

# LESO-PB

**Plafonds refroidissants à l'ICOM - Mesures  
de température, humidité et confort**

Eggimann J.-P.  
Roulet C.-A.

**Rapport interne**

**Nov. 1999**



ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

INSTITUT DE TECHNIQUE DU BÂTIMENT  
LABORATOIRE D'ÉNERGIE SOLAIRE ET DE PHYSIQUE DU BÂTIMENT

# **PLAFONDS REFROIDISSANTS À L'ICOM**

**MESURES DE TEMPÉRATURE, HUMIDITÉ ET CONFORT**

J.-P. Eggimann, C.-A. Roulet

22 novembre 1999

# PLAFONDS REFROIDISSANTS À L'ICOM

## MESURES DE TEMPÉRATURE, HUMIDITÉ ET CONFORT

### Table des matières

<b>Introduction.....</b>	<b>3</b>
<b>But des mesures.....</b>	<b>3</b>
<b>Description des bureaux et des mesures .....</b>	<b>4</b>
<i>Fonctionnement d'un plafond refroidissant .....</i>	<i>4</i>
<i>Bureaux étudiés et points de mesure.....</i>	<i>4</i>
<i>Qualité des mesures / des réponses aux questionnaires .....</i>	<i>5</i>
<i>Période de mesures.....</i>	<i>5</i>
<b>Climat.....</b>	<b>6</b>
<b>Mesures.....</b>	<b>8</b>
Différence entre locaux de même type.....	9
<i>Température.....</i>	<i>9</i>
<i>Température de rosée .....</i>	<i>9</i>
<i>Humidité relative .....</i>	<i>9</i>
Valeurs moyennes journalières .....	12
<i>Ensoleillement.....</i>	<i>12</i>
<i>Température des bureaux .....</i>	<i>13</i>
<i>Humidité .....</i>	<i>14</i>
<i>Panneaux refroidissants.....</i>	<i>16</i>
Semaine extrême .....	17
Enquête par questionnaires.....	20
<i>Statistiques .....</i>	<i>20</i>
<i>Confort thermique.....</i>	<i>20</i>
<i>Stores et éclairage artificiel.....</i>	<i>23</i>
<i>Fenêtres et portes.....</i>	<i>24</i>
Mesures des week-ends .....	25
Fonctionnement technique de l'installation de refroidissement.....	29
<b>Conclusions.....</b>	<b>32</b>
<b>Annexe 1: Références.....</b>	<b>33</b>
<b>Annexe 2: Questionnaire: Appréciation du confort et utilisation des installations techniques</b>	<b>34</b>
<b>Annexe 3: Notions de confort thermique.....</b>	<b>35</b>

## Introduction

De nombreux bureaux de l'EPFL ont un confort thermique insatisfaisant en été. Leur orientation ouest et la faiblesse de leur protection solaire provoquent des surchauffes importantes et fréquentes durant les mois d'été.

Une installation prototype de refroidissement par plafonds froids a été réalisée en juillet 1999 dans les bureaux 475, 485, 495 et 505 de l'ICOM (Institut de construction métallique) du DGC (Département de génie civil) dans le but de rendre ces bureaux à nouveau confortable durant l'été.

Si l'installation prototype se révèle efficace et avantageuse, d'autres bureaux de l'EPFL pourrait en être équipés.

## But des mesures

Le but général des mesures est de déterminer si l'installation effectuée suffit ou non à améliorer sensiblement le confort des bureaux. Plus précisément:

- la surface de panneaux refroidissants est-elle suffisante?
- une régulation centrale (pour l'ensemble des bureaux) est-elle adaptée malgré une charge thermique différente et un comportement différent des occupants?
- les températures de fonctionnement sont-elles suffisamment basses pour apporter la puissance de froid nécessaire et suffisamment élevée pour éviter la condensation?
- la régulation et ses sondes de mesure sont-elles efficaces?
- le type de store (toile ou lamelles) a-t-il une influence sur le confort thermique?

Les moyens utilisés pour répondre à ces questions sont:

- des enregistrements quadri-horaires du climat intérieur (température, humidité) des bureaux refroidis et de locaux non refroidis durant leur utilisation usuelle;
- les mêmes enregistrements dans des conditions particulières (fenêtre, store) en absence d'occupants;
- des enregistrements quadri-horaires du climat extérieur (température, humidité, ensoleillement);
- des enquêtes bi-journalières au moyen d'un questionnaire auprès des occupants sur le confort ressenti et sur l'utilisation des équipements (fenêtre, store, éclairage, porte).

## Description des bureaux et des mesures

### Fonctionnement d'un plafond refroidissant

Un plafond refroidissant est composé de plusieurs panneaux métalliques fixés horizontalement au plafond (ou formant un faux-plafond). De l'eau froide circule dans ces panneaux qui ainsi refroidissent l'ambiance par convection avec l'air et par rayonnement avec les surfaces environnantes (principalement sol et meubles).

A l'EPFL, l'eau froide des panneaux a été refroidie par passage à travers un échangeur de chaleur dont le circuit primaire est l'eau du lac, puisée à une profondeur suffisante pour être constamment froide.

Une régulation disposant de sondes de mesure de la température extérieure, des températures aller et retour de l'eau et du risque de condensation à la surface des plafonds refroidissants contrôle et règle la température de l'eau.

### Bureaux étudiés et points de mesure

Tous les bureaux étudiés sont orientés à l'ouest et ont une surface de 24 m<sup>2</sup>. Chaque panneau de refroidissement à une surface de 2,05 m<sup>2</sup>.

Bureau n°	Panneaux de refroidissement	Type de store	Type d'éclairage	Type de fenêtre	Nb. d'occupants	Mesures	Questionnaires
515	0	lamelles	plafonnier	standard	2	température humidité relative (point de rosée)	confort utilisation éclairage, store, fenêtre, porte
505	5	lamelles	plafonnier	standard	1		
495	4	lamelles	plafonnier	standard guichet	1		
485	4	lamelles	lampadaire	standard guichet	1		
475	5	toile	lampadaire	standard	1		
465	0	toile	plafonnier	standard	1 ½		

Dans les locaux les senseurs de température et d'humidité sont placés sur les bureaux (soit à environ 80 cm du sol), donc le plus près possible de l'emplacement des occupants. Ce qui signifie que, d'un bureau à l'autre, la position des senseurs n'est pas forcément la même.

En particulier, dans le bureau 465, les senseurs reçoivent parfois le soleil à un moment précis de la journée (entre 17h30 et 18h30) ce qui provoque une pointe de température mesurée plus importante que la pointe de température réelle. En conséquence, l'humidité relative et la température de rosée présente des très fortes pointes vers le bas.

#### Autres points de mesures

Couloir	température
Vide de faux-plafond, entre bureaux 505 et 515	humidité relative
Vide de faux-plafond, entre bureaux 485 et 495	température
Extérieur	température humidité relative rayonnement global vertical ouest
Réseau d'eau des panneaux	température de départ température de retour débit

**Qualité des mesures / des réponses aux questionnaires**

	Fréquence de mesures	Résolution	Précision
température d'air	15 minutes	0,2°C	± 0,2°C *
température d'eau	3 minutes	0,2°C	± 0,2°C *
humidité relative	15 minutes	~ 1.4%hr	± 5%hr *
rayonnement solaire	3 minutes	~ 80 W/m <sup>2</sup>	± 30 W/m <sup>2</sup> *
température de rosée	15 minutes	~ 0,5°C	± 1,5°C *
débit	3 minutes	~ 1 l/h	± 50 l/h **
confort	2 fois / jour	1 PMV (échelle de confort)	± 0,5 PMV
utilisation de l'éclairage	2 fois / jour	éteint / allumé	***
utilisation des stores	2 fois / jour	levé / baissé	***
utilisation des fenêtres	2 fois / jour	fermée / ouverte	***
utilisation des portes	2 fois / jour	fermée / ouverte	***

\* Sur la base des calibrations effectuées avant et après les mesures.

\*\* Sur la base des indications du fabricant.

\*\*\* Taux de retour des questionnaires supérieur à 95%, mais lorsque 2 personnes sont dans le même bureau, leurs réponses à, par exemple, la question "la fenêtre est-elle ouverte ou fermée" ne correspondent pas toujours!

**Période de mesures**

Jours complets de mesures: du 28 juillet ou 28 septembre (= 63 jours), à l'exception de:

- humidité relative du bureau 485: seulement jusqu'au 9 septembre;
- humidité relative du couloir: seulement jusqu'au 16 septembre;
- débit : seulement depuis le 11 septembre.

Période d'enquête (questionnaires): du 26 juillet au 1<sup>er</sup> octobre (= 10 semaines).

## Climat

Afin de savoir si les mesures ont été faites dans des conditions normales, on trouve ci-dessous et en page suivante la comparaison du climat mesuré et du climat théorique moyen pour la période du 28 juillet au 28 septembre (63 jours; 1513 valeurs horaires).

	<i>Référence</i>			<i>Mesures</i>
	MeteorNorm version 4	SIA D012	(SIA 381/2)	
Lieu altitude	Ecublens 410 m	Genève-Cointrin 416 m	(Genève) (405 m)	Ecublens ~400 m
<i>Valeurs moyennes:</i>				
Température extérieure	18,0 °C	16,0 °C	(17,7°C)	19,9 °C
Point de rosée	12,0 °C	12,8 °C		12,5 °C
Rayonnement global vertical ouest	115 W/m <sup>2</sup>	–	(105 W/m <sup>2</sup> )	98 W/m <sup>2</sup>
<i>Valeurs maximales:</i>				
Température extérieure	32,1 °C	~33,5 °C		30,3 °C
Température de rosée	18,1 °C	~21,5 °C		18,4 °C

Le climat durant la période de mesure apparaît en moyenne plus chaud que la norme mais avec des maxima moins extrêmes.

L'humidité semble être "dans la norme" bien que l'impression, subjective, des gens et en particulier des professionnels des installations techniques du bâtiment, donne l'été comme plus humide que habituellement.

