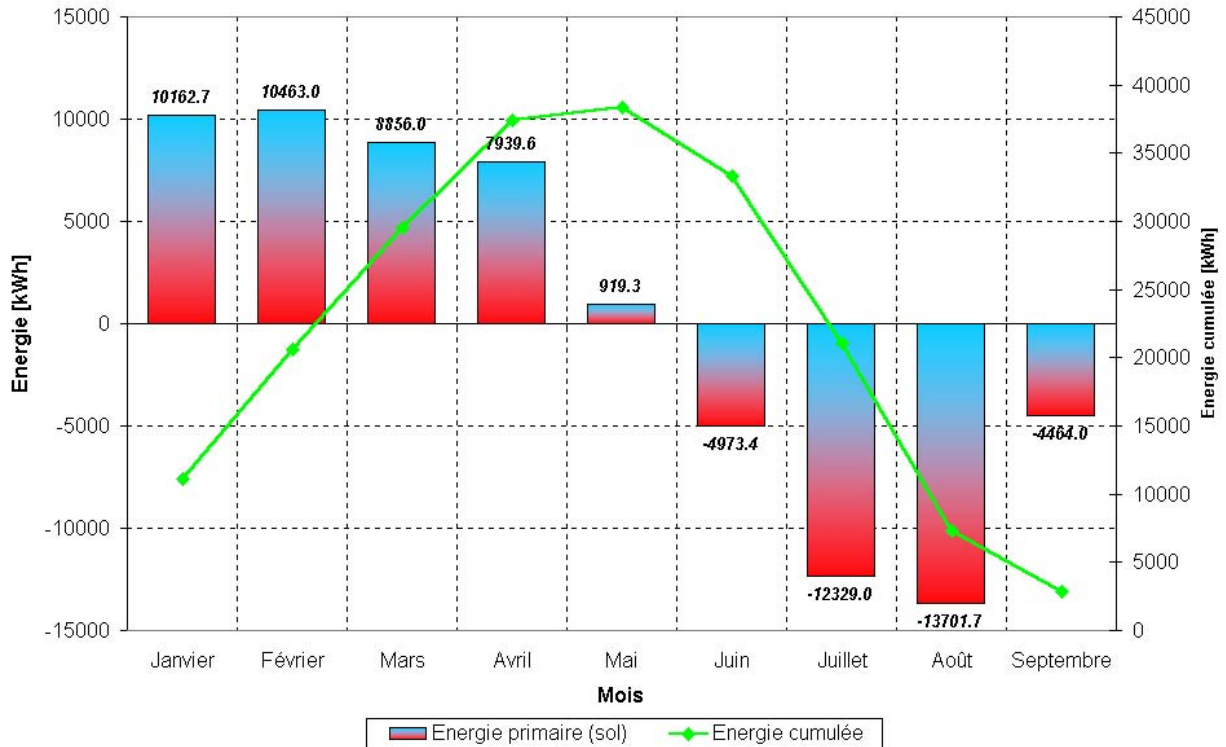
Pour la période d'été (juin à septembre), la température intérieure ne dépasse pas les 25 °C. Le scénario de refroidissement mis en place a donc permis de maintenir un confort acceptable tout en rechargeant la source froide pour l'hiver. (Les « trous » dans le graphique 3 sont dus à des pannes du modem.)

Les mesures de l'hiver prochain (2001-2002), dans un bâtiment normalement occupé par des classes vont permettre de quantifier l'apport des pieux énergétiques.

b) Energies

I. Source froide

Le graphique 4 met en évidence la charge et la décharge du terrain par l'intermédiaire des pieux. Les valeurs positives représentent l'énergie mensuelle extraite du sol, les valeurs négatives sont celles introduites dans le terrain (rafraîchissement du bâtiment).



Graphique 4: Charge / décharge du terrain

Il en ressort que le stockage estival couvre une partie appréciable de la demande hivernale.

II. Répartition des diverses énergies, diagramme des flux

Afin de mettre en évidence les divers flux d'énergie, les deux saisons mesurées ont été distinguées.

- SAISON HIVERNALE

Le diagramme ci dessous (graphique 5) présente le bilan énergétique de la première (1/2) saison hivernale d'exploitation (janvier à mai 2001).

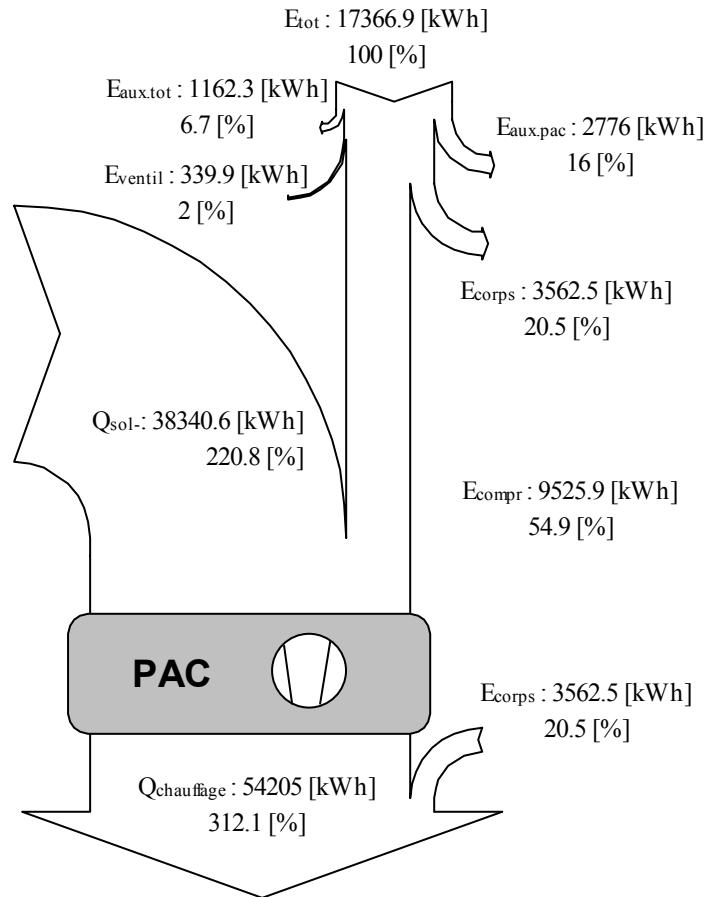
Nous pouvons donc remarquer que la ventilation n'a quasiment pas fonctionné de tout l'hiver. L'énergie servant à actionner la ventilation (E_{ventil}) ne représente que le 2% de l'énergie totale fournie par le tableau électrique (E_{tot}).

De plus, afin de ne pas épuiser la source froide pendant la construction (en phase d'assèchement du bâtiment), les corps de chauffe ont été activés, représentant ainsi le 20% de l'énergie totale.

Finalement, le COP A global de la saison se calcule ainsi : (selon relation d)

$$COP A = \frac{54205 - 3562.5}{9525.9 + 2776} = 4.1$$

Le détail de ce coefficient sera présenté dans la partie III de ce chapitre.



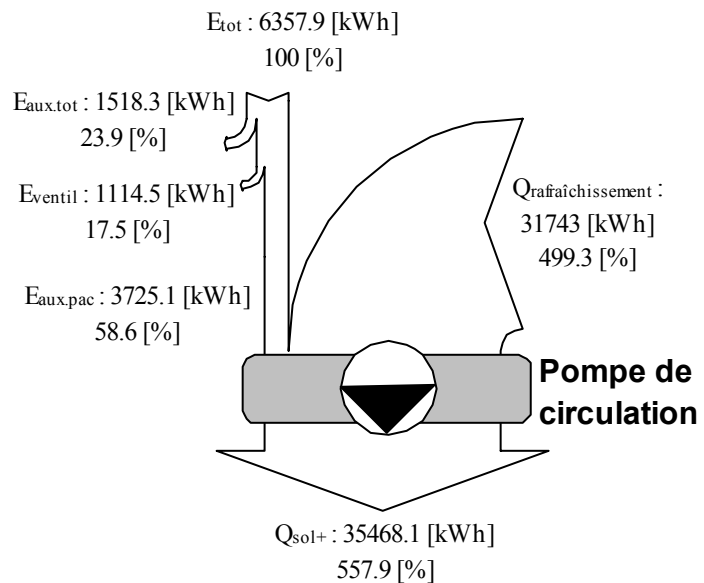
Graphique 5: Diagramme de Sankey saison d'hiver 2001

- SAISON ESTIVALE

Un diagramme de même nature que le précédent est présenté ci dessous.

