

Rapport final 12.12.2001

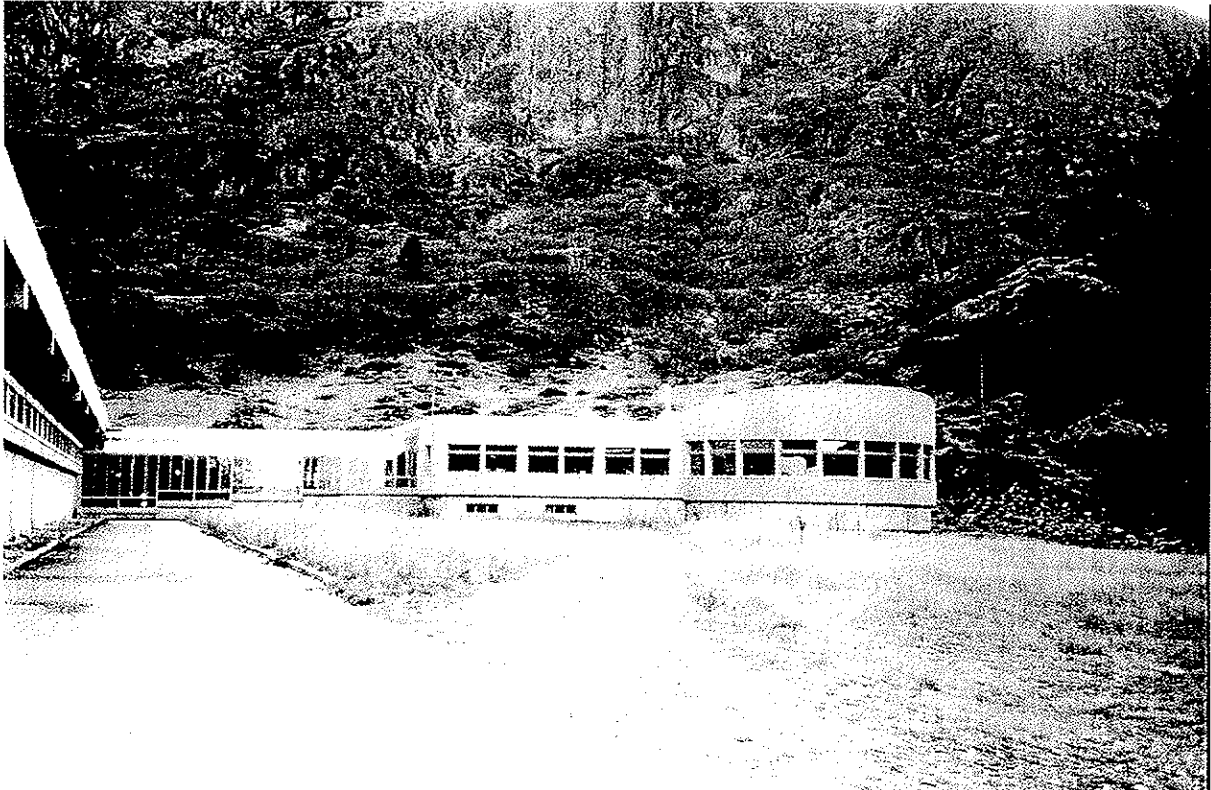
TUNNEL DU GRAND-ST-BERNARD

ANALYSE DU RENDEMENT DE LA PRODUCTION DE CHALEUR

MELDEM ENERGIE
AV. de Cour 61
1007 Lausanne
Par M.Alain Routier

TUNNEL DU GRAND-ST-BERNARD

RAPPORT DE SYNTHÈSE



ANALYSE DU RENDEMENT DE LA PRODUCTION DE CHALEUR

Auteurs: Alain Routier / Ch. Meldem / R. Meldem
Meldem Energie SA
2, Rue de la Dranse, 1920 Martigny

Novembre 2001

Collaboration: Denis Moret
Service d'exploitation du tunnel du Grand-St-Bernard
1946 Bourg-St-Pierre

Table des Matières

1. Introduction
2. Description du complexe
3. Description des installations techniques
4. Analyse de la consommation d'énergie
5. Analyse de la puissance thermique récupérée sur la conduite d'évaporation
6. Conclusions
7. Annexes

1. Introduction

Le présent rapport présente en détail les travaux réalisés, les options techniques choisies ainsi que la synthèse de l'analyse des consommations d'énergie des installations de production de chaleur.

Le choix d'une production d'énergie par pompe à chaleur a été motivé par les éléments suivants :

- Le tunnel du Grand-St-Bernard possède une production d'énergie hydroélectrique .
- L'absence de nappe phréatique.
- L'altitude de l'installation et ses données climatiques particulières.
- La volonté du maître de l'ouvrage d'effectuer une installation en respect de l'environnement.

Les caractéristiques principales de l'installation de production de chaleur sont :

- 1) Production de chaleur à l'aide d'une pompe à chaleur (PAC) eau / eau dont la source froide est constituée par l'air évacué du tunnel, prise à une profondeur de 1500 [m]
- 2) Puissance nominale de chauffage : 36 [kW]
- 3) Investissement pour la production de chaleur : 163'015.60 CHF
- 4) Facture annuelle pour la génération de chaleur: 7'277.60 CHF
9.70 CHF/ m2
- 5) Indice de dépense énergétique thermique : 178.37 kWh/ m2
- 6) Indice de dépense énergétique électrique : 70.60 kWh/ m2

2. Descriptif du complexe

2.1 Situation géographique :

Le Tunnel du Grand-Saint-Bernard a été construit en 1964 afin de favoriser le transit des marchandises et des personnes à travers les Alpes. Son entrée nord se trouve à une altitude de 1850 m, la température minimale selon SIA 384/2 est de -20 [°C], la température minimale mesurée moyenne durant un mois est de -4 [°C].

2.2 But de la construction du nouveau bâtiment administratif :

Le bâtiment a été construit afin d'abriter les nouveaux systèmes de contrôle du trafic, ainsi que les zones dédiées à la gestion et aux installations de sécurité.

2.3 Descriptif du nouveau bâtiment administratif :

Le nouveau bâtiment se compose de trois niveaux, formant une surface brute de plancher de 748 [m²] répartie de la manière suivante:

- Sous-sol :
 - Chaufferie comportant les appareils de production de chaleur, le collecteur de distribution ainsi que le monobloc de ventilation.
 - Locaux électriques courant fort, faible, local batterie
- Rez de chaussé :
 - Garage de réparation et d'entretien des véhicules, chauffé à l'aide d'aérochauffeurs.
 - Atelier mécanique et d'entretien chauffés à l'aide de tubes rayonnants et d'aérochauffeurs
- Etage :
 - Bureaux administratifs, chauffage de sol et ventilation .
 - Salle de conférence, chauffage de sol et ventilation.
 - Salle de commande, chauffage de sol et ventilation .

Les besoins en énergie chaleur à l'intérieur du bâtiment sont répartis de la manière suivante :

- Chauffage statique des locaux	:	22.50	[kW]
- Chauffage par ventilation et chauffage à air	:	13.30	[kW]
Puissance totale installée		38.50	[kW]
Puissance spécifique 38'500 [W] / 748 [m ²]	:	47.9	[W/m ²]