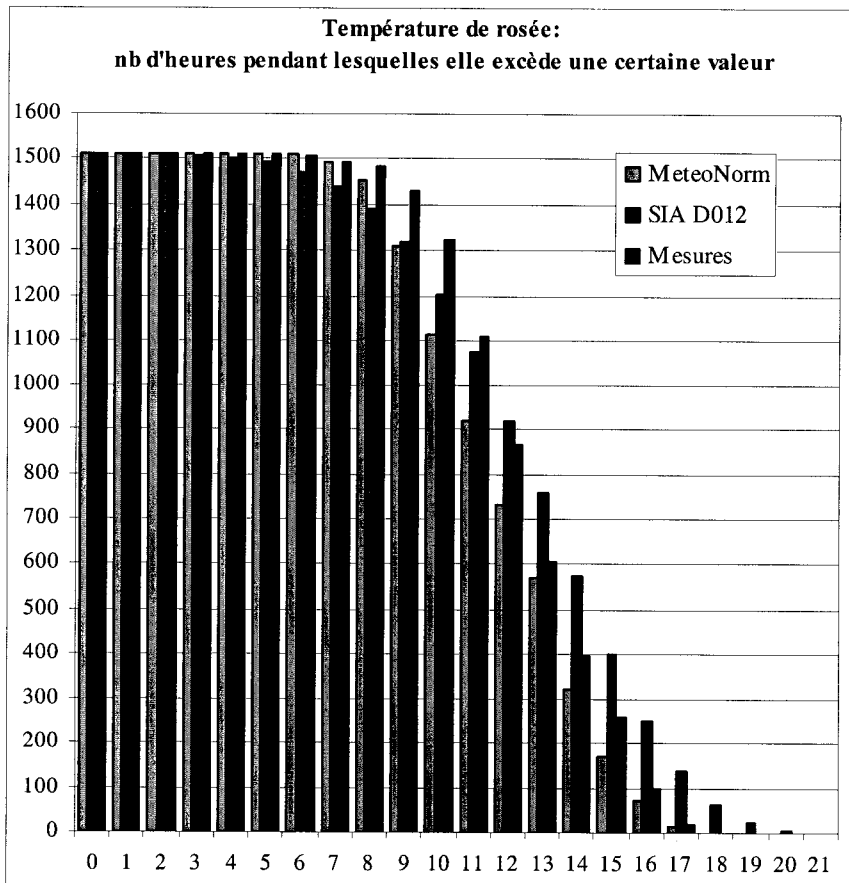
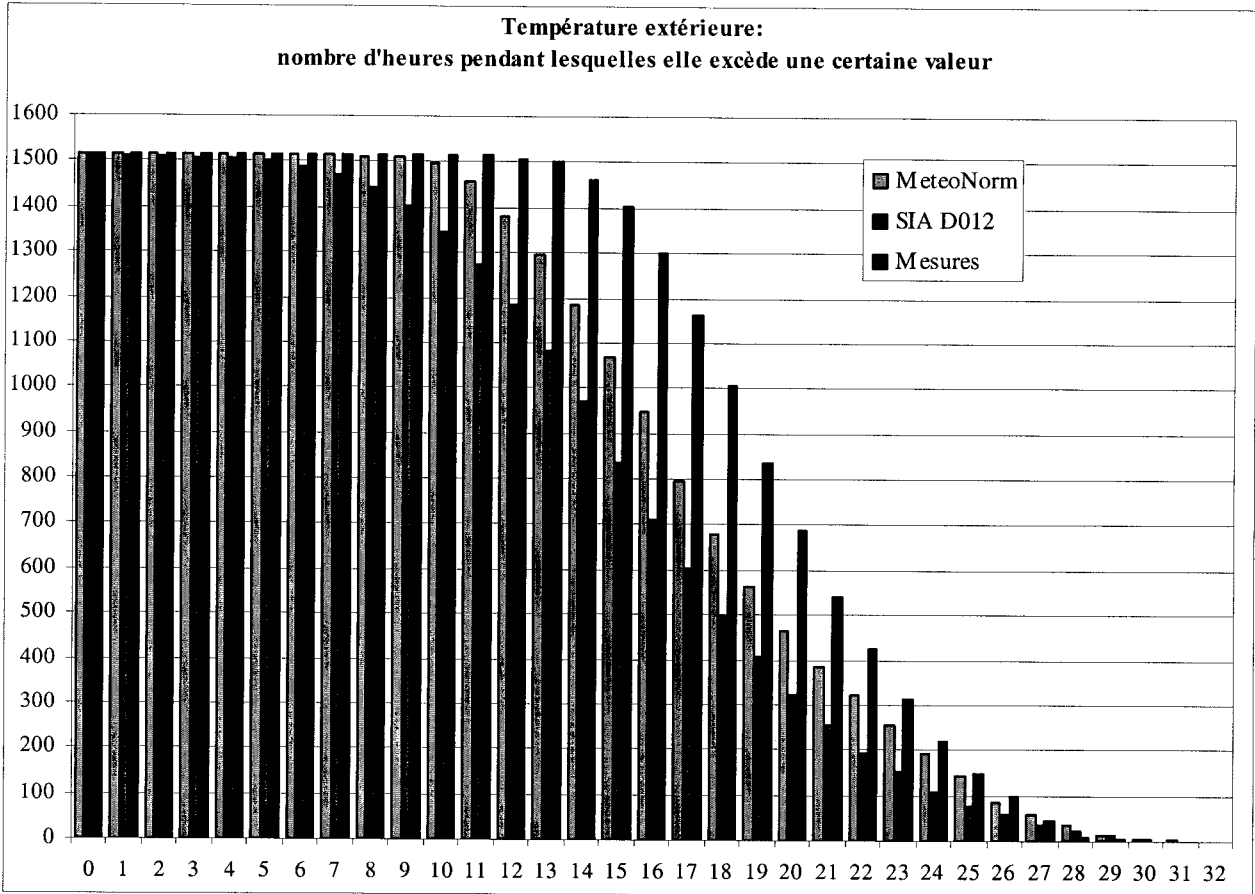
Il convient d'être prudent lorsqu'on compare le climat mesuré à certaines références.

MeteoNorm a été développé pour donner en tout point de Suisse des données climatiques de température extérieure et d'ensoleillement. Les données d'humidité sont une option secondaire de MeteoNorm, nettement moins bien validée que les données de base.

La recommandation SIA D012 a été prévue pour le dimensionnement d'installation de ventilation et de climatisation. Les valeurs de température extérieure et d'humidité peuvent contenir une marge de sécurité.

Malgré les inévitables différences avec un climat théorique moyen, le climat durant la période de mesure est assez représentatif du climat standard à Ecublens.

Figures 1a, 1b: Fréquences cumulées des valeurs (du 28 juillet au 28 septembre)





## Mesures

De très nombreuses mesures ont été enregistrées. Il est sans intérêt, voire impossible, de présenter toutes les valeurs. Les chapitres suivants présentent des extraits de ces mesures.

Le chapitre "Différence entre locaux de même type" montre qu'il y a peu de différence entre un bureau rafraîchi et un autre bureau rafraîchi; de même pour les locaux non rafraîchis. En conséquence, il est possible dans la suite de présenter uniquement les moyennes pour chaque type de bureaux.

Le chapitre "Valeurs moyennes journalières" présente différentes moyennes de toutes les grandeurs mesurées dans les locaux. Les moyennes sont effectuées soit sur l'ensemble des valeurs (96 mesures par jour) soit seulement du lundi au vendredi durant l'après-midi (17 mesures de 14:00 à 18:00) qui est la période critique pour le confort de ces bureaux. Le climat est chaque fois présenté selon les mêmes critères.

Le chapitre "Semaine extrême" montre l'évolution détaillée du climat intérieur des bureaux durant l'une des deux semaines particulièrement chaudes de la période de mesures. Les semaines 31 (du 2 au 8 août) et 34 (du 23 au 29 août) sont les plus caractéristiques d'un temps estival chaud, ensoleillé et passablement humide. Le fonctionnement à 100% de l'installation de refroidissement n'ayant pas été possible durant le début des mesures, la semaine choisie est donc celle du 23 au 29 août qui est la plus représentative.

Le chapitre "Enquête par les questionnaires" présente l'avis des occupants quant au confort ressenti dans les bureaux et comment ils ont utilisé les équipements (store, éclairage, fenêtre, porte) de leur bureau. L'annexe 2 montre le questionnaire qu'ils devaient remplir chaque semaine. L'annexe 3 rappelle les notions de confort utilisées dans ce rapport.

Le chapitre "Mesures des week-ends" présente les mesures particulières faites en absence des occupants.

Le chapitre "Fonctionnement technique de l'installation de refroidissement" montre l'évolution de la température de l'eau des panneaux refroidissants pour différentes situations et pour différents modes de fonctionnement de l'installation.

Les valeurs d'humidité sont toujours présentés sous deux formes:

- l'humidité relative,
- le point de rosée.

La température de rosée ou point de rosée ( $\theta_{rosée}$  [°C]) est calculée à partir de la température de l'air ( $\theta$  [°C]) et de l'humidité relative ( $\varphi$  [%]) selon la formule empirique suivante (valable au-dessus de 0°C):

$$\theta_{rosée} = \frac{4098,171}{\frac{4098,171}{237,3 + \theta} - \ln\left(\frac{\varphi}{100}\right)} - 237,3$$

L'homme est sensible à l'humidité relative. Afin d'assurer le confort dans les locaux, elle devrait rester en permanence entre 30% et 70%. Cette limite de 70% n'a jamais été dépassée durant toute la période de mesure.

Les panneaux refroidissants sont "sensibles" à la température de rosée. Pour éviter tout problème de condensation, les surface de ces panneaux ne doit jamais descendre à une température inférieure au point de rosée de l'air des bureaux.

### ***Différence entre locaux de même type***

Les différences de climat entre les locaux de même type sont en général assez faibles.

A titre d'exemple on trouve aux pages suivantes les courbes des valeurs moyennes journalières de l'ensemble des points mesurés, puis les moyennes sur l'ensemble de la période de mesure.

### **Température**

L'évolution des températures des bureaux refroidis est très proche. Celle des bureaux non refroidis présente parfois des écarts. Le couloir a une température semblable à celle des bureaux non refroidis. Les températures des faux-plafonds sont semblables à celles des bureaux refroidis, voire légèrement inférieures.

Les bureaux 475 et 505 ont tendance à être plus chauds que les bureaux 485 et 495. Cette situation est normale puisqu'ils se trouvent au bord de la zone refroidie et ont donc un bureau voisin non refroidi vers lequel part une partie de la fraîcheur apportée par les plafonds froids.