Nous pouvons ici remarquer que plus du 50% de l'énergie totale (tableau électrique) est utilisée pour actionner la pompe du circuit primaire (sondes géothermique).

Finalement, l'énergie réinjectée dans le terrain représente 5 fois plus que celle consommée électriquement. On peut ainsi juger de l'efficacité du système de rafraîchissement proposé.



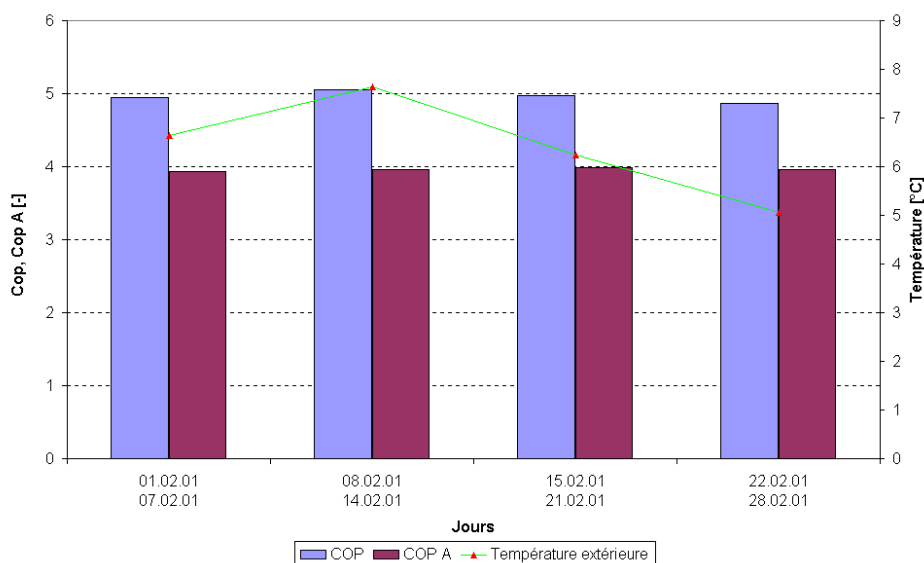
Graphique 6: Diagramme de Sankey saison d'été 2001

III. Coefficient de performance des pompes à chaleur

Soucieux d'obtenir des valeurs représentatives de COP et COP A (selon relation (c) & (d)), le calcul s'est effectué par semaine. Les valeurs du mois de janvier 2001 ne reflètent pas la réalité car l'installation a subi passablement de réglages (mise en service). Le mois de mai également ne représente pas le fonctionnement réel de part sa faible demande d'énergie de chauffage (mois d'entre saison).

Pour les autres mois, soit février, mars et avril, le COP et le COP A calculés demeurent constant et montrent le bon fonctionnement des pompes à chaleur.

Les détails des mesures se trouvent en annexe. Seul celles du mois de février sont présentées et discutées ici.

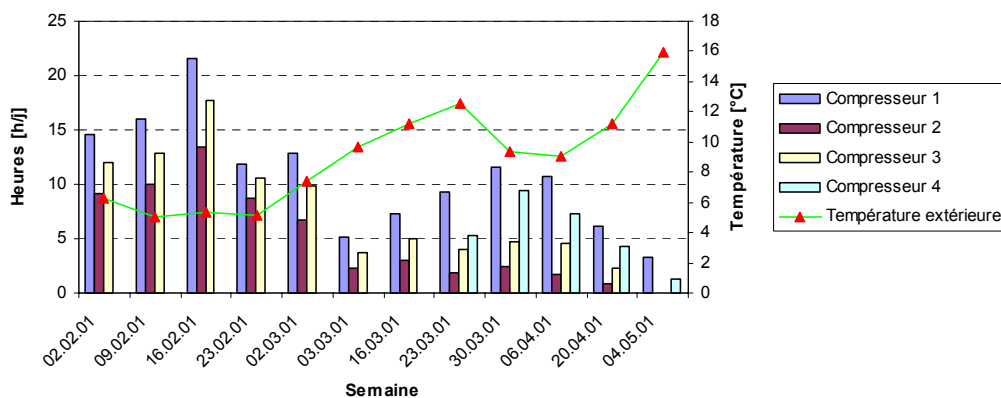


Graphique 7: COP, COP A moyenné sur 1 semaine pour le mois de février 2001

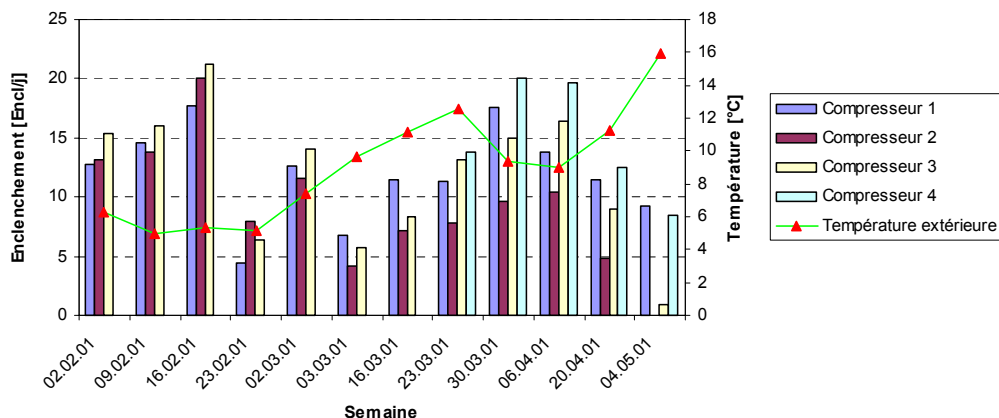
Le graphique 7 met clairement en évidence la constance des deux coefficients de performances. Sans prendre en considération les dépenses auxiliaires d'énergie (pompage), le COP est voisin de 5. Compte tenu de ces consommations (COP A), il se situe autour de 4. Des valeurs tout à fait semblables sont obtenues pour les mois de mars et avril.

c) Heure de fonctionnement, nombre d'enclenchements des compresseurs

Le nombre d'heure de fonctionnement et le nombre d'enclenchement des compresseurs sont mémorisés par des compteurs séparés. Ils ont été relevés hebdomadairement par le responsable technique de l'école.



Graphique 8: Nombre d'heures de fonctionnement par jour des compresseurs



Graphique 9 : Nombre d'enclenchement moyen par jour des compresseurs

Les graphiques 8 et 9 donnent une indication relative au fonctionnement des 4 compresseurs des pompes à chaleur. Le dernier module a été mis en service seulement vers fin mars (afin d'éviter l'épuisement prématuré de la source froide pendant la construction). Nous pouvons remarquer que durant les semaines froides, les compresseurs ont quasiment fonctionné en continu, ce qui est particulièrement favorable à la durée de vie d'un compresseur (moins d'enclenchements et de déclenchements).

6. Conclusions

Les premières mesures effectuées durant l'année 2001 ne permettent pas encore de tirer des conclusions très réalistes, particulièrement pour la saison froide en raison d'une part que le bâtiment était inhabité ou même partiellement en phase de construction. Cependant, quelques tendances s'y dégagent. L'installation en place présente des coefficients de performance de l'ordre de 5 (sans comptabilisation des énergies auxiliaires) et de 4 tout compris. Le fonctionnement estival permet de recharger une bonne partie de la source froide tout en maintenant un confort intérieur remarquable. L'inertie thermique du bâtiment favorise également le bon maintien des consignes de température. Finalement, la fréquence d'enclenchements / déclenchements des compresseurs est faible, ce qui favorise grandement leur durée de vie.