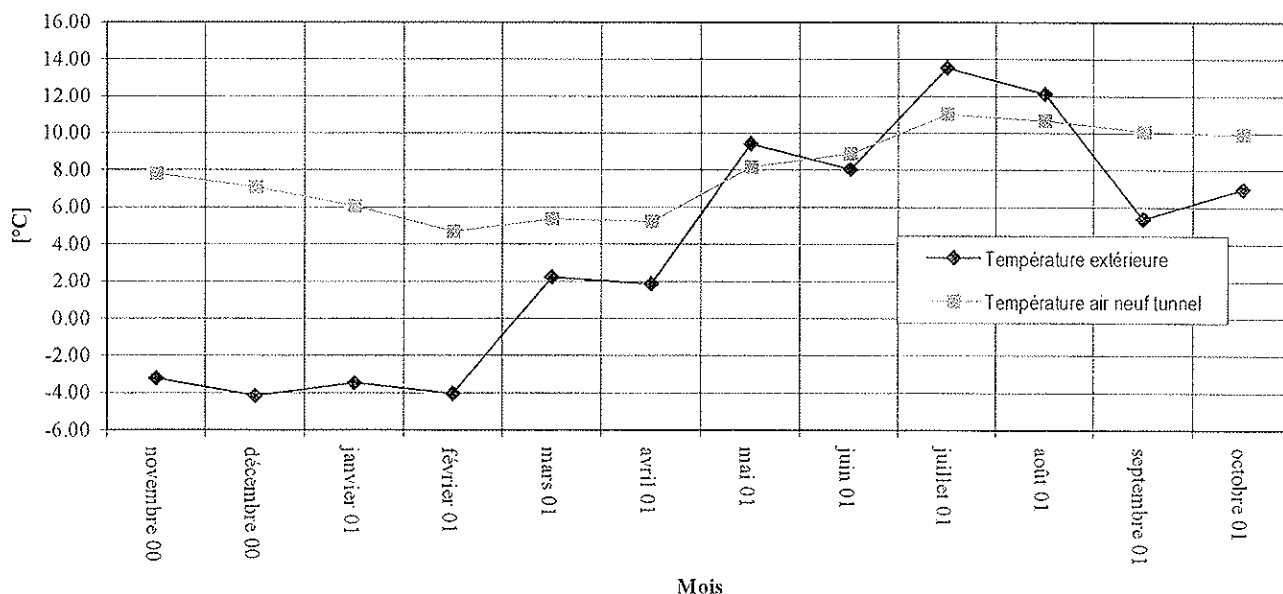
3. Description des installations techniques:

L'installation de production de chaleur comporte une pompe à chaleur (dénommée ci-après PAC) à eau /eau glycolée, d'une puissance nominale utile de 36 [kW]. La source froide est constituée par l'air extrait du tunnel pris dans la calotte à une profondeur de 1500 [m] à partir du portail Suisse.

Le choix de l'emplacement de la source froide constitué d'un monobloc circuit évaporateur et d'un échangeur eau glycolée / air à été déterminé par une campagne de mesures effectuées durant l'hiver 1995/1996. La différence de température entre deux points de mesure situé à 1500 et 3000 [m] était inférieure à 1 [K]. Les mesures effectuées du 29 janvier au 7 avril 1996 nous donnent une température moyenne, pratiquement constante de + 5 [°C] avec de faibles variations de ± 1 [°K], et des pointes – 2 [°K], durant les périodes de fonctionnement prolongé des ventilateurs d'évacuation des gaz d'échappement .

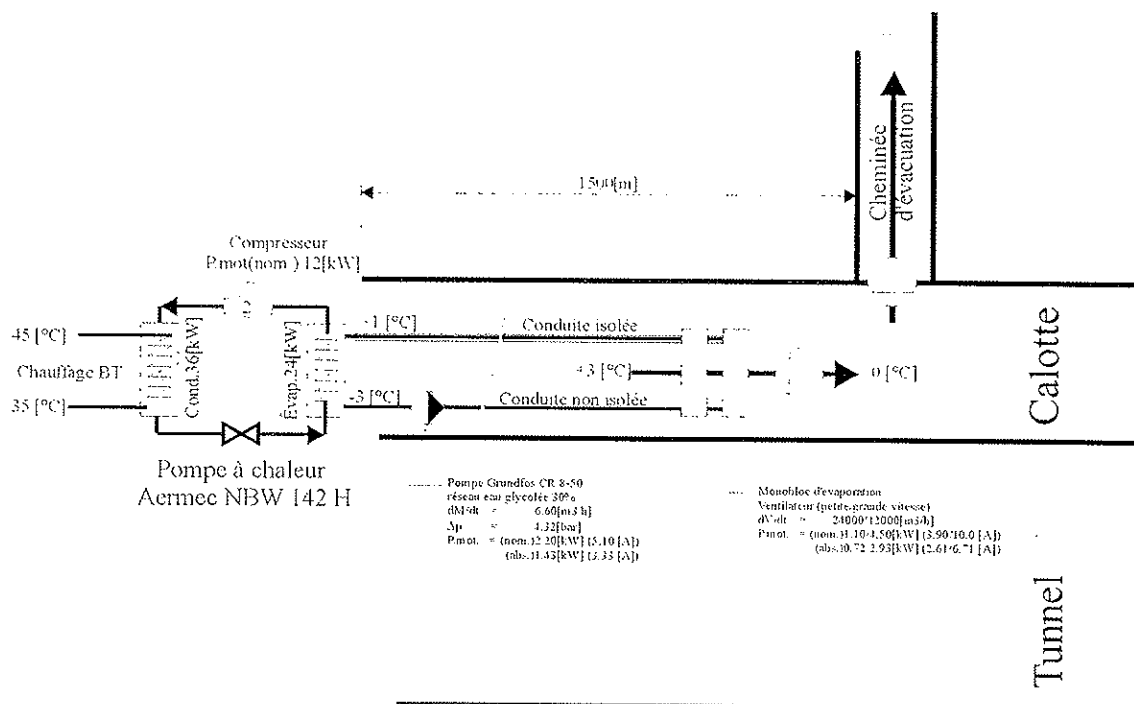
Actuellement, la différence se trouve durant la période du 1 novembre 2000 au 31 octobre 2001 à – 0.32 [°K] durant le mois de février tous les autres mois de l'année enregistrent une augmentation significative pouvant aller jusqu'à + 6 [°K] durant le mois de juillet mais en règle générale l'augmentation de température avoisine les + 3 [°K].

Température extérieure moyenne et température moyenne à l'intérieur du tunnel à 1500 m du 1 novembre 2000
au 31 octobre 2001



Durant cette période l'humidité relative est également restée assez constante à des valeurs comprises entre 55 et 65 % du début février à la mi-mars et de 65 à 72 % entre la mi-mars et le début avril.

Le principe de l'installation est représenté par le schéma ci-dessous:

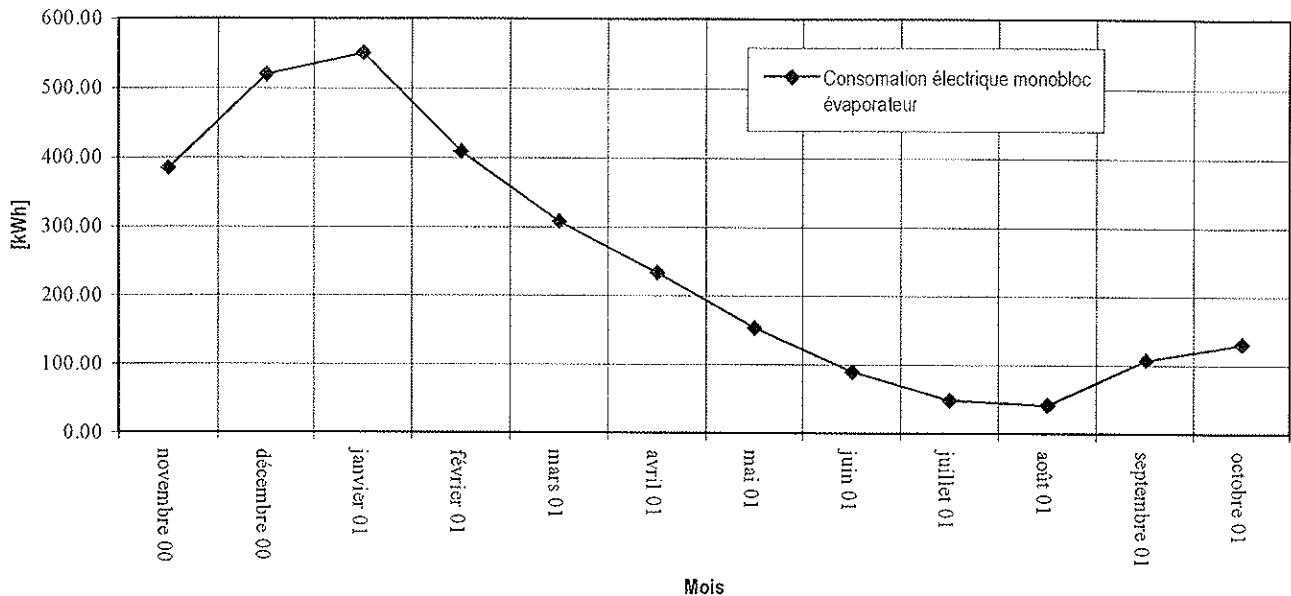


3.1 PAC 1500 :

Le terme de PAC 1500 est utilisé pour définir le monobloc du circuit d'évaporation se trouvant à 1500 m à l'intérieur du tunnel. Le monobloc d'évaporation a été posé dans la partie supérieure du tunnel, il est composé d'un échangeur air / eau glycolée, équipé d'un filtre et d'un ventilateur (à 2 vitesses). Ce dernier fonctionne en petite vitesse lorsque les deux compresseurs sont en service. La batterie est équipée d'une protection antigel constituée par 2 résistances électriques de 2.8 [kW] qui n'ont jamais été utilisées à ce jour. Leur enclenchement est géré par la température ambiante de la calotte. Les caractéristiques du monobloc du circuit d'évaporation sont les suivantes.