### **Température de rosée**

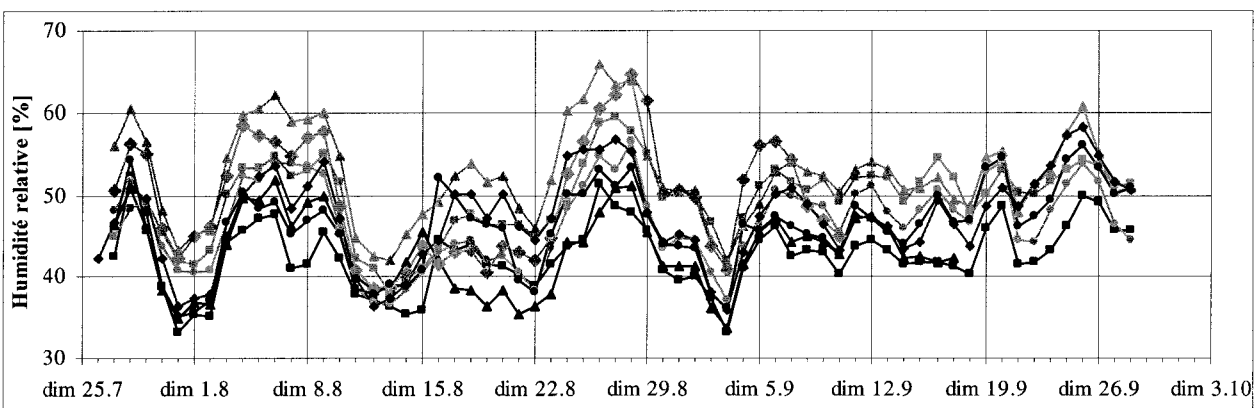
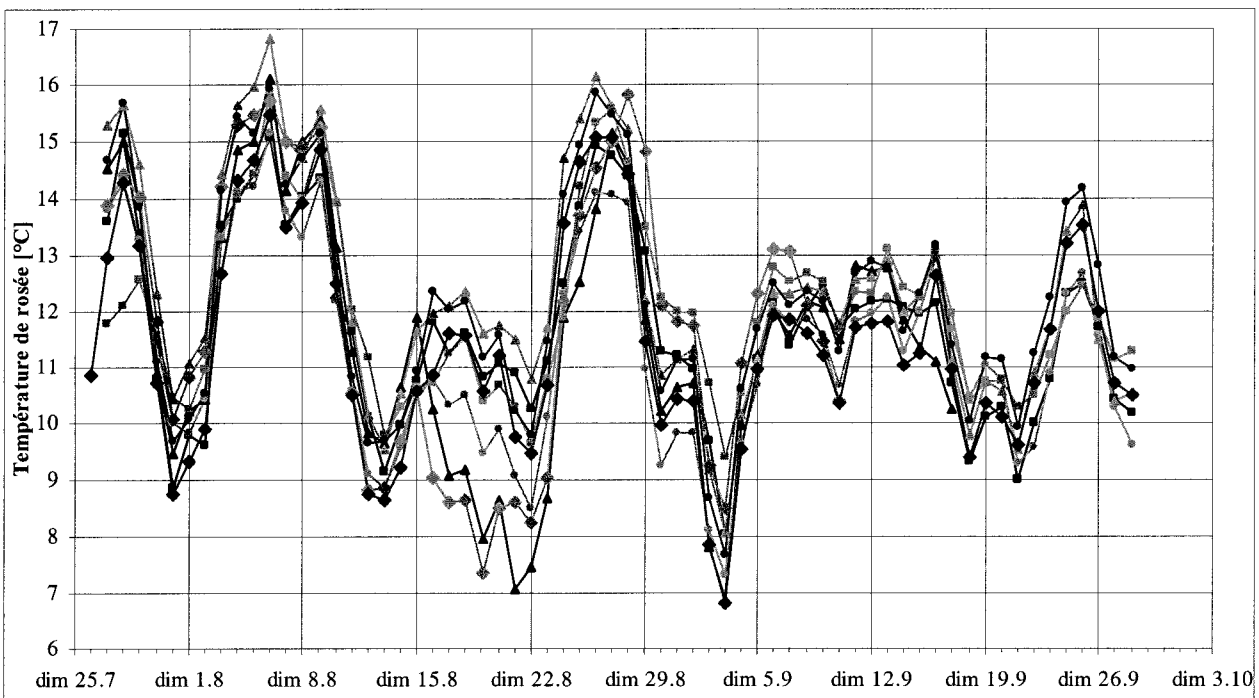
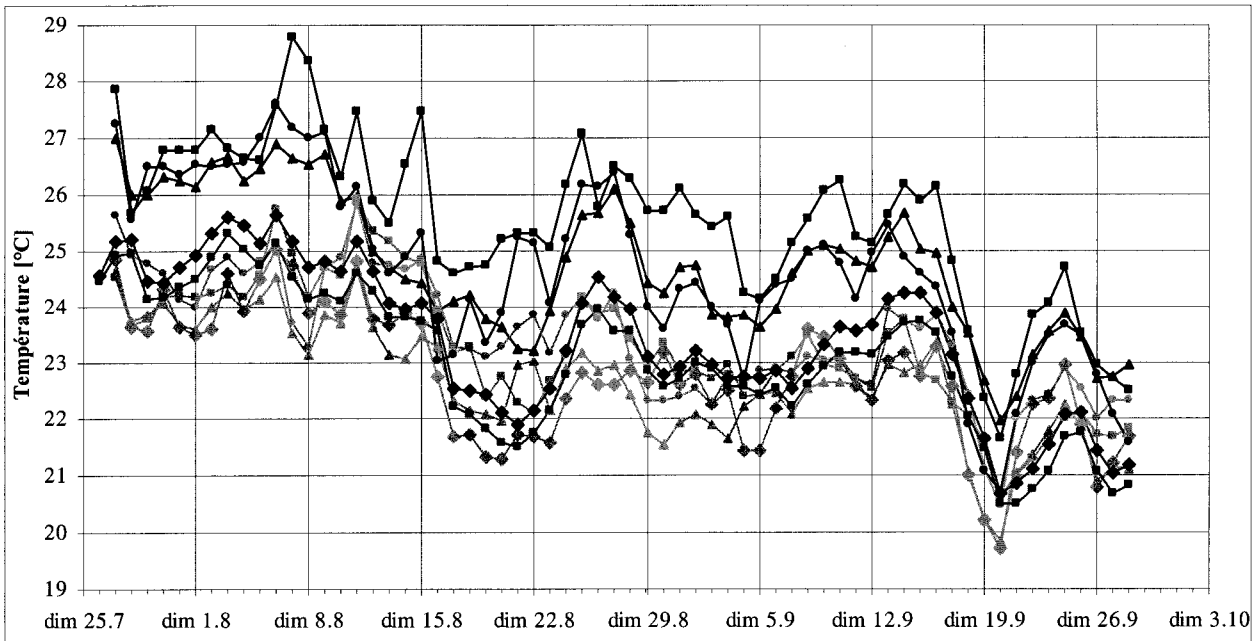
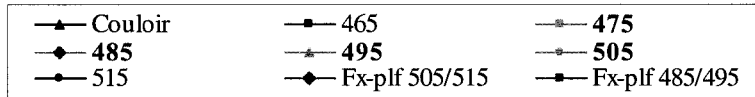
Compte tenu de la précision de cette mesure ( $\pm 1,5^\circ\text{C}$ ), l'évolution des températures de rosée de tous les points de mesure est la même. Ce qui signifie que les sources d'humidité dans les locaux sont faibles, ou que ceux-ci sont suffisamment ventilés pour que l'humidité supplémentaire disparaisse.

### **Humidité relative**

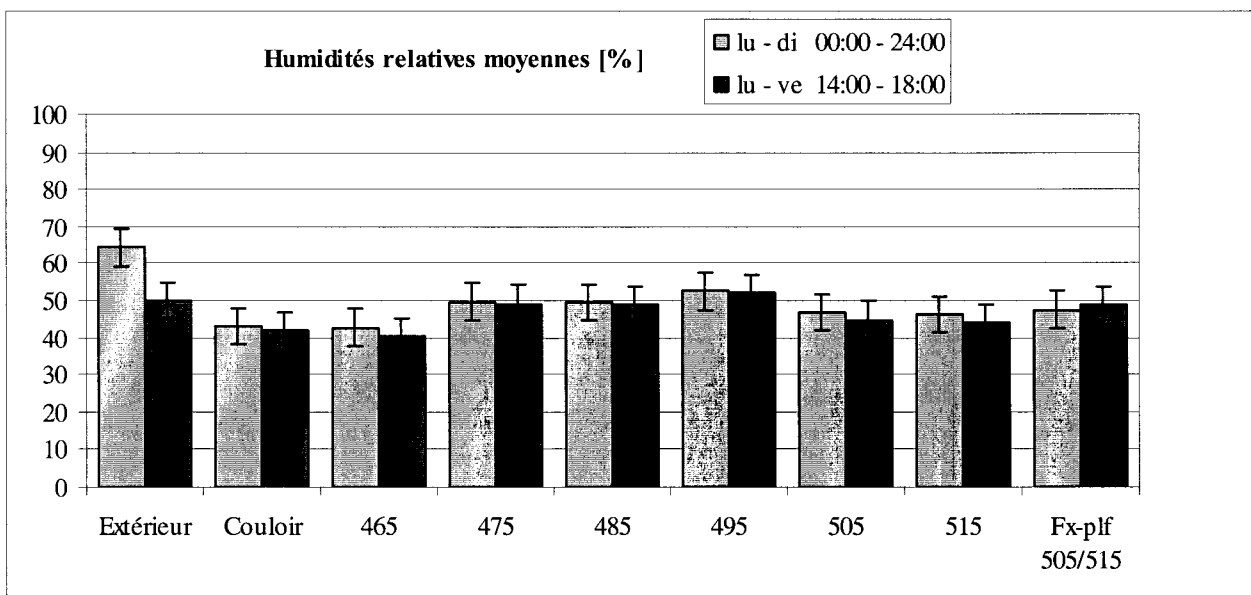
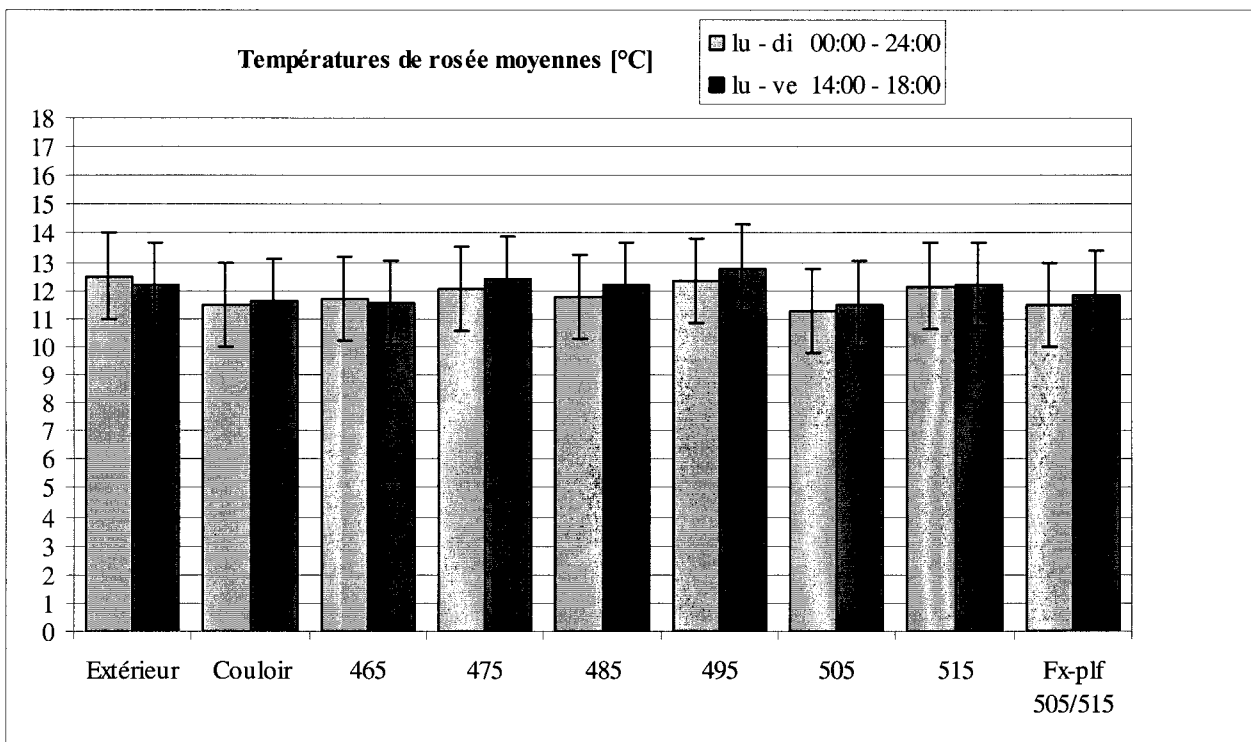
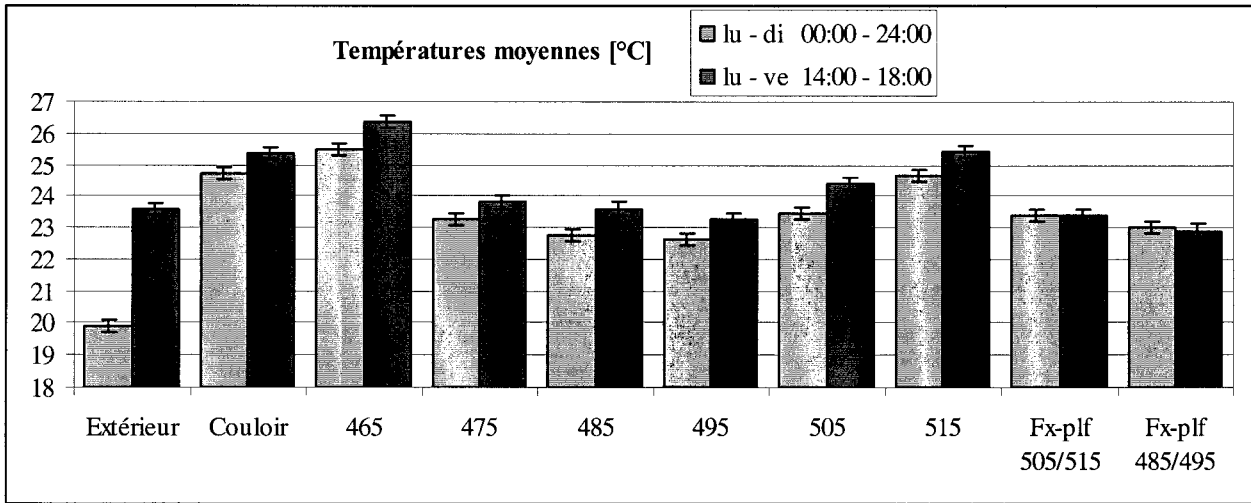
L'évolution de l'humidité relative de tous les locaux est presque la même. On note cependant une légère différence entre les locaux refroidis et les locaux non refroidis. Cet écart (5 à 10% HR) est à peine supérieur à la précision de mesure ( $\pm 5\%$  HR).