Sion, le 16.11.01

Michel Bonvin

Patrice Cordonier

7. Annexes

- a) Résultats janvier 2001**
- b) Résultats février 2001**
- c) Résultats mars 2001**
- d) Résultats avril 2001**
- e) Résultats mai 2001**
- f) Résultats juin 2001**
- g) Résultats juillet 2001**
- h) Résultats août 2001**
- i) Résultats septembre 2001**

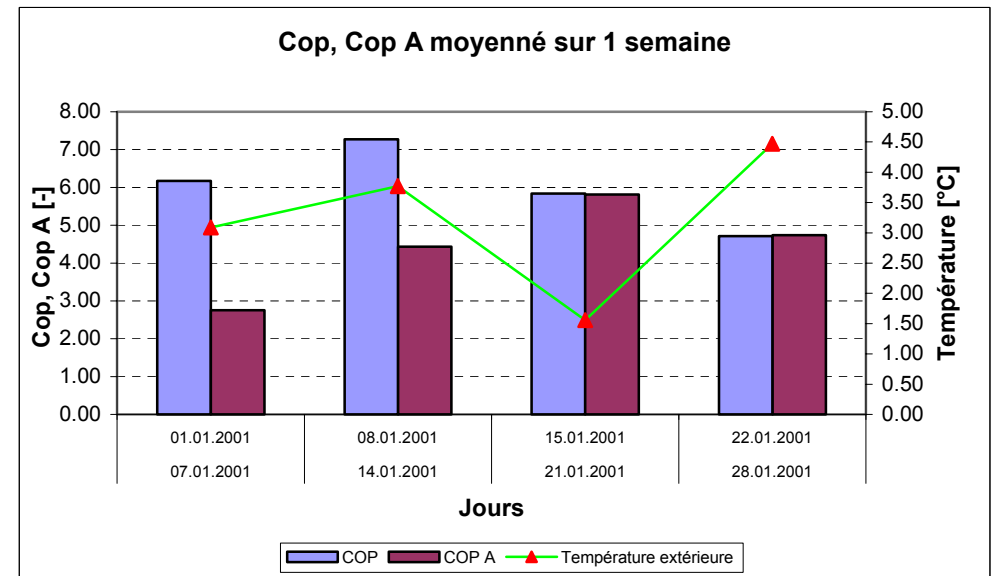
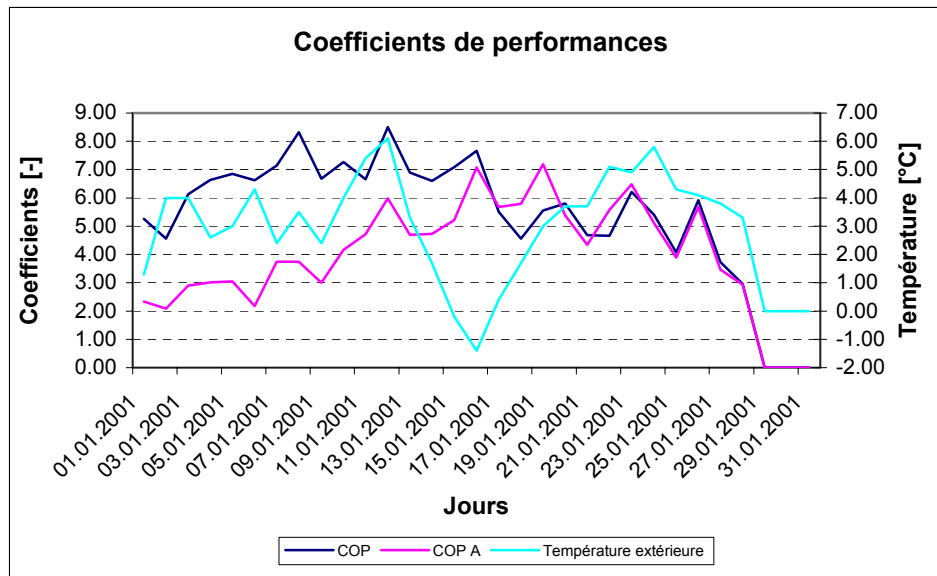
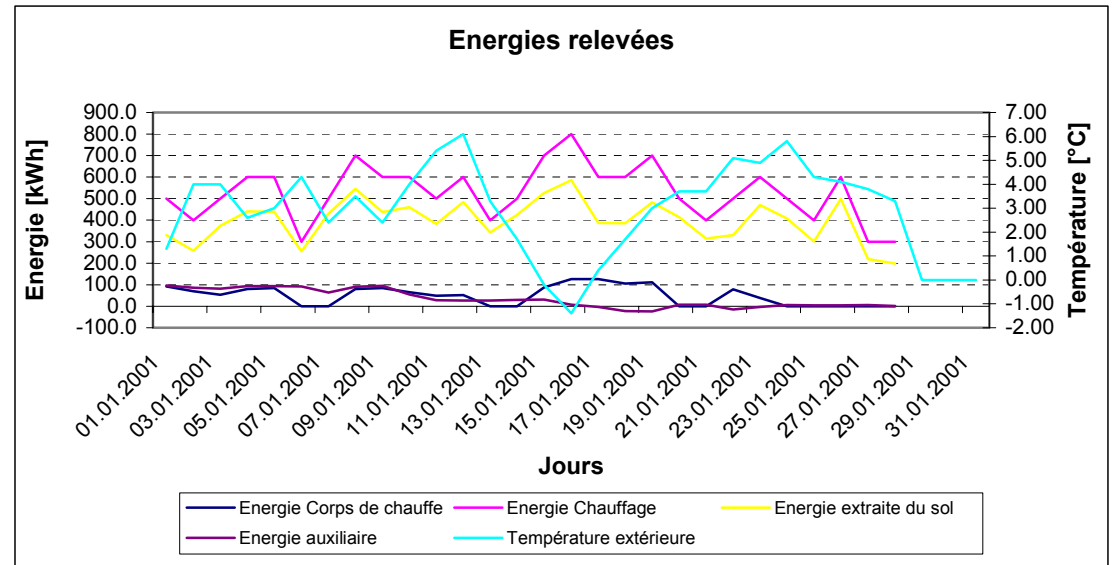
Résultats

Nom du fichier source:

Protocole de mesures janvier.xls

Date: **01.01.2001**

Energie totale de compression	2284.2	[Kwh]
Energie totale de chauffage	14800	[Kwh]
Energie totale tableau	4626.7	[Kwh]
Energie totale corps de chauffe	1387.7	[Kwh]
Energie totale auxiliaires	965.4	[Kwh]
Coefficient COP moyen mensuel	5.87	[-]
Coefficient COPA moyen mensuel	4.13	[-]