- Débit d'air à travers de l'échangeur : 12'000.00 [m³/h]
- Puissance électrique nominale : 1.10 [kW] 3.90 [A]
- Puissance électrique absorbée : 0.70 [kW] 2.55 [A]

Consommation électrique mensuelle PAC 1500 durant la période du 1 novembre 2000 au 31 octobre 2001

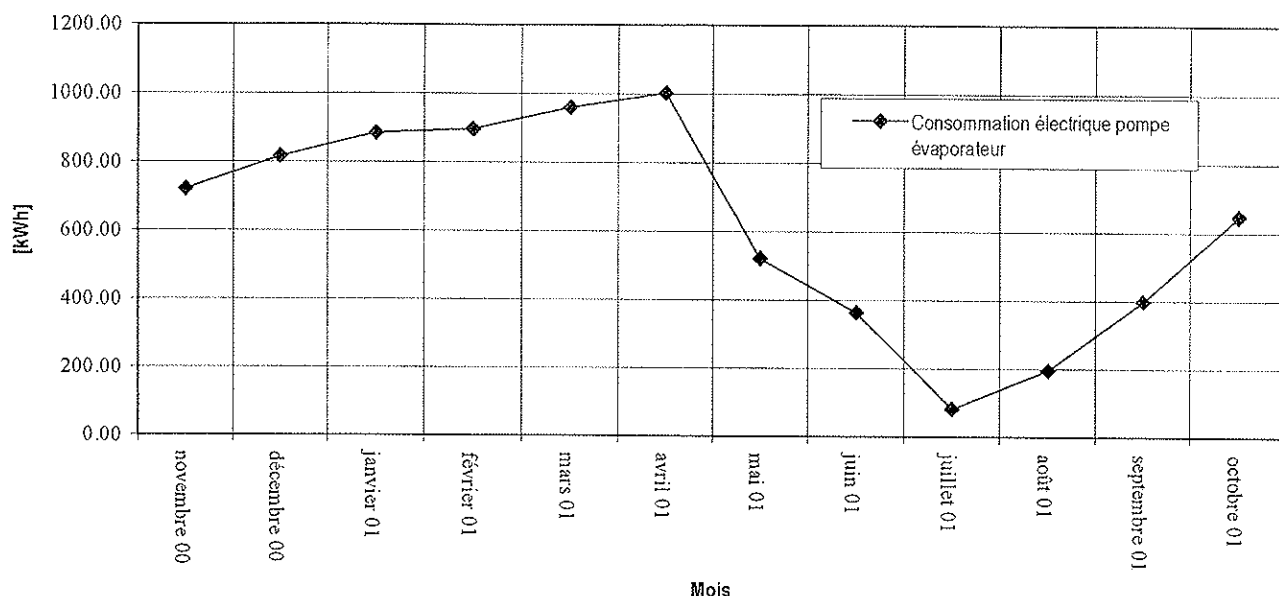


3.2 Conduite d'évaporation :

La conduite d'évaporation, en matière plastique, est isolée sur le tronçon allant de la PAC 1500 à la PAC. Le gain de température sur le tronçon aller est en moyenne de 1.5 [°C] durant la période hivernale ce qui donne ± 8.75 [W/m] par [°K], la chaleur ainsi récupérée est suffisante pour le fonctionnement du premier étage de la PAC sans convection forcée. La circulation de l'eau dans la conduite est assurée par une pompe de marque Grundfos type :CR-8-50 ayant les caractéristiques suivantes

- Débit de la pompe : 6.60 [m3/h]
- Pression utile : 4.32 [bar]
- Puissance électrique nominale : 2.20 [kW] 5.10 [A]
- Puissance électrique absorbée : 1.80 [kW] 4.20 [A]

Consommation électrique mensuelle de la pompe du circuit d'évaporation durant la période du 1 novembre 2000 au 31 octobre 2001

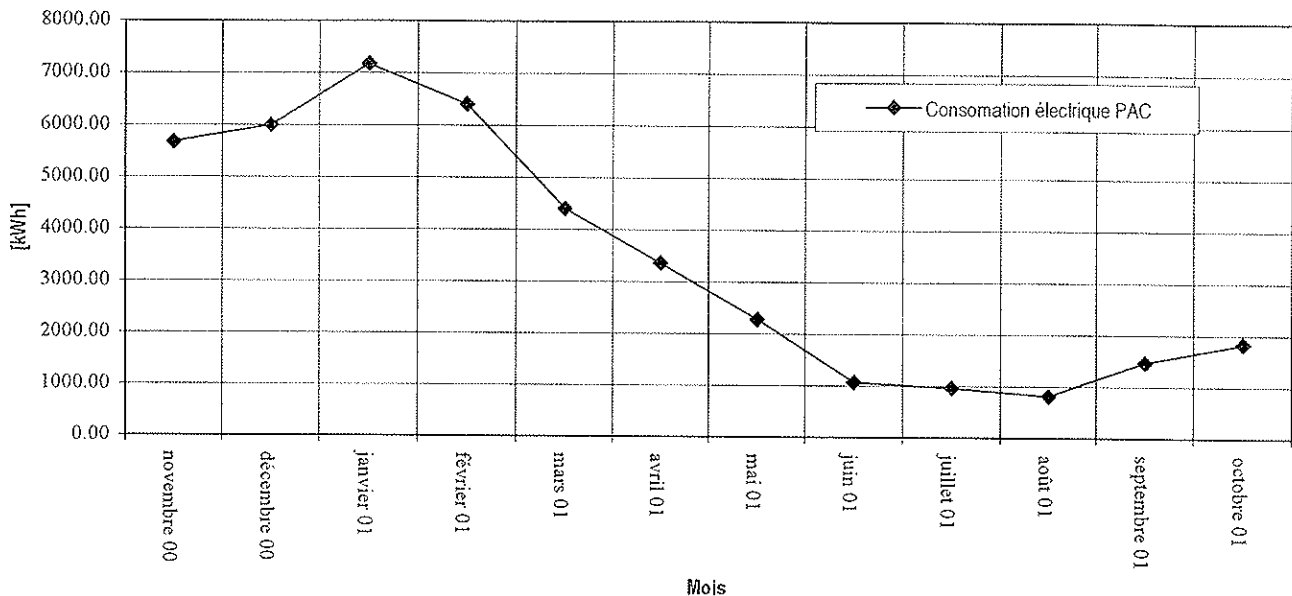


3.3 PAC:

Le terme de PAC désigne la pompe à chaleur eau / eau de type Aermec NBW 142 H se trouvant dans le local technique situé au sous-sol du nouveau bâtiment administratif.

- Puissance de l'évaporateur : 24 [kW]
- Puissance du condenseur : 36 [kW]
- Puissance électrique totale : 12 [kW] pour les deux compresseurs
- COP nominal de la PAC : 3

Consommation électrique mensuelle PAC durant la période du 1 novembre 2000 au 31 octobre 2001



3.4 Système de contrôle de mesure et de régulation :

3.4.1 Définition

L'ensemble des installations de production et de distribution de chaleur est contrôlé, mesuré et régulé par un ensemble de gestion par PC via une ligne téléphonique.