Pour une humidité absolue donnée, la température plus basse des locaux refroidis a pour conséquence d'augmenter leur humidité relative par rapport à celle des autres locaux. Par exemple, une température de rosée de  $15^\circ\text{C}$  correspond à une humidité relative de 51% à  $26^\circ\text{C}$  et de 61% à  $23^\circ\text{C}$ .

Figures 2a, 2b, 2c:  
 Valeurs moyennes journalières  
 (Lundi-vendredi 00:00 – 24:00)



Figures 3a, 3b, 3c: Valeurs moyennes sur toute la période de mesure (28 juillet au 28 septembre):



### Valeurs moyennes journalières

En valeur moyenne journalière (du lundi au dimanche, de 0h à 24h), on observe une différence de 2 à 3 °C entre les bureaux 475, 485, 495 et 505, refroidis, et les bureaux 465 et 515, non refroidis. Les moyennes limitées aux après-midi confirment, et accentuent légèrement, cette différence.

On voit nettement la différence de température des bureaux refroidis entre les 3 premières semaines de mesures et les semaines suivantes. Cette différence est due aux changements dans la régulation de l'installation.

La température des bureaux refroidis varie très peu en fonction de la température extérieure. La valeur plus basse du 20 septembre (Jeûne fédéral) est due à l'expérience du week-end (fenêtres des bureaux ouvertes) prolongée jusqu'au lundi. Les valeurs plus élevées des samedi 7 et dimanche 8 août dans les bureaux non refroidis s'explique aussi par l'expérience du week-end (store levé et fenêtre fermée dans le bureau 465, week-end ensoleillé et très chaud).

L'humidité ne présente rien de particulier (cf. chap. "Différence entre locaux de même type").

### Ensoleillement

Figure 4a: Lundi à dimanche, 0h à 24h (plus de 100W/m<sup>2</sup> est une valeur supérieure à la moyenne):

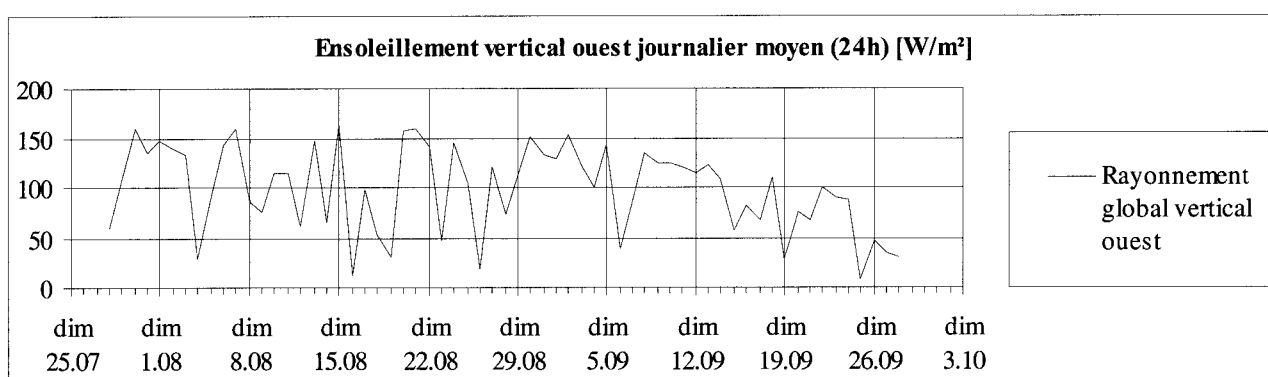
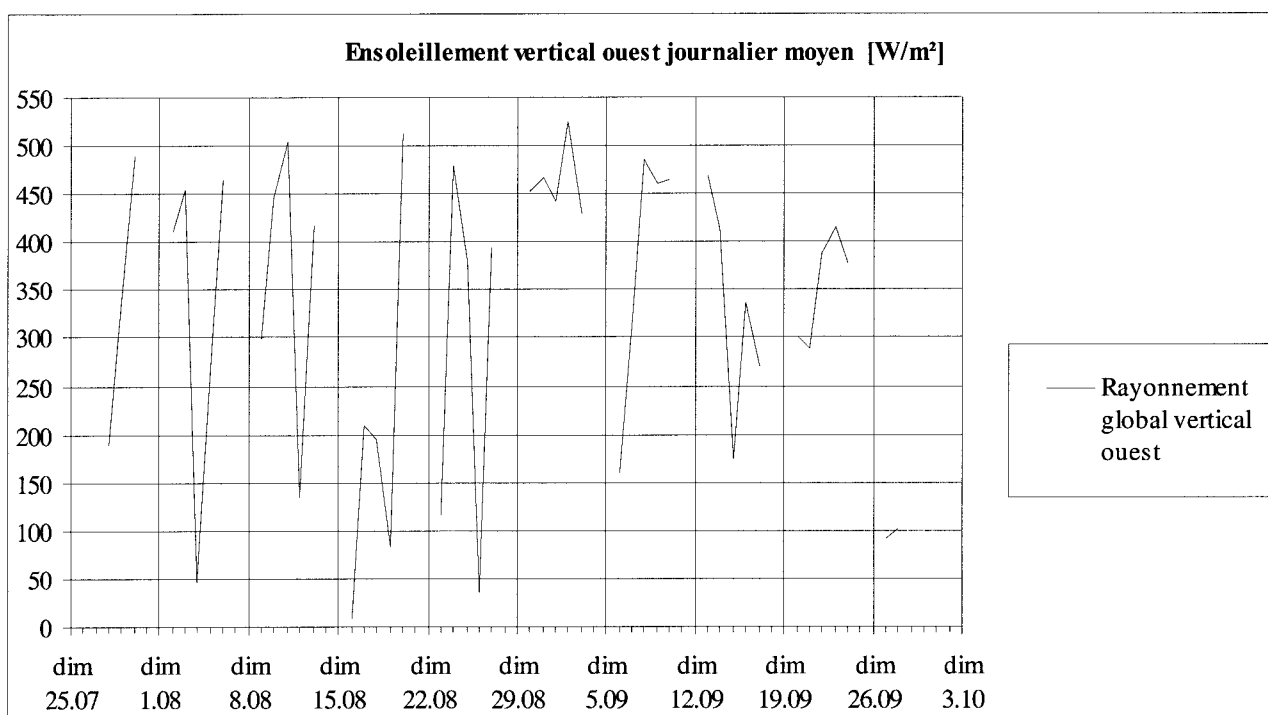


Figure 4b: Lundi à vendredi, 14h à 18h (plus de 350W/m<sup>2</sup> est une valeur supérieure à la moyenne):



## Température des bureaux

Figure 5a: Lundi à dimanche, 0h à 24h:

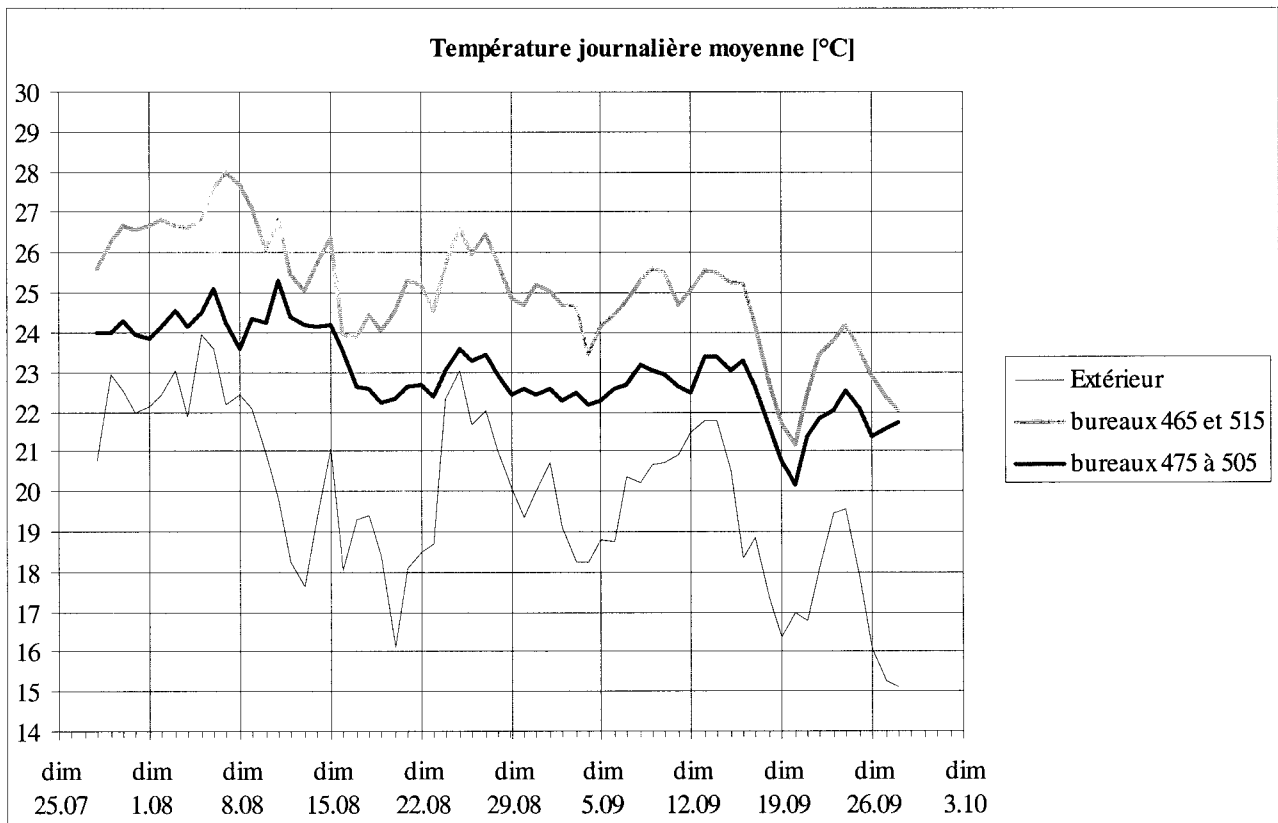
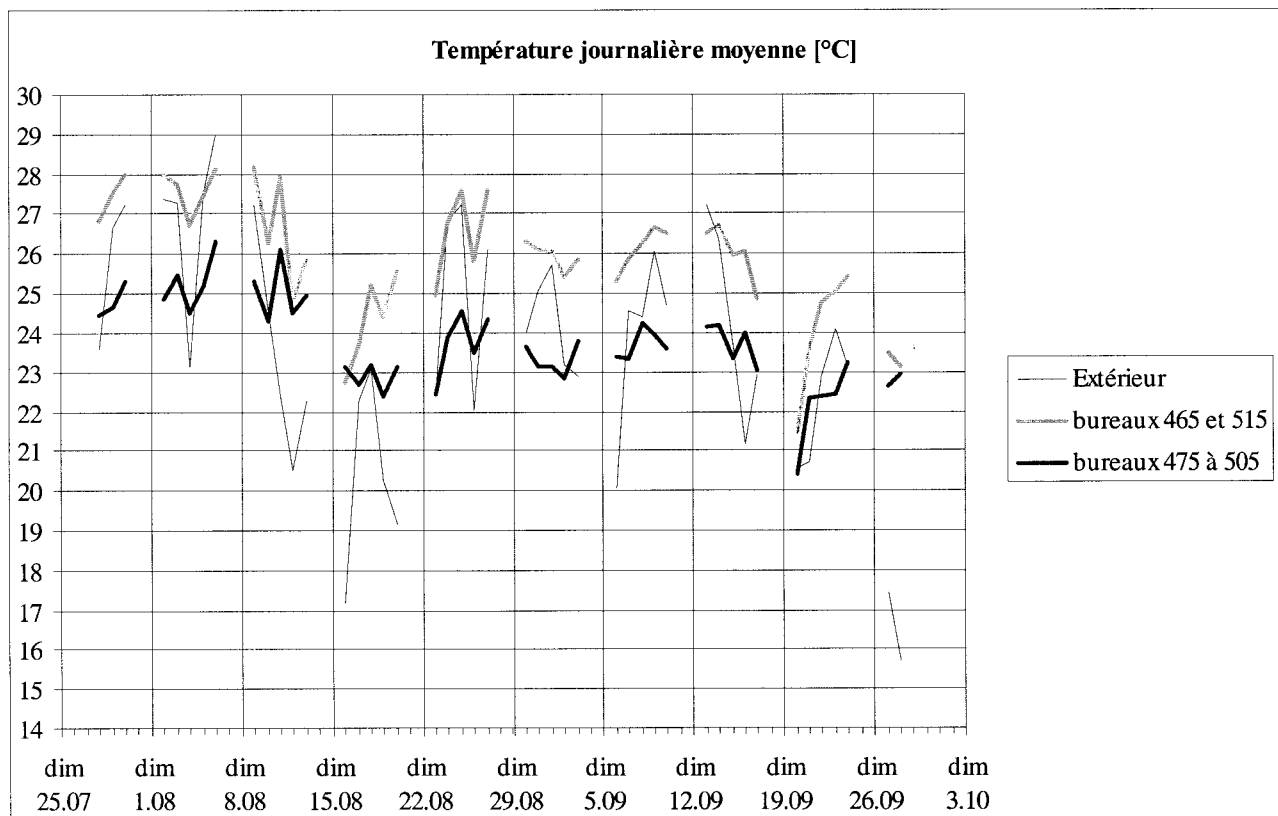


Figure 5b: Lundi à vendredi, 14h à 18h:



### Humidité

Figure 6a: Lundi à dimanche, 0h à 24h:

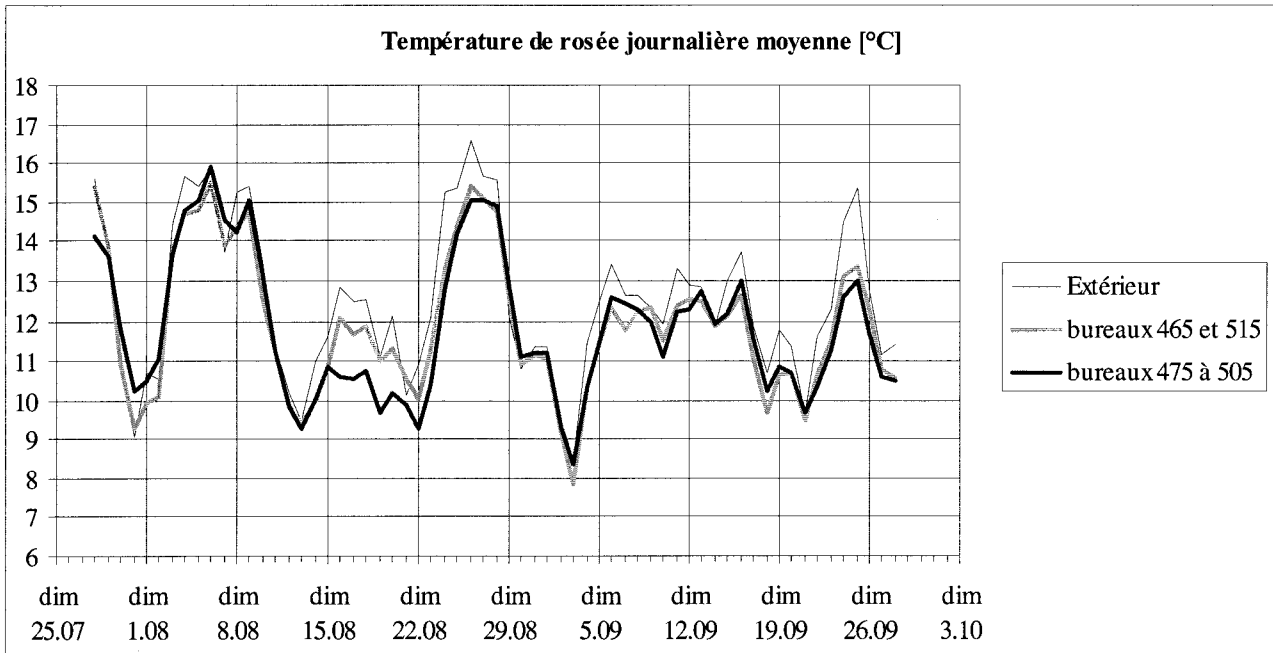


Figure 6b: Lundi à vendredi, 14h à 18h:

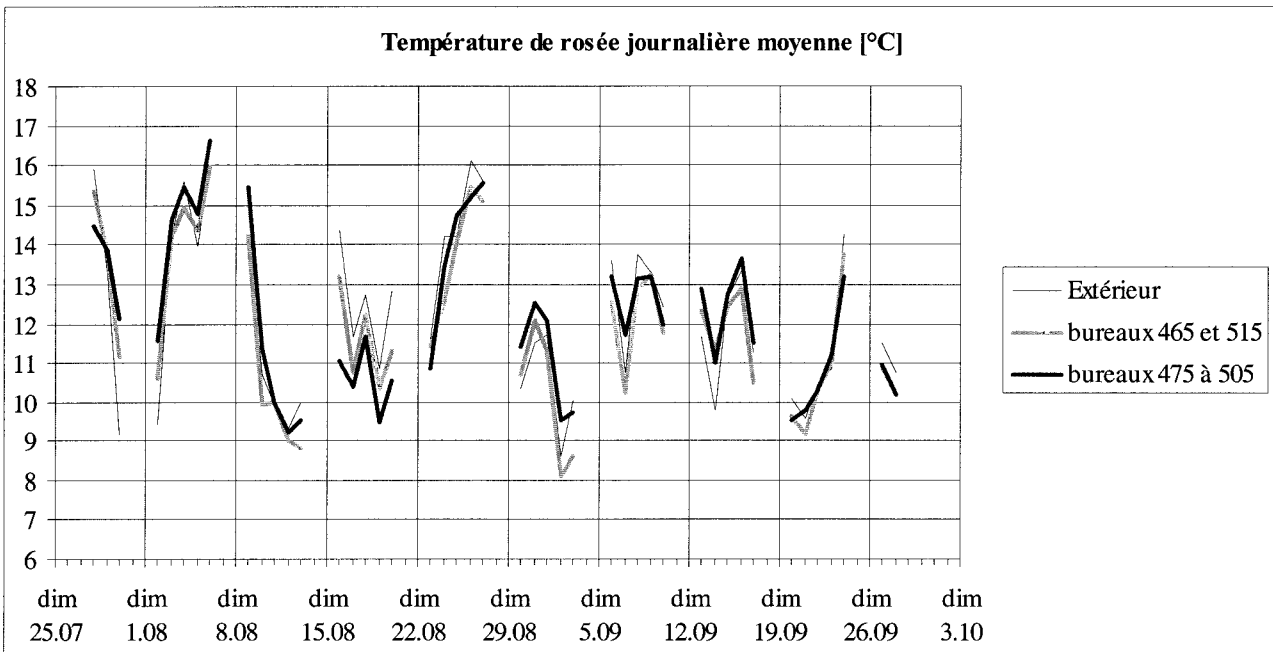


Figure 7a: Lundi à dimanche, 0h à 24h:

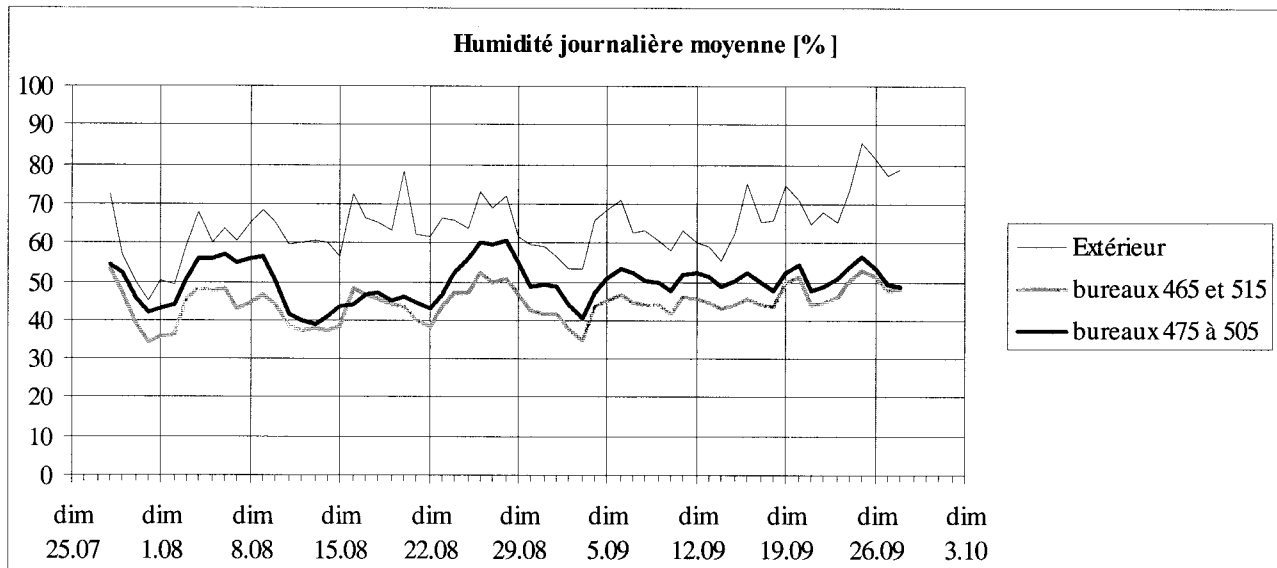
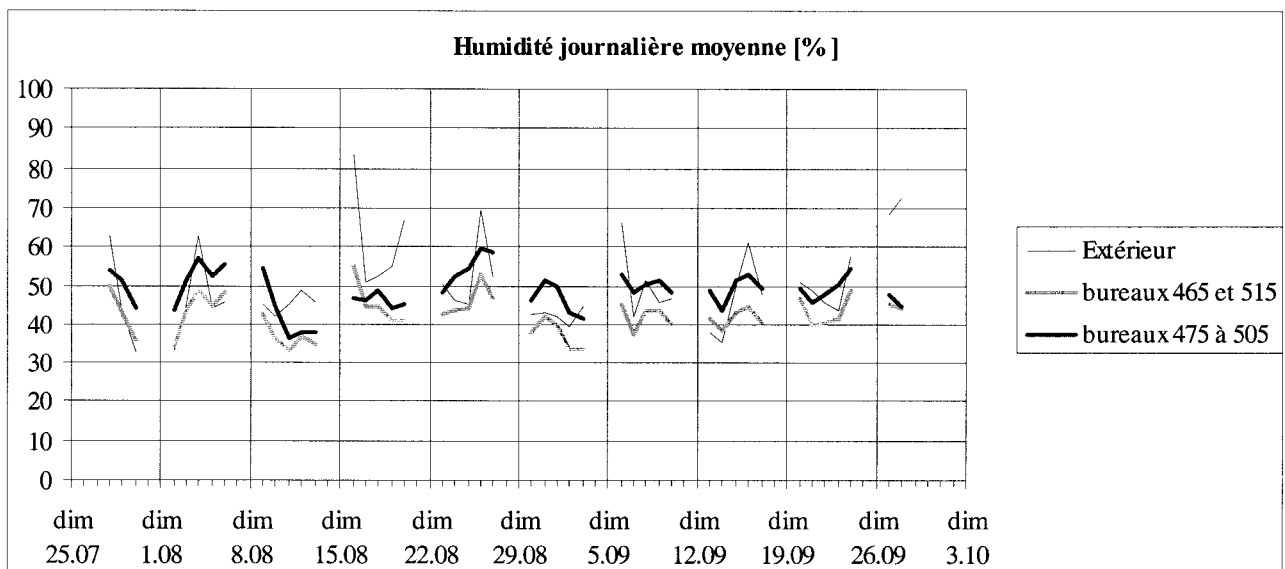


Figure 7b: Lundi à vendredi, 14h à 18h:



L'humidité absolue dépend très peu du local. L'humidité intérieure est même très proche de l'humidité extérieure. On peut s'attendre en général à une humidité intérieure supérieure à l'humidité extérieure, plus particulièrement par temps sec, soit en hiver.



**Panneaux refroidissants**

Figure 8a: Lundi à dimanche, 0h à 24h:

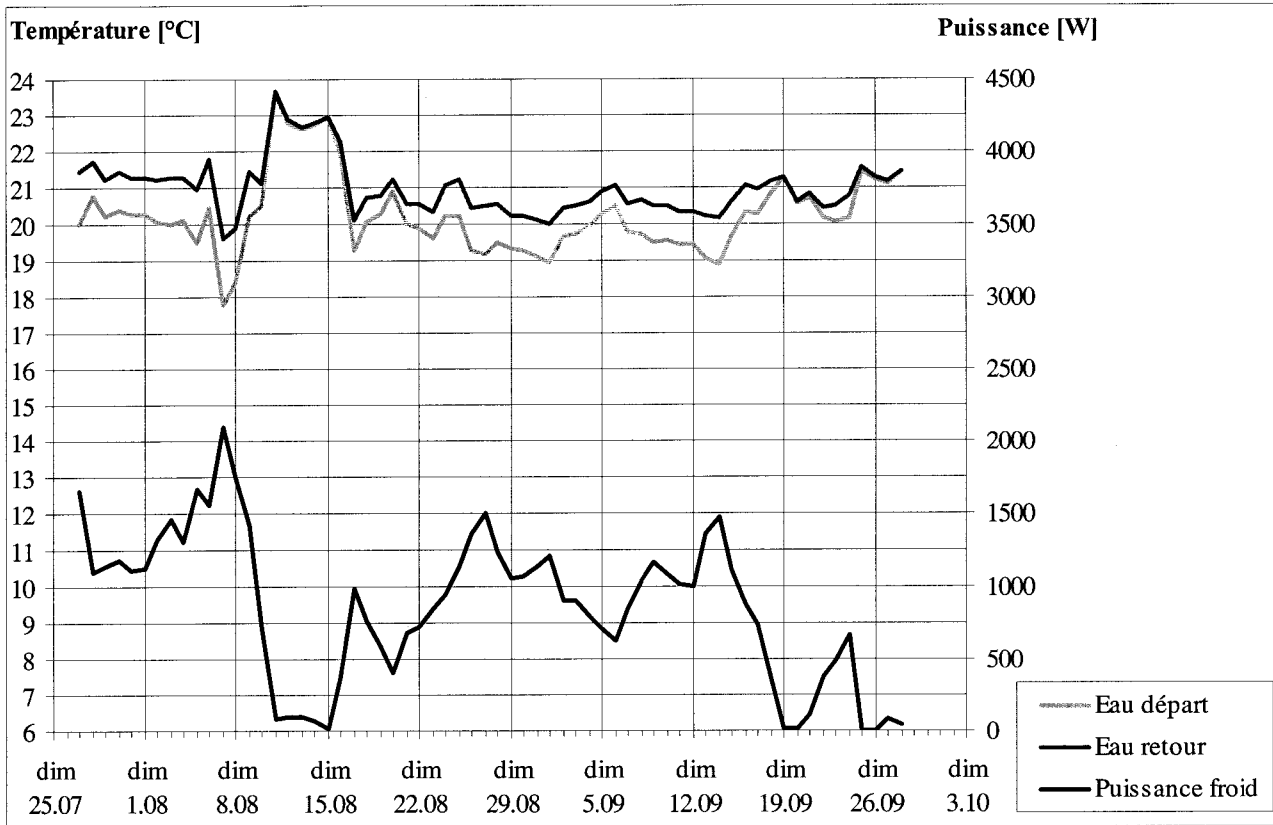
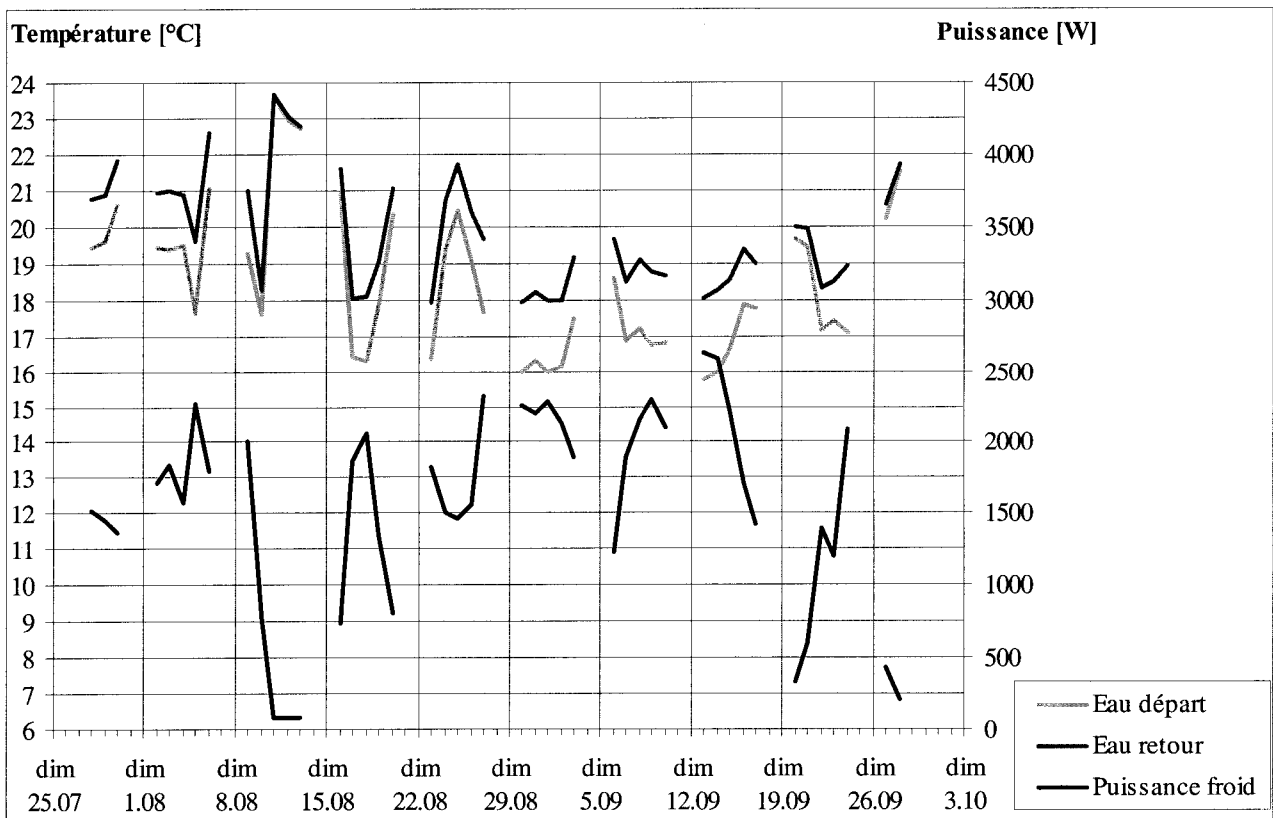


Figure 8b: Lundi à vendredi, 14h à 18h:



### *Semaine extrême*

La semaine extrême se caractérise par les journées de mardi, mercredi et vendredi ensoleillées, chaudes (26 à 28°C l'après-midi) et humides (température de rosée de 16 à 18°C).