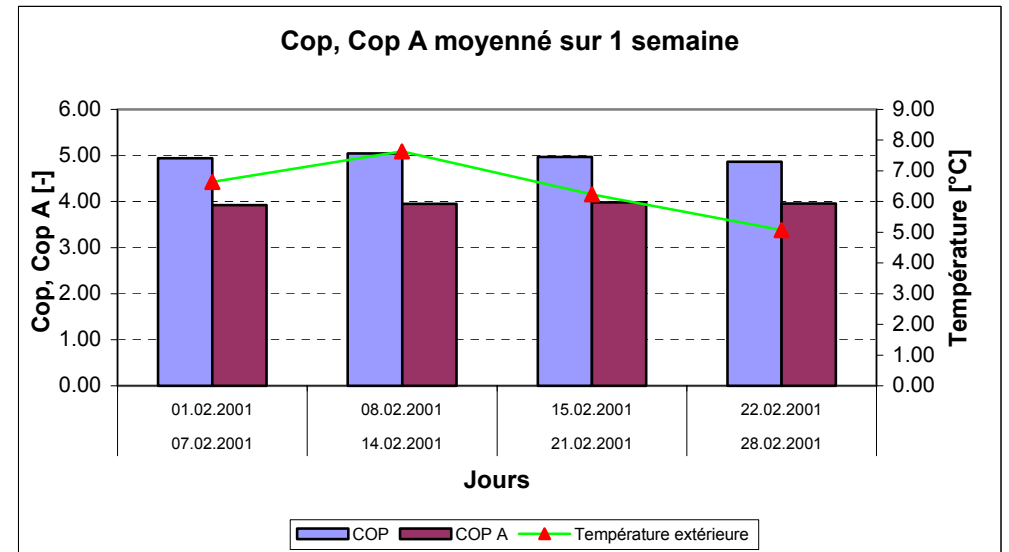
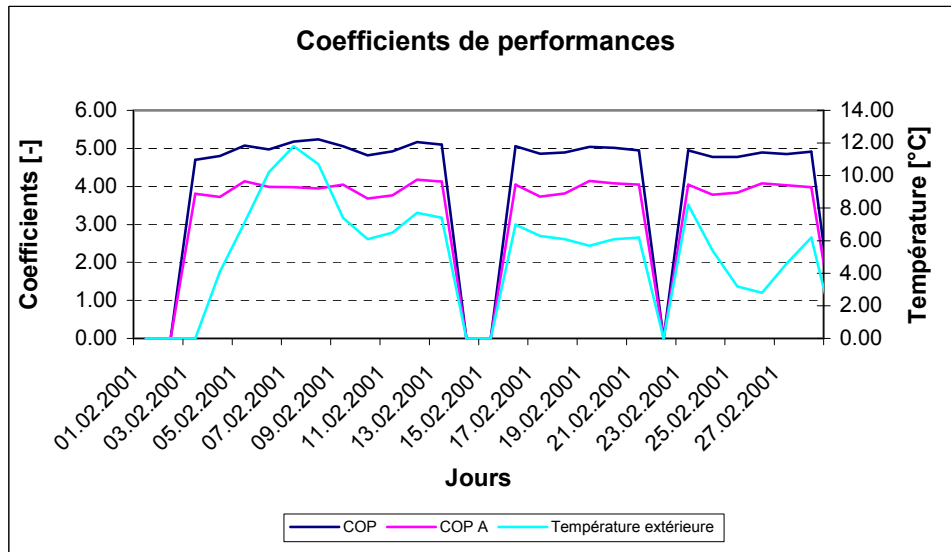
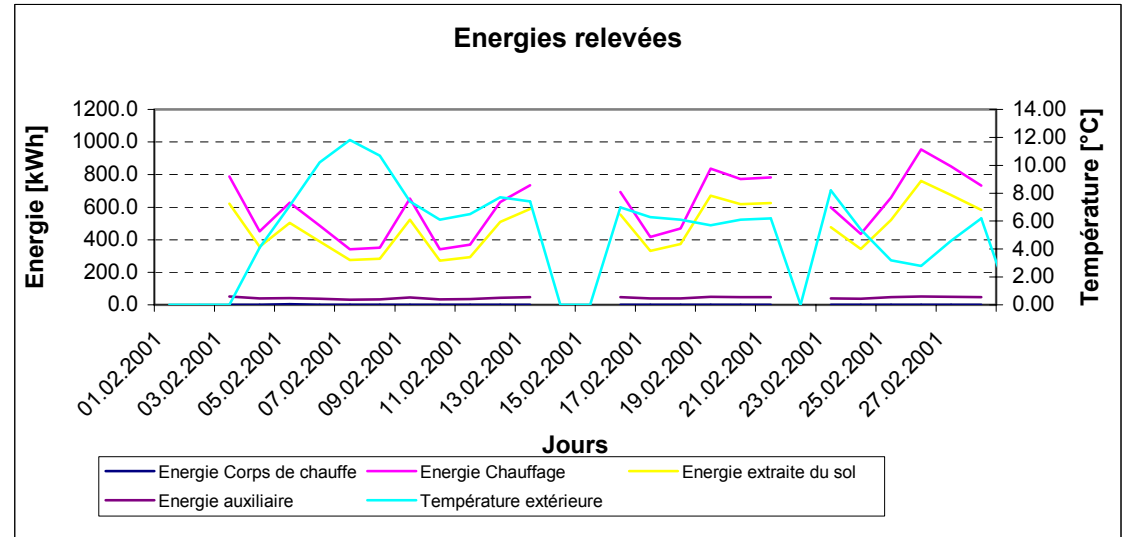
Résultats

Nom du fichier source:

Protocole de mesure février.xls

Date: **01.02.2001**

Energie totale de compression	2823	[Kwh]
Energie totale de chauffage	13977	[Kwh]
Energie totale tableau	3863	[Kwh]
Energie totale corps de chauffe	3	[Kwh]
Energie totale auxiliaires	986	[Kwh]
Coefficient COP moyen mensuel	4.95	[-]
Coefficient COPA moyen mensuel	3.67	[-]



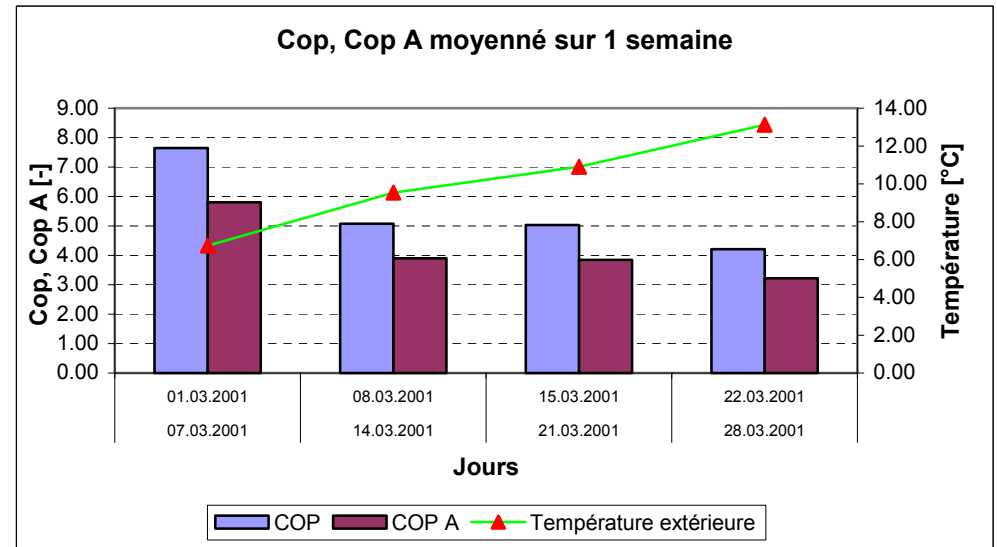
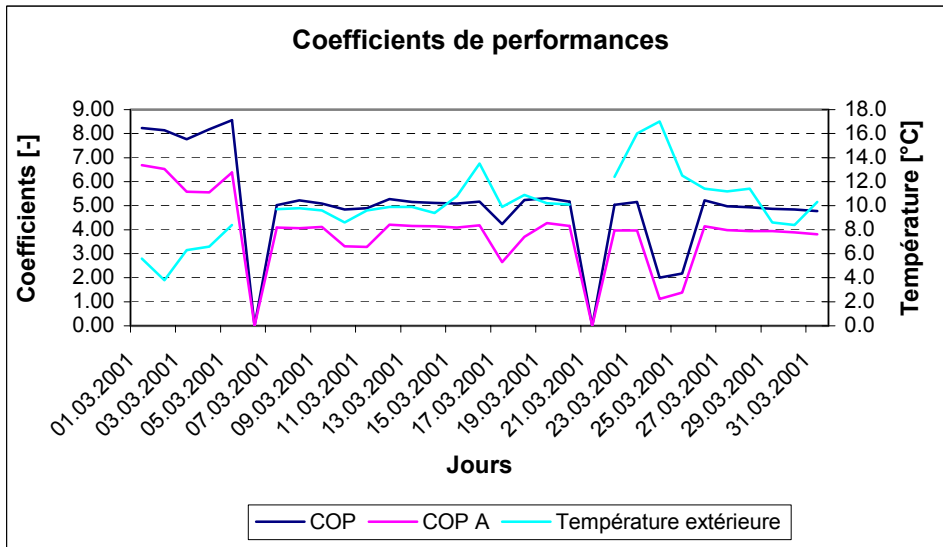
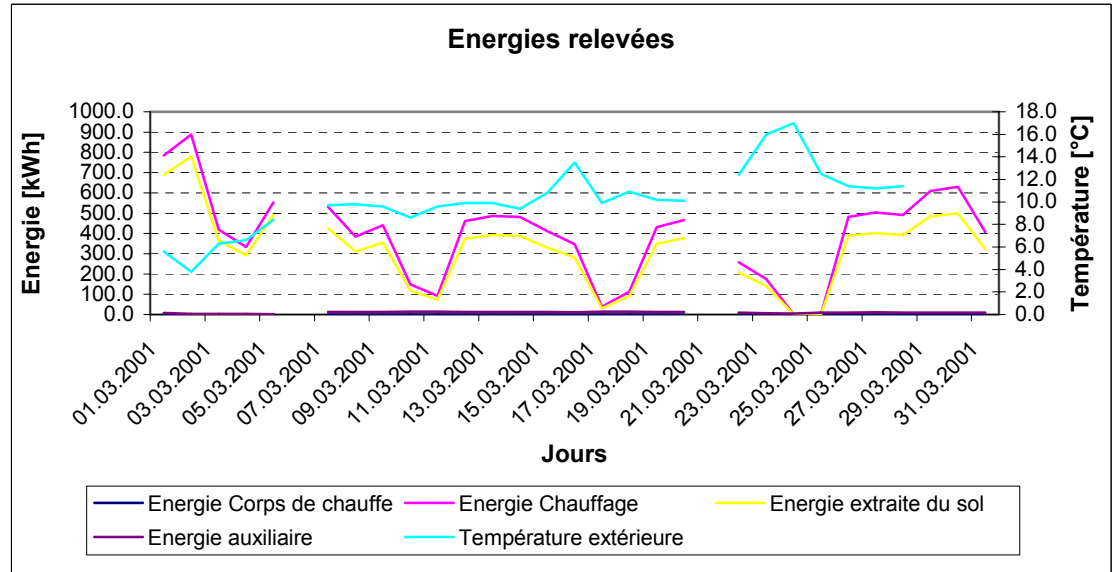
Résultats