3.4.2 Logique de fonctionnement

Deux sondes de température situées entre la PAC et le collecteur principal sont utilisées pour gérer l'enclenchement et le déclenchement de la PAC.

L'enclenchement des deux pompes du circuit d'eau glycolée de l'évaporateur (P1) et du circuit du condenseur (P2) est géré par des temporisations asservies à l'ordre d'enclenchement et de déclenchement de la PAC.

Le ventilateur du monobloc du circuit d'évaporation fonctionne en P.V. lorsque les 2 compresseurs de la PAC sont en service. L'expérience nous a montré qu'il pouvait être mis hors service.

4. Analyse de la consommation d'énergie

Sous le chapitre suivant nous allons présenter les mesures et les consolidations effectuées .

Nous avons calculer quatre COP différents:

4.1 COP théorique calculé :

$$\text{Définition du COP} = \frac{\text{Puissance de chauffage nominale}}{\text{Pea. PAC} + \text{Pea. pompe circuit d'évap.} + \text{Pea vent. évap} + \text{Pea. pompe de charge}} = 2.18$$

Pea = Puissance électrique absorbée

4.2 COP moyen mensuel mesuré:

Le COP moyen mensuel à été calculé mensuellement sur la période allant du 1^{er} janvier au 31 octobre. Le coefficient de performance moyen mensuel tient compte de l'énergie consommée par le ventilateur du monobloc de ventilation, des compresseurs de la PAC, de la pompe du circuit évaporateur ainsi que de la pompe de charge du ballon.

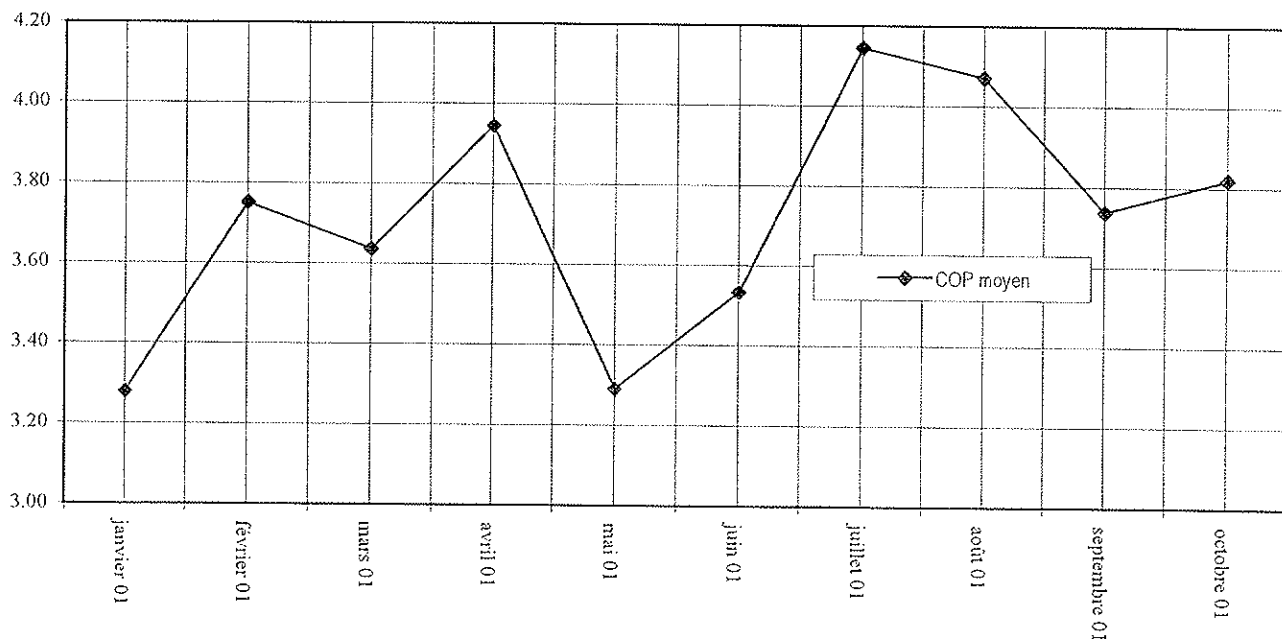
Le COP moyen est calculé de la manière suivante en consolidant les valeurs mesurées et stockées dans le système MCR (système de contrôle de mesure et de régulation):

- L'énergie thermique délivrée par la PAC est mesurée à l'aide du compteur de chaleur C5 .
- L'énergie électrique consommée est calculée par :
 - a) relevé des compteurs pour les compresseurs de la PAC et les ventilateurs du monobloc du circuit évaporateur.
 - b) calcul en multipliant le temps de fonctionnement multiplié par la puissance mesurée au moment de la mise en service pour les pompes P1 et P4

Tableau de l'évolution du COPmoyen mensuel :

Mois	Energie thermique [kWh]	Energie électrique					COP moyen
		PAC [kWh]	Monobloc évap. [kWh]	Pompe P1. [kWh]	Pompe P2 [kWh]	Total [kWh]	
novembre 00		5673.00	385.00	721.88	66.68	6846.55	
décembre 00		5994.00	520.00	818.00	72.32	7404.31	
janvier 01	28497.49	7173.00	551.00	886.40	80.98	8691.37	3.28
février 01	29252.29	6408.00	409.00	896.90	84.77	7798.67	3.75
mars 01	20791.33	4402.00	308.00	960.74	48.08	5718.83	3.64
avril 01	18485.28	3359.00	234.00	1003.43	89.76	4686.19	3.94
mai 01	9889.59	2279.00	154.00	522.41	50.63	3006.03	3.29
juin 01	5490.60	1065.00	90.00	365.82	33.42	1554.24	3.53
juillet 01	4566.40	962.00	49.00	82.80	7.67	1101.47	4.15
août 01	4342.90	810.00	42.00	196.41	18.20	1066.61	4.07
septembre 01	7513.42	1466.00	108.00	399.37	36.92	2010.29	3.74
octobre 01	10172.99	1825.00	131.00	648.10	59.89	2663.99	3.82
Total	139002.28	29749.00	2076.00	5962.38	510.31	38297.68	37.21
Moyenne	13900.23	2974.90	207.60	596.24	51.03	3829.77	3.72

COP moyen mensuel de la pompe à chaleur du 1 janvier 2001 au 31 octobre 2001



5. Conclusion

L'installation de production de chaleur est en service depuis le 22.04.1999. Elle a fonctionné à la satisfaction du service d'exploitation du tunnel depuis la mise en service. Dans un souci d'économie de maintenance, une solution est actuellement à l'étude afin de remplacer les filtres synthétiques du monobloc d'évaporation par des filtres métalliques régénérables, compte tenu de l'encrassement plus rapide que prévu, dû essentiellement à l'augmentation du trafic dans le tunnel. La performance (COP) mesurée du système est, en moyenne annuelle, proche de 3.5. Elle excède des prévisions faites en phase d'avant projet.

6. Annexes

- 6.1 Tableaux et graphiques des relevés effectués et décrits ci-dessus.
- 6.2 Schéma de principe de l'installation.