La température des bureaux refroidis oscille entre 23 et 25°C tandis que celles des autres bureaux est entre 25 et 29°C. La baisse de température due aux plafonds refroidissants est de 3 à 4°C, ce qui fait toute la différence entre le confort et l'inconfort (voir Annexe 3).

L'humidité élevée a limité la puissance de refroidissement puisqu'à certains moments la température de départ de l'eau ne devait pas descendre en dessous de 18°C (même 19°C le samedi à midi). La sonde de risque de condensation a pleinement joué son rôle cette semaine-là. A aucun moment on n'a observé de condensation sur les panneaux refroidissants.

Les oscillations particulièrement rapides de la température de l'eau et de la puissance montrent que la régulation essaie à tout moment d'avoir une puissance plus élevée (température de départ plus basse) et que la sonde de risque de condensation contraint à rehausser la température. Après baisse de l'humidité relative à la surface du panneau le phénomène recommence.

Figure 9: Semaine extrême: ensoleillement:

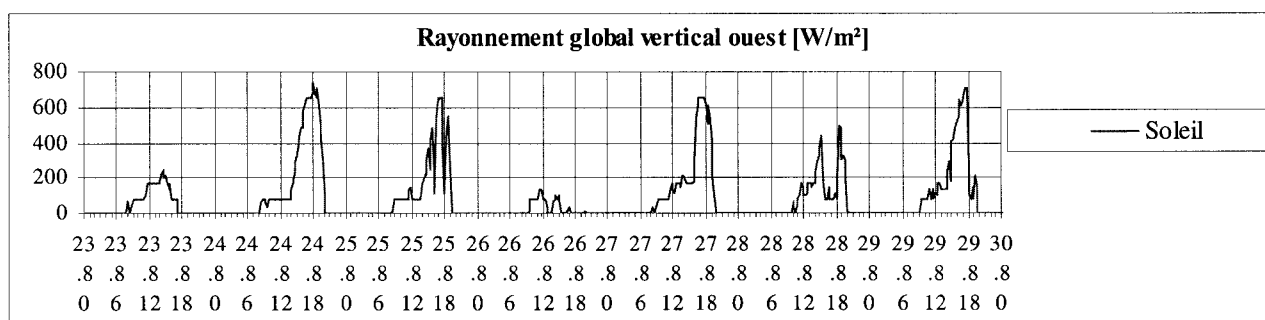


Figure 10: Semaine extrême: climat des bureaux:

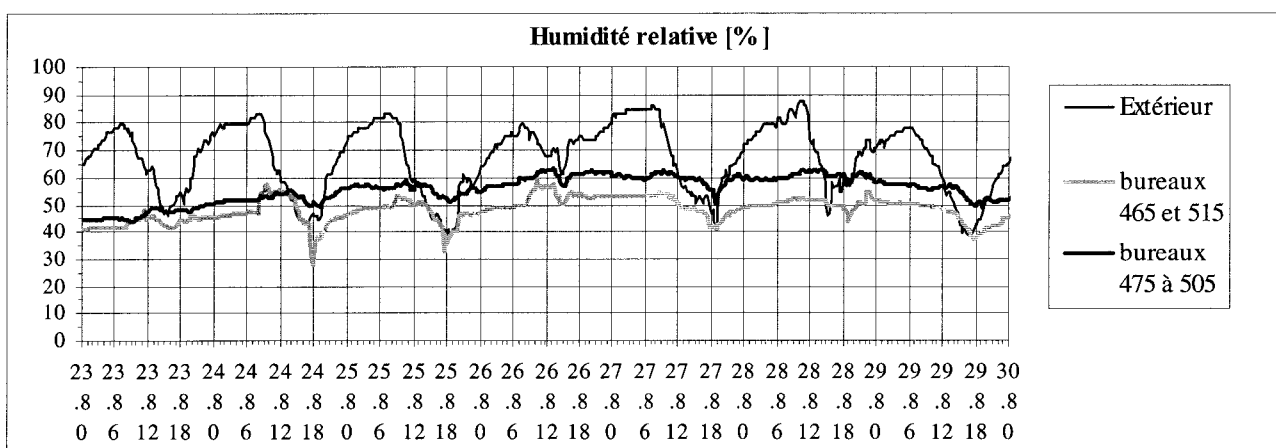
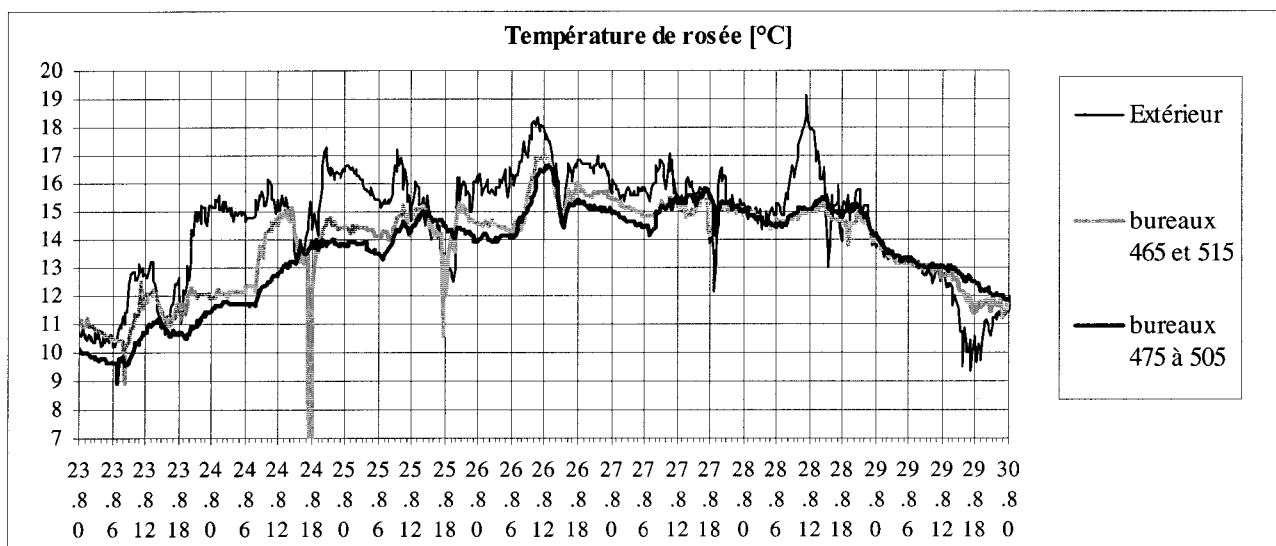
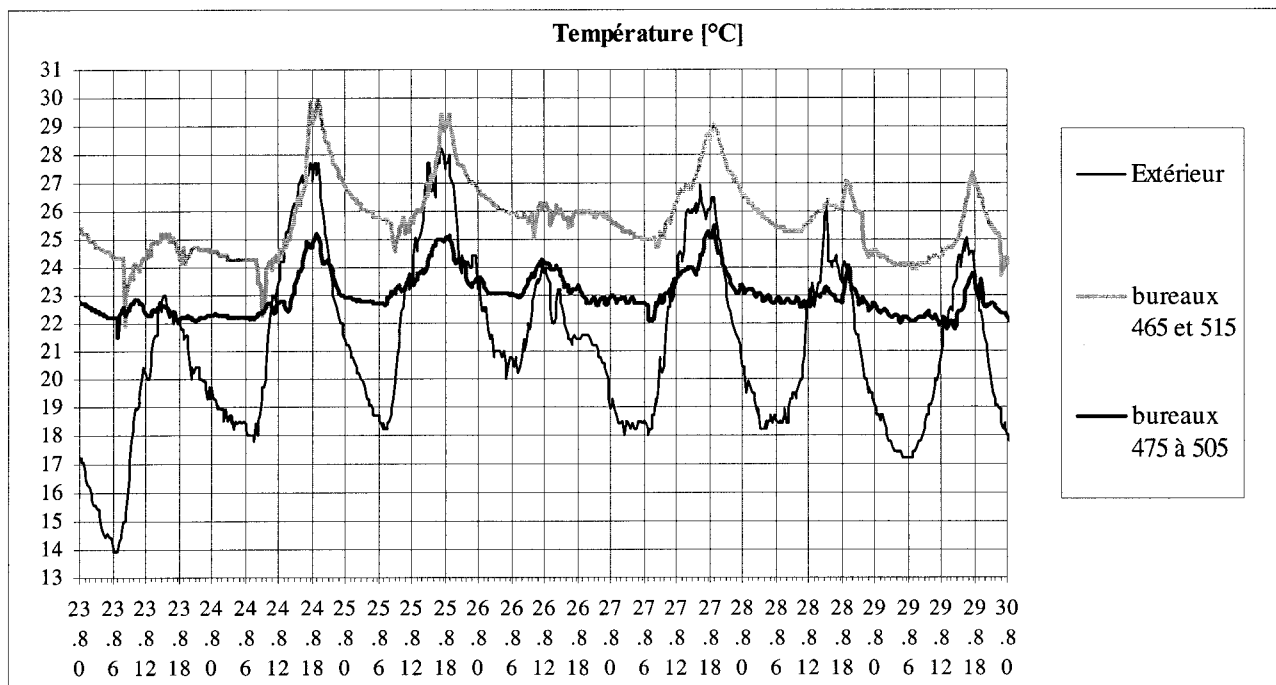
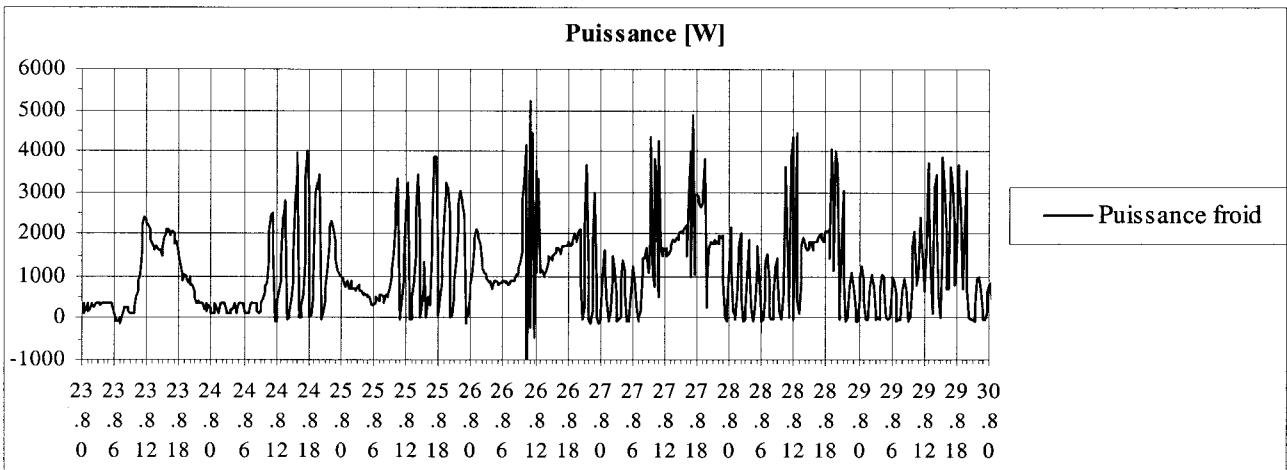
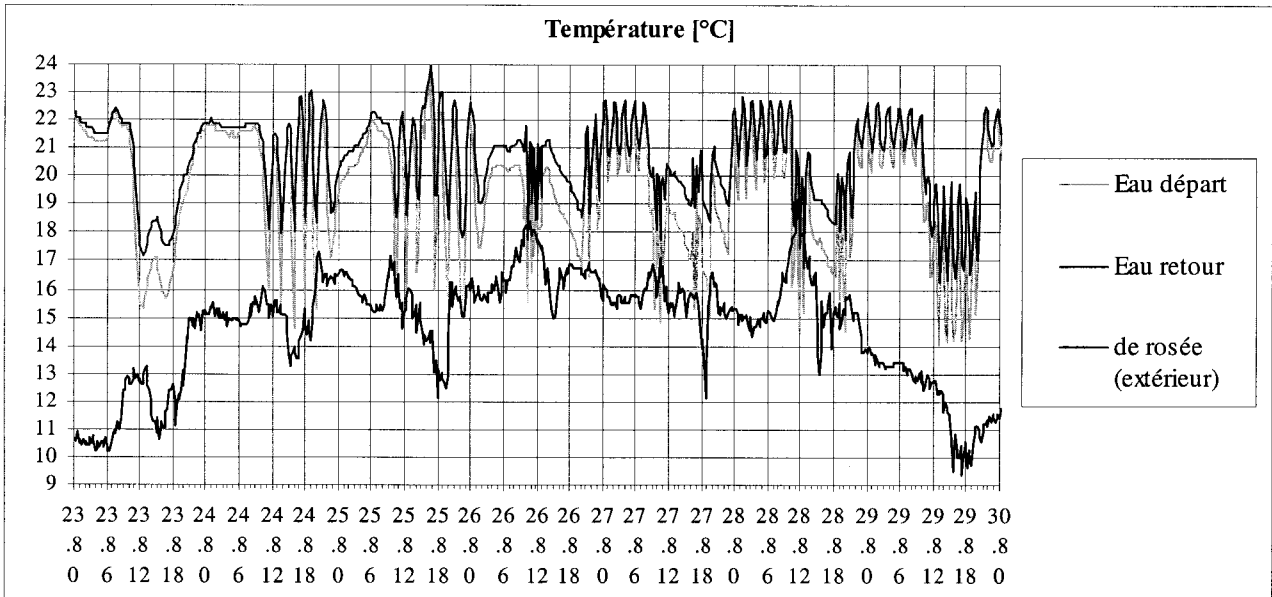