Nom du fichier source:

Protocole de mesure mars.xls

Date: **01.03.2001**
31.03.2001

Energie totale de compression	2028.1	[Kwh]
Energie totale de chauffage	11377.0	[Kwh]
Energie totale tableau	3122.2	[Kwh]
Energie totale corps de chauffe	0.0	[Kwh]
Energie auxiliaire Pac	492.9	[Kwh]
Coefficient COP moyen mensuel	5.6	[-]
Coefficient COPA moyen mensuel	4.5	[-]



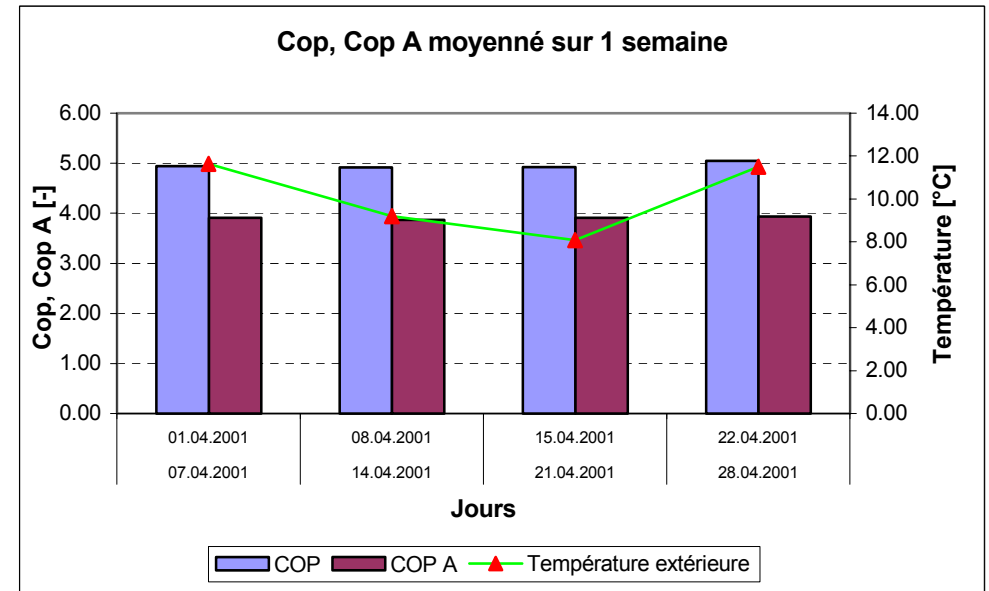
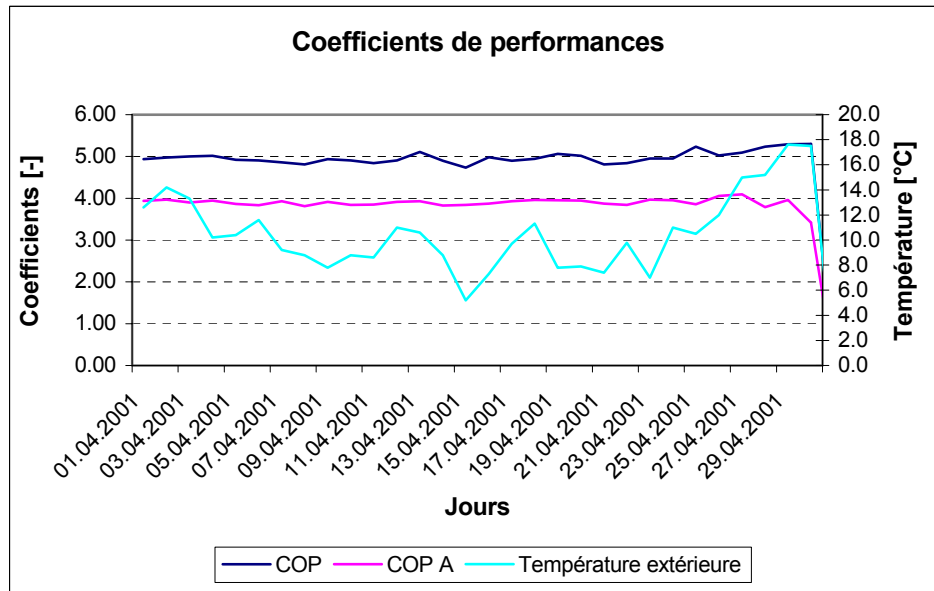
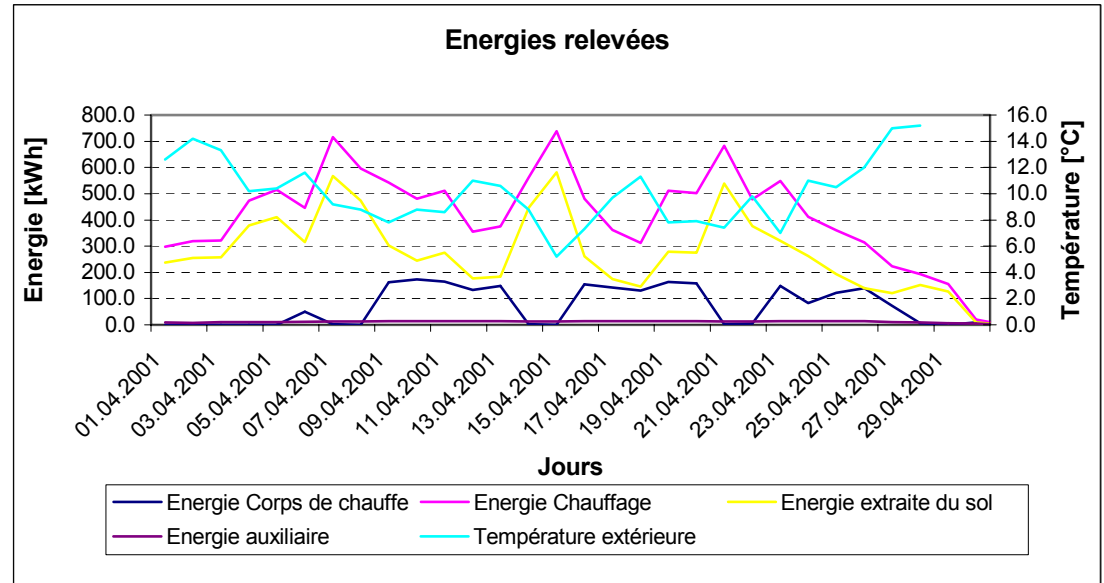
Résultats

Nom du fichier source:

Protocole de mesure avril.xls

Date: **01.04.2001**
30.04.2001

Energie totale de compression	2159.6	[Kwh]
Energie totale de chauffage	12812.0	[Kwh]
Energie totale tableau	5273.5	[Kwh]
Energie totale corps de chauffe	2171.8	[Kwh]
Energie auxiliaire Pac	541.0	[Kwh]
Coefficient COP moyen mensuel	4.9	[-]
Coefficient COPA moyen mensuel	3.9	[-]