Projet

96 007

Tunnel du Grand-St-Bernard construction d'un nouveau bâtiment technique

Relevé des consommations moyenne d'énergie pour la période du 1 novembre 2000 au 31 octobre 2001

Position	Marche compresseur étage 1 (différence mois)	Marche compresseur étage 2 (différence mois)	Marche pompe évaporateur (différence mois)	Marche pompe charge accumulateur (différence mois)	Consommation électrique monobloc évaporateur	Consommation électrique PAC	Consommation électrique pompe évaporateur	Consommation électrique pompe charge accumulateur	Consommation électrique totale
Unité	C6a [h]	C6b [h]	C1 [h]	C4 [h]		C3 kWh	kWh	kWh	kWh
novembre 00	718.42	447.90	501.30	512.92	385.00	5673.00	721.88	66.68	6846.55
décembre 00	747.95	502.95	568.05	556.27	520.00	5994.00	818.00	72.32	7404.31
janvier 01	743.18	581.46	615.55	622.90	551.00	7173.00	886.40	80.98	8691.37
février 01	638.09	582.32	622.84	652.07	409.00	6408.00	896.90	84.77	7798.67
mars 01	572.07	571.71	667.18	369.85	308.00	4402.00	960.74	48.08	5718.83
avril 01	551.10	554.07	696.83	690.44	234.00	3359.00	1003.43	89.76	4686.19
mai 01	373.90	375.93	362.78	389.44	154.00	2279.00	522.41	50.63	3006.03
juin 01	124.10	131.52	254.04	257.09	90.00	1065.00	365.82	33.42	1554.24
juillet 01	40.29	40.40	57.50	58.98	49.00	962.00	82.80	7.67	1101.47
août 01	94.23	94.20	136.40	139.99	42.00	810.00	196.41	18.20	1066.61
septembre 01	197.10	196.95	277.34	284.00	108.00	1466.00	399.37	36.92	2010.29
octobre 01	323.43	323.17	450.07	460.66	131.00	1825.00	648.10	59.89	2663.99
Totaux	5123.85			4994.62	2981.00	41416.00	7502.25	649.30	52548.55

Projet 96 007

Tunnel du Grand-St-Bernard construction d'un nouveau bâtiment technique

Relevé des températures moyennes mensuelles pour la période du 1 novembre 2000 au 31 octobre 2001

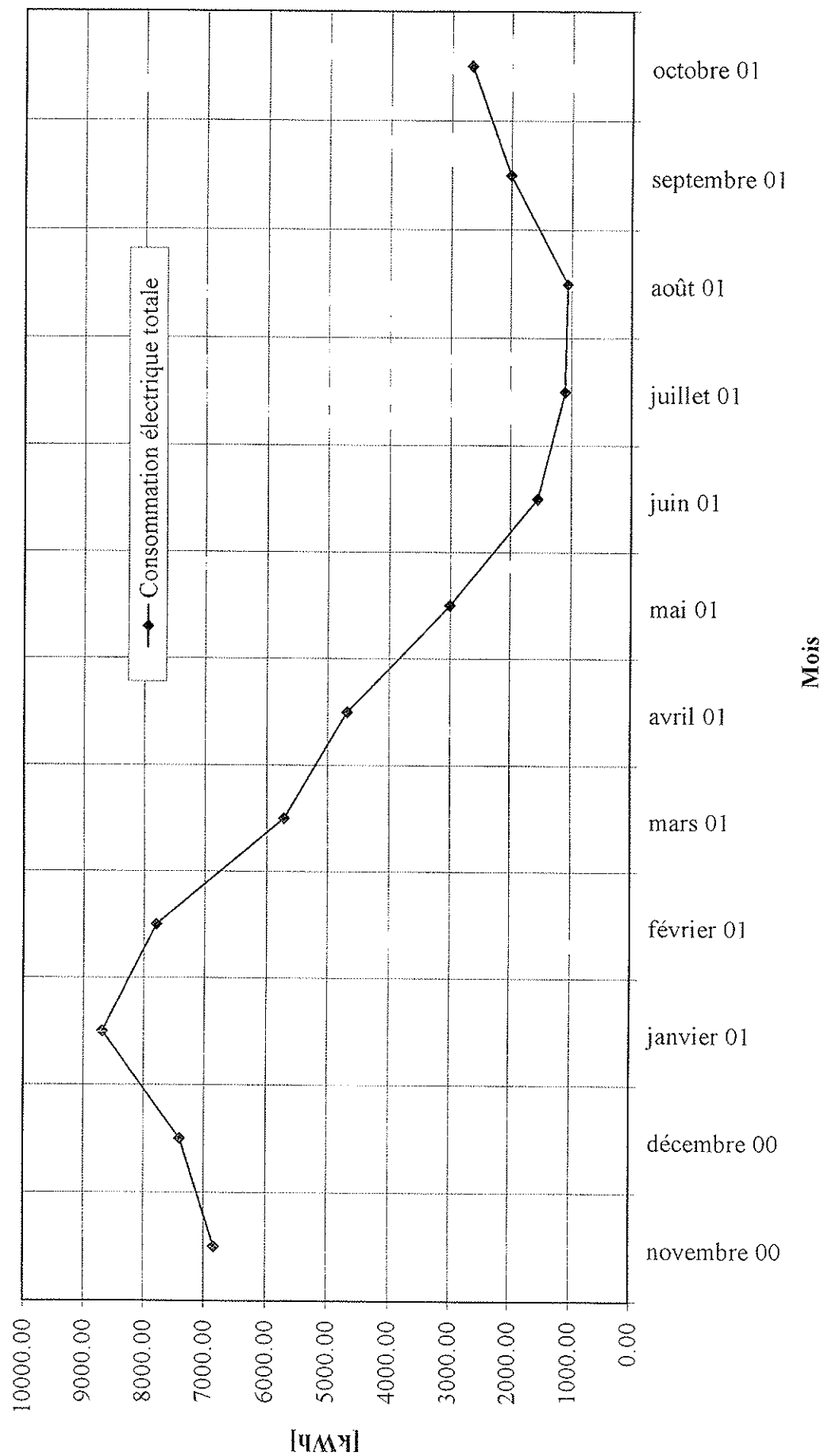
Position	T1	T2	Température bas		Température entrée condenseur		Température sortie condenseur		Température sortie PAC		Température entrée évaporateur		Température sortie évaporateur		Température entrée PAC		Température air neuf tunnel		Température extérieure		T4 - T3		T5 - T6		T5 - T8	
Unité	[°C]	[°C]	[°C]		[°C]		[°C]		[°C]		[°C]		[°C]		[°C]		[°C]		[°C]		[°K]		[°K]		[°K]	
novembre 00	43.87	37.76	38.68		44.32		2.70		4.00		4.06		4.44		7.80		-3.22		5.64		1.29		1.73			
décembre 00	44.53	38.05	39.15		45.01		2.55		3.70		4.18		4.40		7.07		-4.14		5.86		1.14		1.84			
janvier 01	45.56	38.45	39.75		46.19		1.47		2.64		3.32		3.56		6.06		-3.47		6.44		1.18		2.10			
février 01	44.85	38.38	39.51		46.46		-0.16		1.33		1.76		1.66		4.68		-4.04		6.95		1.49		1.83			
mars 01	40.97	36.01	36.70		43.40		3.29		3.37		3.82		4.84		5.37		2.23		6.70		0.08		1.55			
avril 01	39.42	35.24	35.43		42.85		3.76		3.83		4.25		5.90		5.23		1.85		7.42		0.07		2.14			
mai 01	43.45	40.84	40.17		43.56		8.09		8.06		8.09		8.93		8.17		9.43		3.39		-0.03		0.84			
juin 01	33.94	32.36	31.59		33.67		10.26		9.03		9.09		11.32		8.90		8.05		2.08		-1.23		1.06			
juillet 01	42.72	41.24	40.12		41.82		12.83		11.81		11.82		14.78		11.04		13.53		1.70		-1.02		1.96			
août 01	42.42	40.99	39.95		41.50		13.51		11.40		11.57		15.37		10.67		12.11		1.55		-2.11		1.86			
septembre 01	39.90	37.46	36.31		39.73		10.36		9.55		9.86		11.95		10.10		5.39		3.42		-0.81		1.59			
octobre 01	44.95	42.03	40.88		44.53		9.51		9.55		9.74		11.33		9.94		6.97		3.64		0.04		1.82			

Projet 96 007

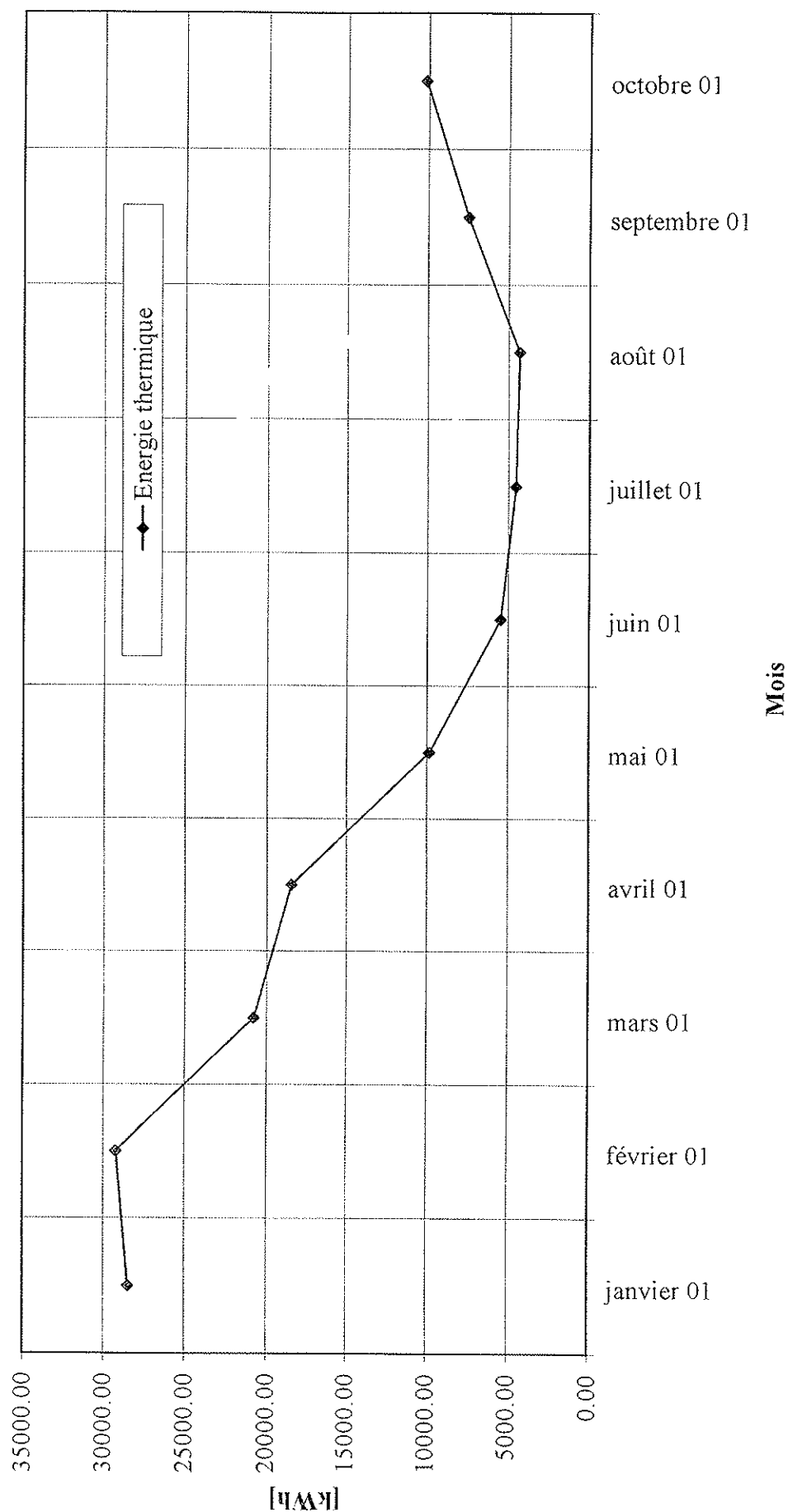
Relevé des compteurs de marche pour la période du 1 novembre 2000 au 31 octobre 2001

	Marche ventilateur évaporateur (différence mois)	Marche pompe charge accumulateur (différence mois)	Marche compresseur étage 1 (différence mois)	Marche compresseur étage 2 (différence mois)	Marche pompe évaporateur (différence mois)
Position	C2a	C4	C6a	C6b	C1
Unité	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]
novembre 00	10.23	512.92	718.42	447.90	501.30
décembre 00	10.24	556.27	747.95	502.95	568.05
janvier 01	10.25	356.39	431.77	330.61	351.79
février 01	10.26	245.78	226.05	225.95	244.26
mars 01	509.53	731.23	572.07	571.71	725.84
avril 01	837.05	1065.08	855.78	855.54	1056.06
mai 01	1071.50	104.54	70.71	75.19	102.83
juin 01	1210.43	257.09	124.10	131.52	254.04
juillet 01	46.49	58.98	40.29	40.40	57.50
août 01	97.70	139.99	94.23	94.20	136.40
septembre 01	224.93	284.00	197.10	196.95	277.34
octobre 01	402.20	460.66	323.43	323.17	450.07
Totaux	4440.81	4772.94	4401.88	3796.10	4725.48

Consommation électrique moyenne totale durant la période du 1 novembre 2000 au 31 octobre 2001

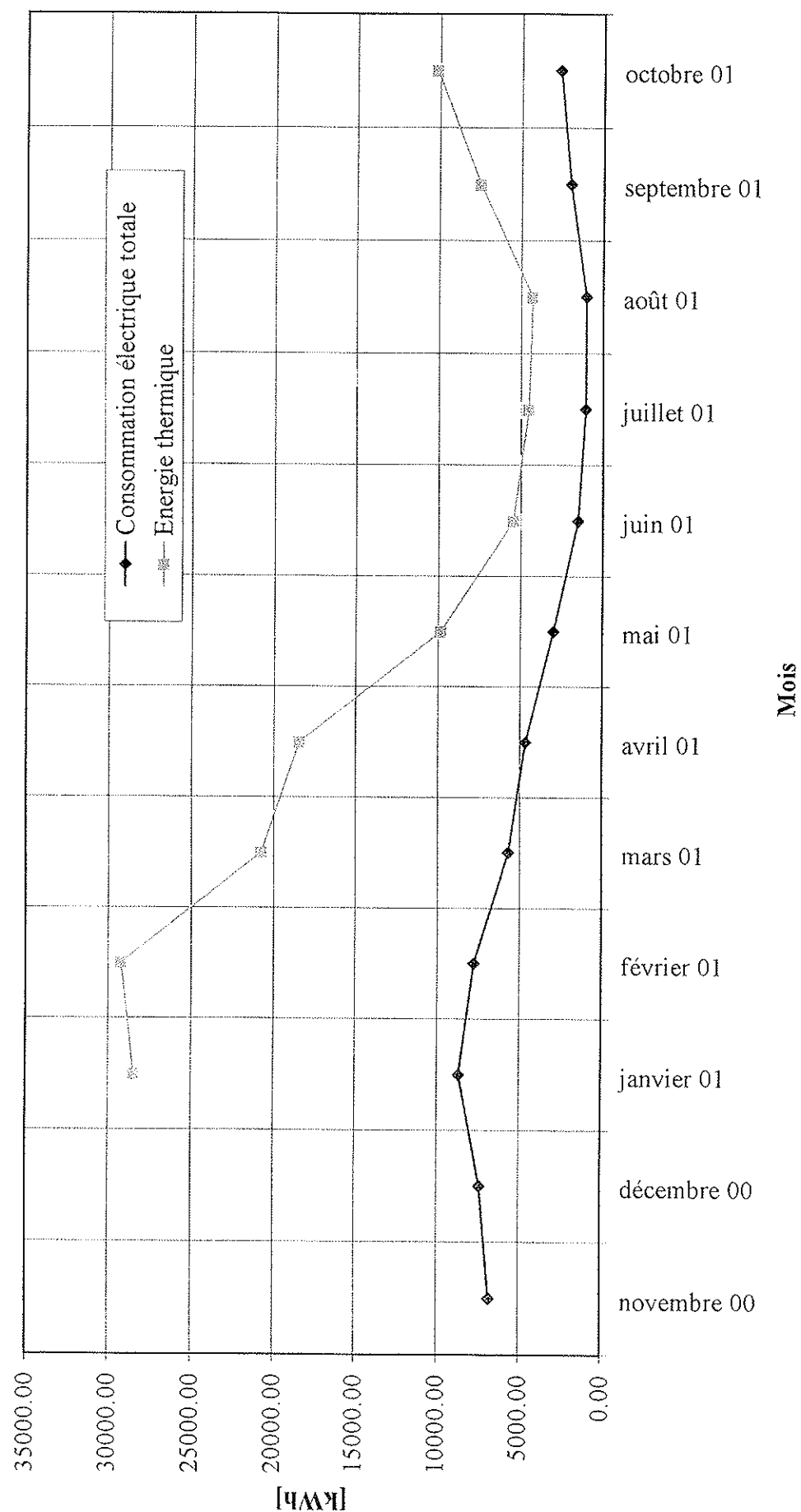


Production d'énergie moyenne durant la période du 1 novembre 2000 au 31 octobre 2001