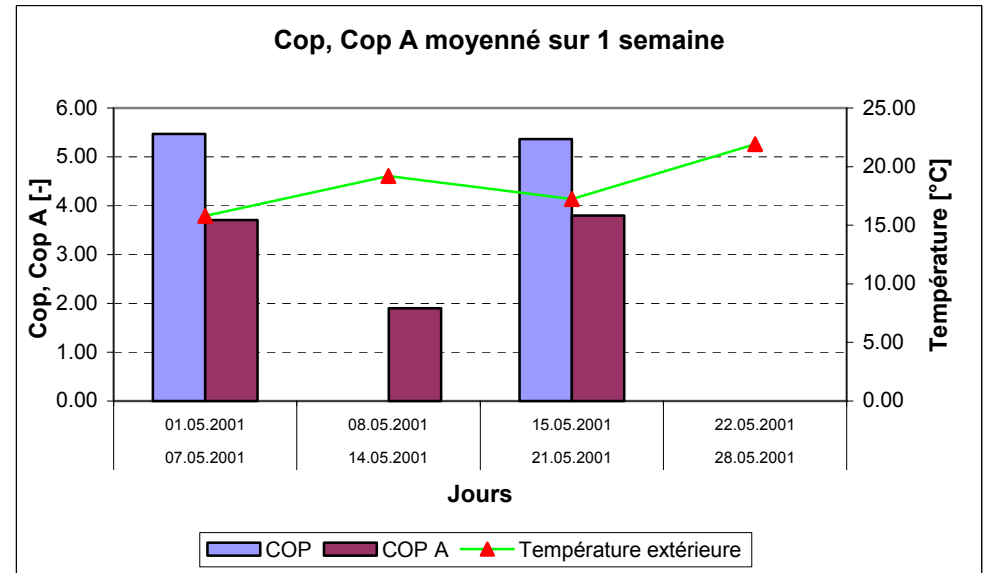
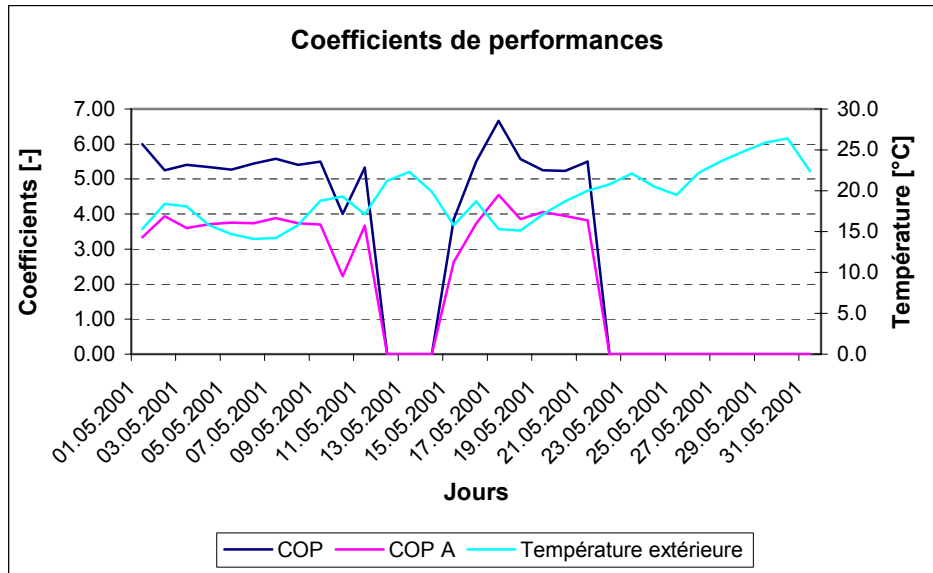
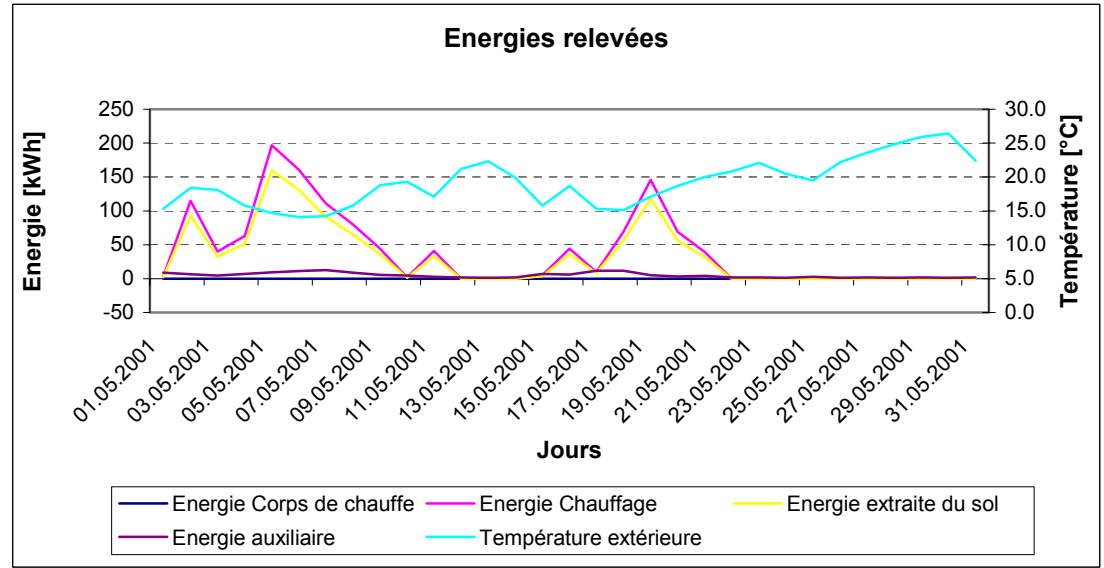


Résultats

Nom du fichier source:
Protocole de mesure mai.xls

Date: **01.05.2001**
31.05.2001

Energie totale de compression	231.0	[Kwh]
Energie totale de chauffage	1239.0	[Kwh]
Energie totale tableau	481.2	[Kwh]
Energie totale corps de chauffe	0.0	[Kwh]
Energie auxiliaire Pac	88.7	[Kwh]
Coefficient COP moyen mensuel	5.4	[-]
Coefficient COPA moyen mensuel	3.9	[-]