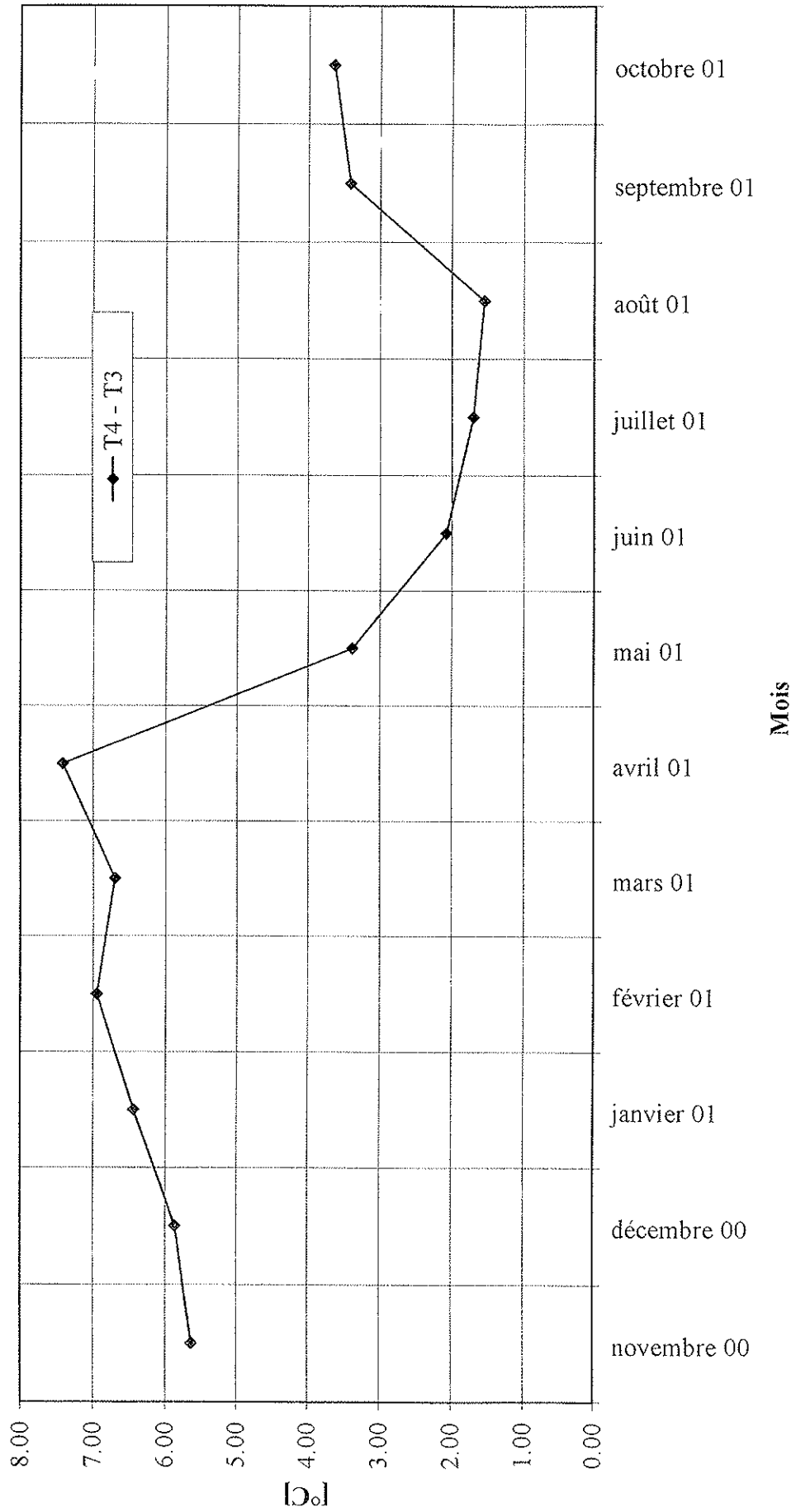
Comparatif entre la production moyenne et la consommation moyenne durant la période du 1 novembre

2000 au 31 octobre 2001



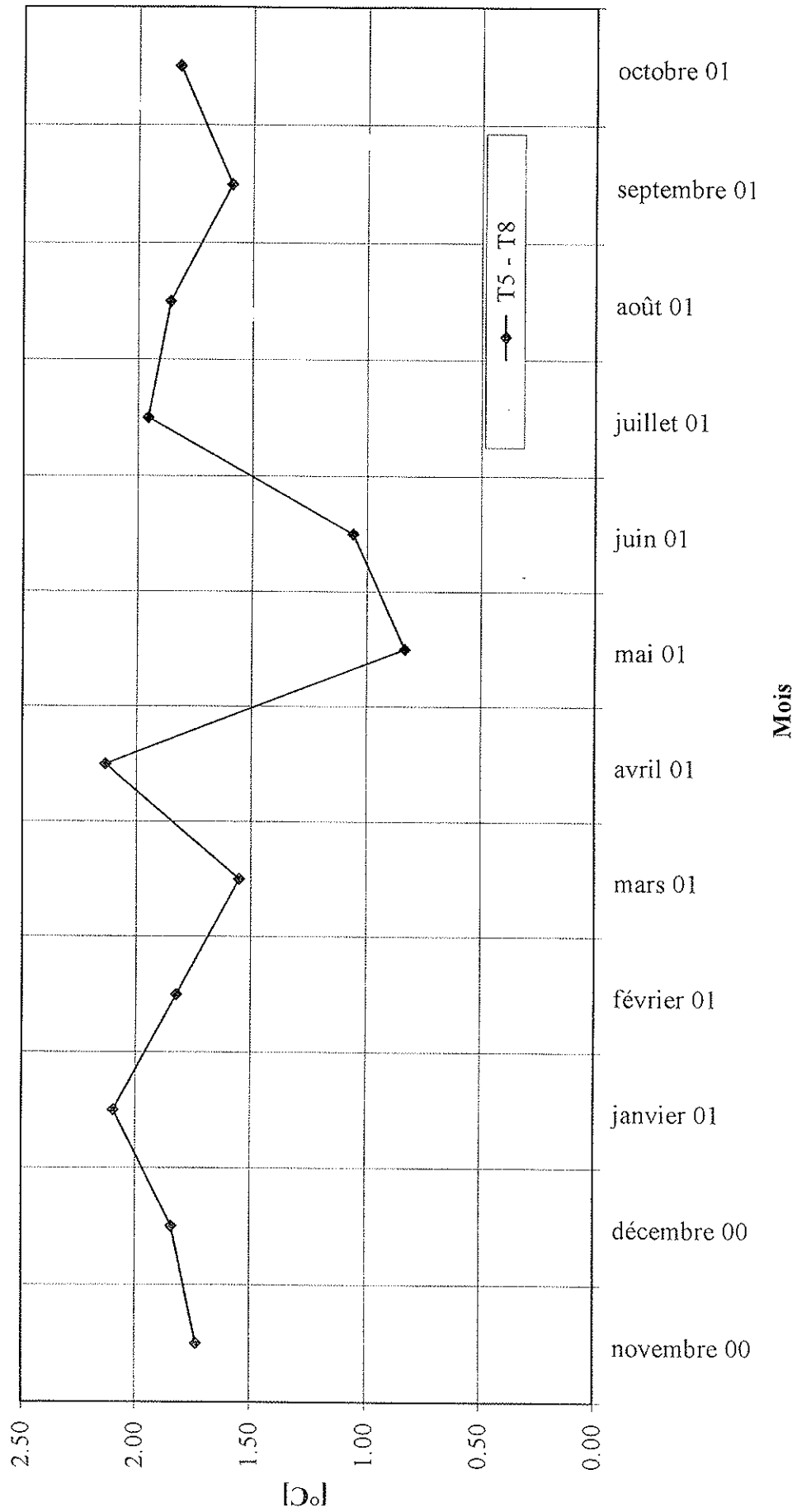
Différence de température moyenne mensuelle entre le départ le le retour de la charge du ballon du 1