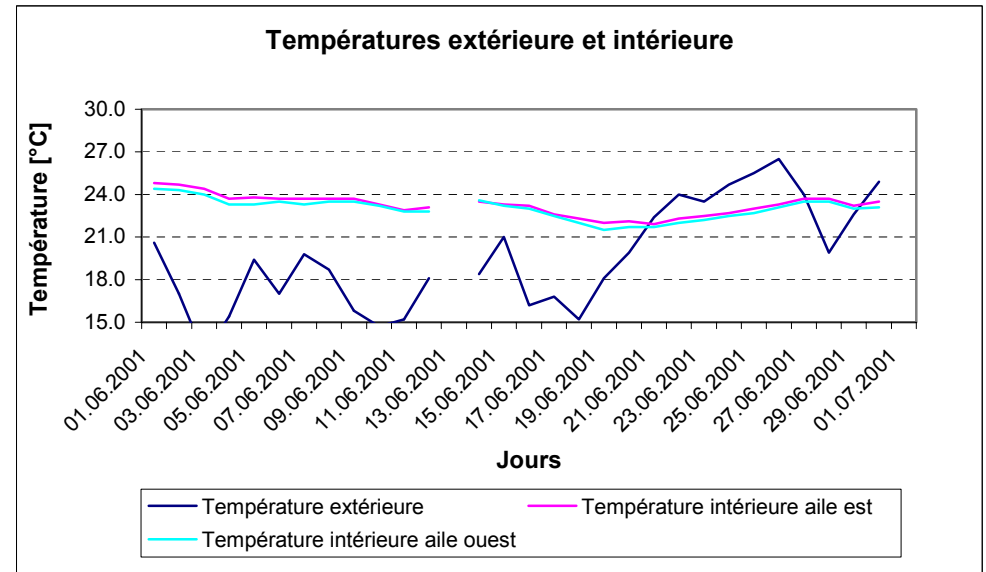
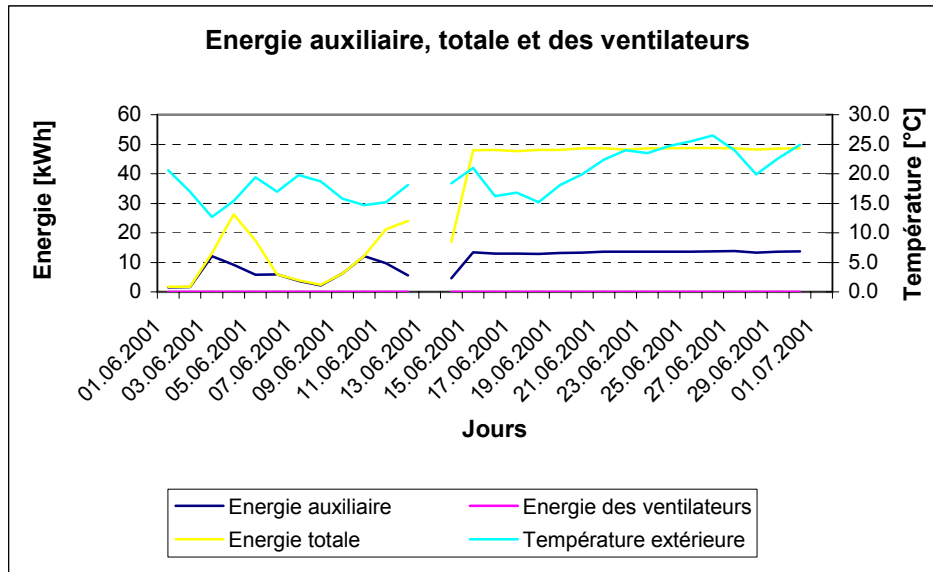
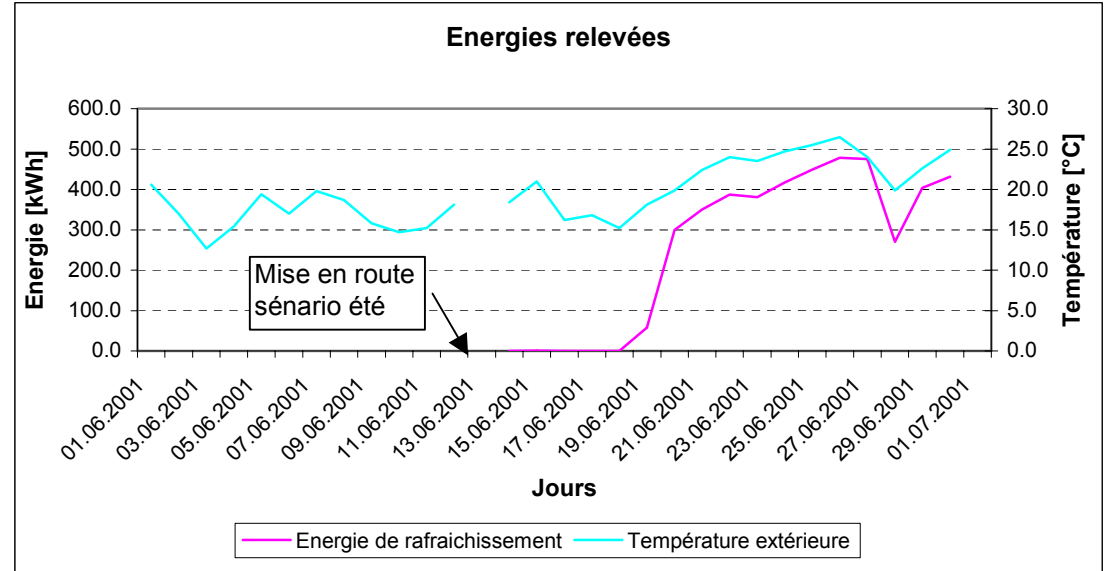


Résultats

Nom du fichier source:
Protocole de mesure juin.xls

Date: **01.06.2001**

Energie totale tableau	791.3	[Kwh]
Energie de rafraîchissement	4402.0	[Kwh]
Energie auxiliaire Pac	571.4	[Kwh]
Energie ventilateurs	0.0	[Kwh]
Température moyenne extérieure	19.6	[°C]
Température moyenne intérieure	23.1	[°C]

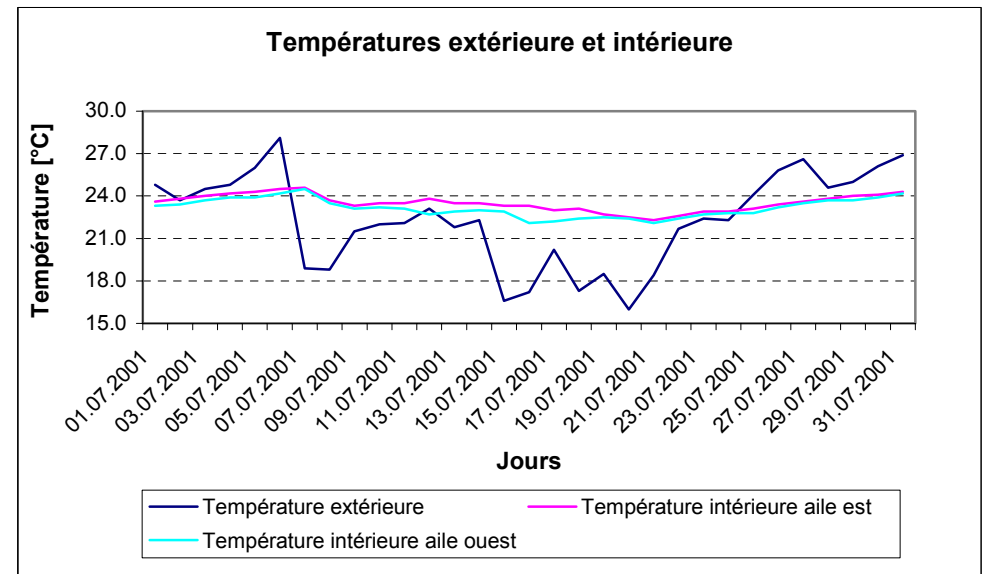
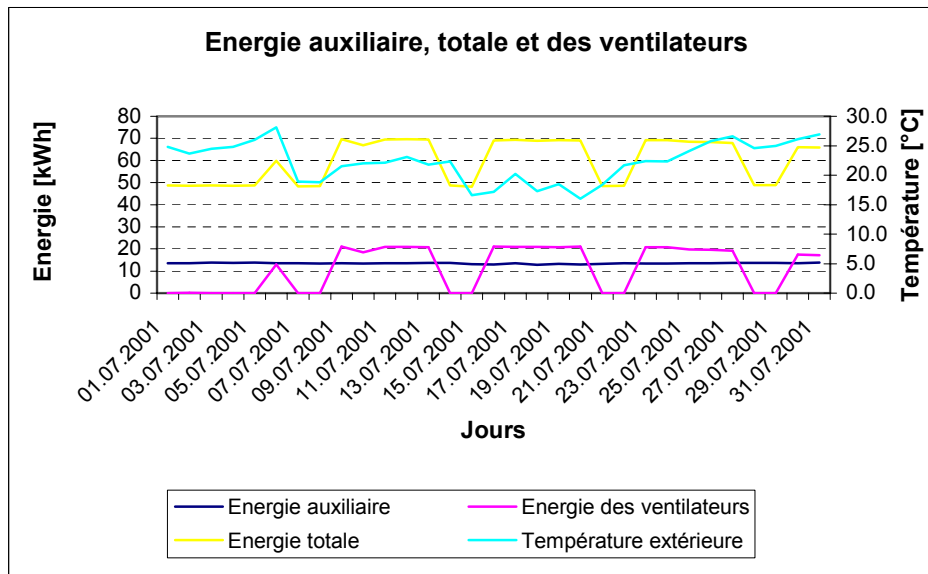
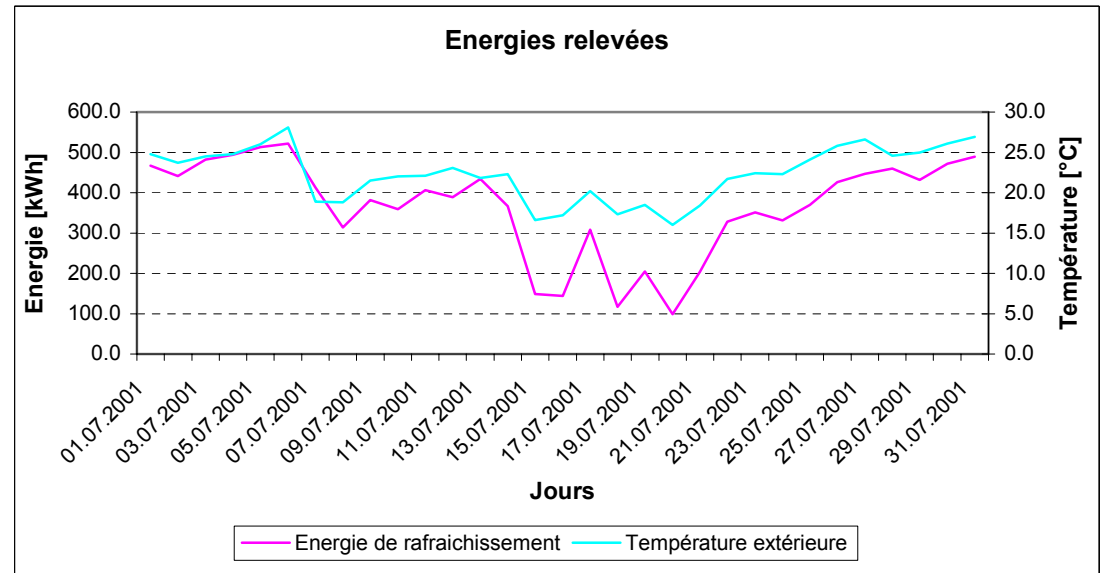