novembre 2000 au 31 octobre 2001



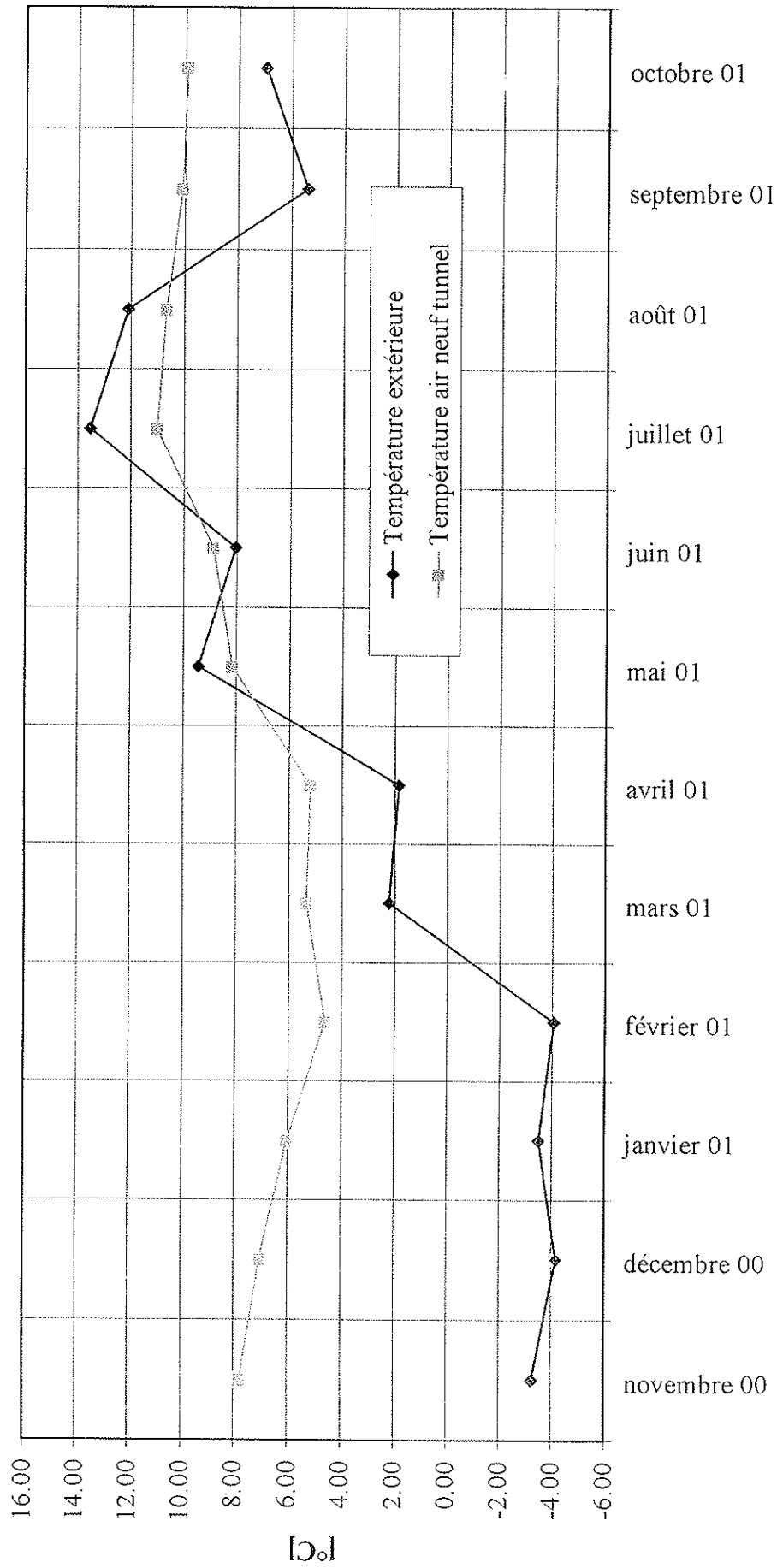
Différence de température moyenne entre l'entrée et la sortie de la PAC du 1 novembre 2000 au 31

octobre 2001



Température extérieure moyenne et température moyenne à l'intérieur du tunnel à 1500 m du 1 novembre 2000

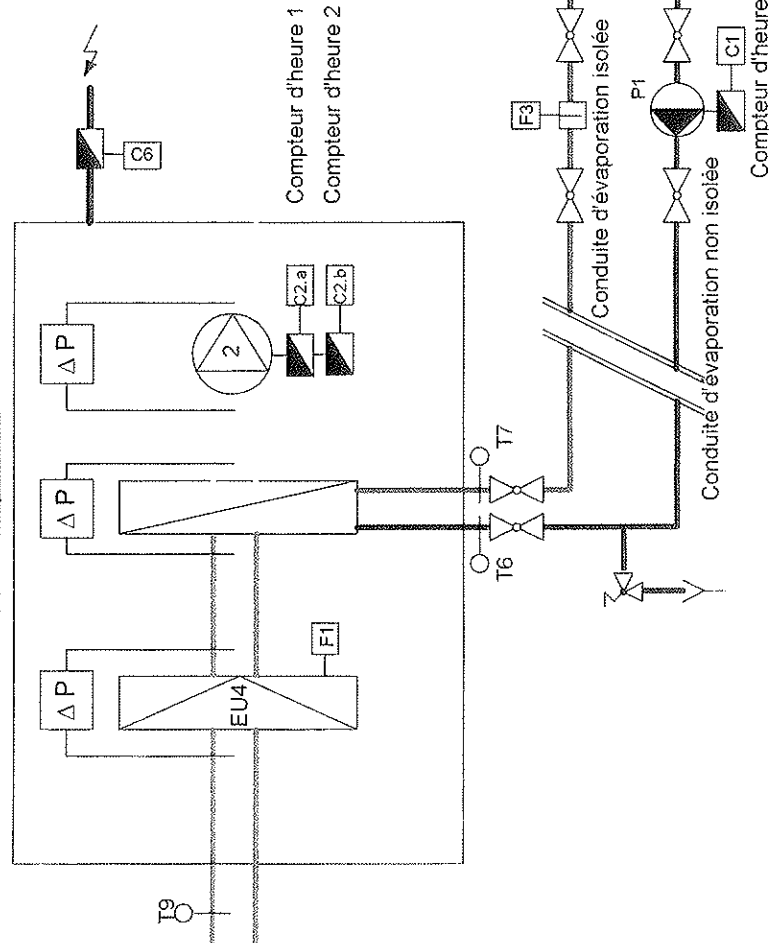
au 31 octobre 2001



Mois

Dessiné par	Date
Roulier A	05.02.01
Roulier A	17.05.01
Roulier A	13.06.01
Echelle	-/-
Dessin N°	96007_CH_S2_E

Monobloc d'évaporation



Légende :

- T1 = Sonde de température haut ballon
- T2 = Sonde de température bas ballon
- T3 = Sonde de température retour ballon
- T4 = Sonde de température départ ballon
- T5 = Sonde de température conduite évaporation sortie PAC
- T6 = Sonde de température conduite évaporation entrée Monobloc
- T7 = Sonde de température conduite évaporation sortie Monobloc
- T8 = Sonde de température conduite évaporation entrée PAC
- T9 = Sonde de température de l'air dans le tunnel à 1500 m
- T10 = Sonde de température extérieur
- C1 = Compteur d'heures pompe conduite évaporation
- C2 = Compteur d'heures ventilateur monobloc d'évaporation
- C3 = Compteur d'énergie de la PAC en KW/h
- C4 = Compteur d'heures de la pompe de charge de l'accumulateur
- C5 = Compteur de débit (puissance fournie par la PAC)
- C6 = Compteur électrique évaporateur
- R1 = Régulateur PAC
- F1 = Filtre monobloc évaporateur (filtre à air)
- F2 = Filtre conduite de charge du ballon
- F3 = Filtre conduite évaporateur