Résultats

Nom du fichier source:
Protocole de mesure juillet.xls

Date: **01.07.2001**

Energie totale tableau	1857.2	[Kwh]
Energie de rafraîchissement	11315.0	[Kwh]
Energie ventilateurs	418.6	[Kwh]
Energie auxiliaire Pac	1014.0	[Kwh]
Température moyenne extérieure	22.3	[°C]
Température moyenne intérieure	23.3	[°C]



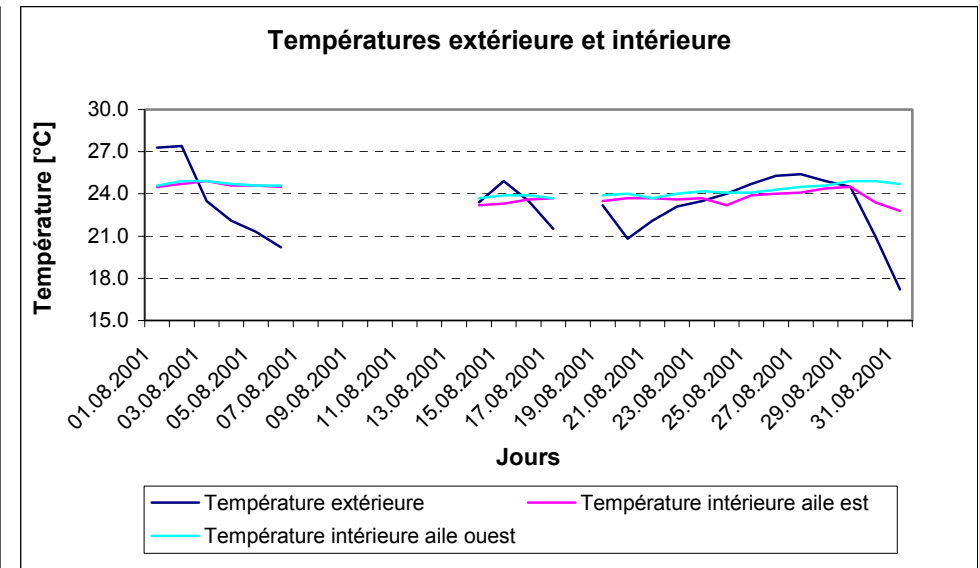
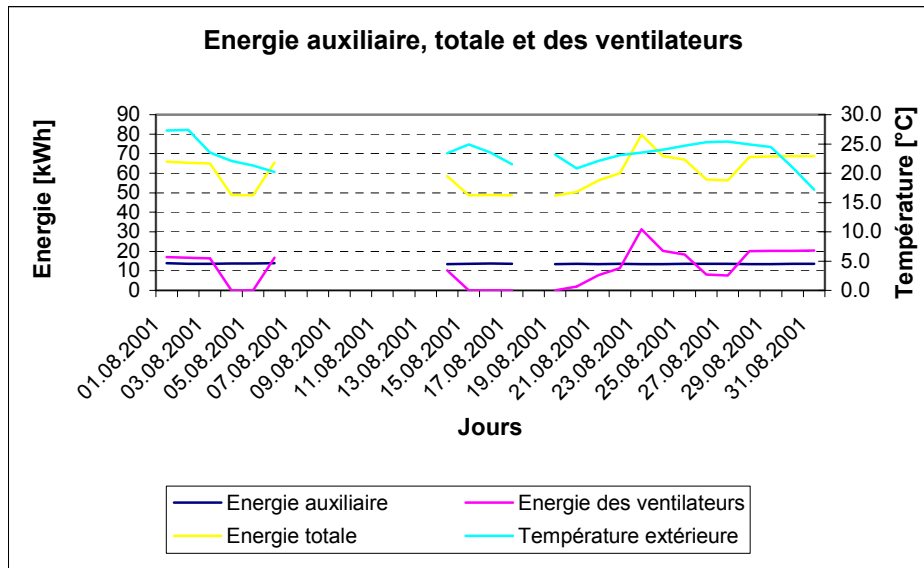
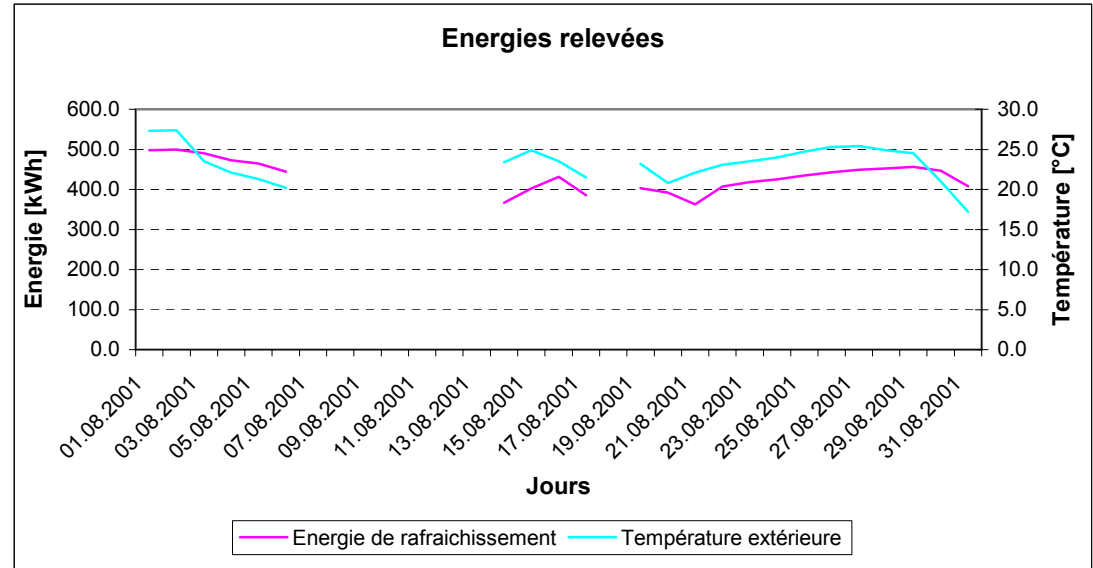
Résultats

Nom du fichier source:

Protocole de mesure Aout.xls

Date: **01.08.2001**

Energie totale tableau	1857.9	[Kwh]
Energie de rafraîchissement	12615.0	[Kwh]
Energie ventilateurs	347.8	[Kwh]
Energie auxiliaire Pac	1086.7	[Kwh]
Température moyenne extérieure	23.3	[°C]
Température moyenne intérieure	24.1	[°C]



Résultats

Nom du fichier source:

Protocole de mesure Septembre.xls

Date: **01.09.2001**

Energie totale tableau	1851.5	[Kwh]
Energie de rafraîchissement	3411.0	[Kwh]
Energie ventilateurs	412.5	[Kwh]
Energie auxiliaire Pac	1053.0	[Kwh]
Température moyenne extérieure	15.0	[°C]
Température moyenne intérieure	22.2	[°C]