Figure 11: Semaine extrême: Installation de refroidissement:



## Enquête par questionnaires

### Statistiques

Période d'enquête: semaines 30 à 39, soit du 26 juillet au 3 octobre 1999, ce qui correspond à 49 jours ouvrables.

Nombre de questionnaires distribués: 74.

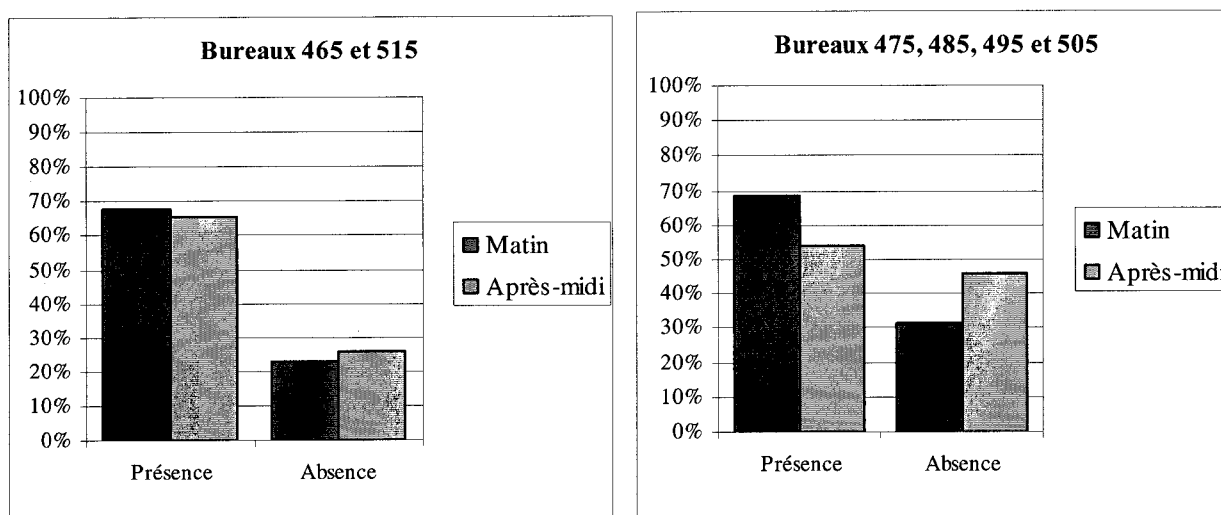
Nombre de questionnaires retournés: 71.

Sur la base des questionnaires retournés:

- taux moyen de présence des personnes: 64% (matin 69%, après-midi 59%);
- taux moyen d'occupation des bureaux: 68% (matin 73%, après-midi 62%).

La différence entre les 2 taux moyens est due au fait que deux bureaux (465 et 515) sont occupés par plus d'une personne.

Figure 12: Présence dans les bureaux (sur la base de la période d'enquête):



Le total présence + absence ne correspond pas toujours à 100% à cause des questionnaires non remplis.

Les statistiques ci-dessous (confort, utilisation des stores, de l'éclairage et des fenêtres) représentent uniquement les périodes d'occupation des bureaux.

### Confort thermique

Le confort est généralement satisfaisant le matin pour l'ensemble des bureaux. On note une légère tendance chaude (12% des votes) pour les bureaux non rafraîchis et fraîche (12% des votes) pour les bureaux rafraîchis.

L'après-midi, la situation est totalement différente: à peine plus de la moitié des votes des bureaux 465 et 515 sont satisfaisants contre près des trois quarts pour les bureaux 475 à 505. Les bureaux non rafraîchis sont donc inconfortables 45% du temps (35% chaud et 10% très chaud) contre seulement 24% du temps (23% chaud et 1% très chaud) pour les bureaux rafraîchis.

Si on divise la période de mesure en 2 parties, le contraste entre les 2 types de locaux est beaucoup plus visible.

Durant la première partie (semaine 30 à 32, du 26 juillet au 15 août), l'installation de refroidissement ne fonctionnait pas à pleine puissance à cause d'un problème de mesure de l'humidité. La température de départ de l'eau ne descendait pas en dessous de 19°C.

Durant la seconde partie (semaine 33 à 39, du 16 août au 3 octobre), la température de départ de l'eau de refroidissement a pu descendre jusqu'à 15°C.

Durant l'après-midi (période critique pour le confort), la proportion des différents votes des bureaux non refroidis ne change presque pas tandis que pour les bureaux refroidis la part des votes inconfortables diminue de moitié en passant de la première à la seconde partie des mesures.

On pourrait comparer les votes des personnes au vote moyen prévisible (PMV) estimé à partir des températures mesurées. Par exemple pour l'après-midi, on observe une bonne concordance pour les bureaux refroidis et une certaine distorsion dans les bureaux non refroidis. Ces différences s'expliquent surtout par l'influence des occupants. Le climat intérieur d'un bureau inoccupé est beaucoup plus mauvais (store levé, fenêtre fermée) que dans le même bureau occupé. Les mesures de températures ne font pas la distinction entre bureau occupé et non occupé tandis que les votes des personnes concernent uniquement les bureaux occupés. Cette différence entre bureaux inoccupés et occupés est beaucoup plus faible dans les bureaux refroidis puisque les panneaux refroidissants absorbent les apports solaires.

Figure 13: Confort dans les bureaux (valeurs calculées en fonction des températures intérieures):

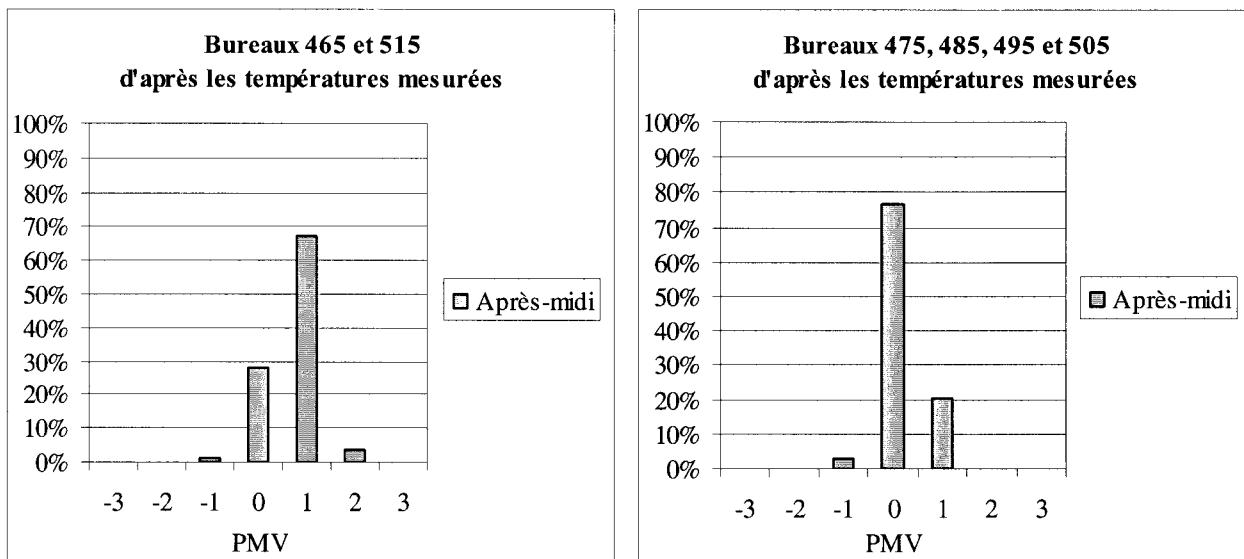
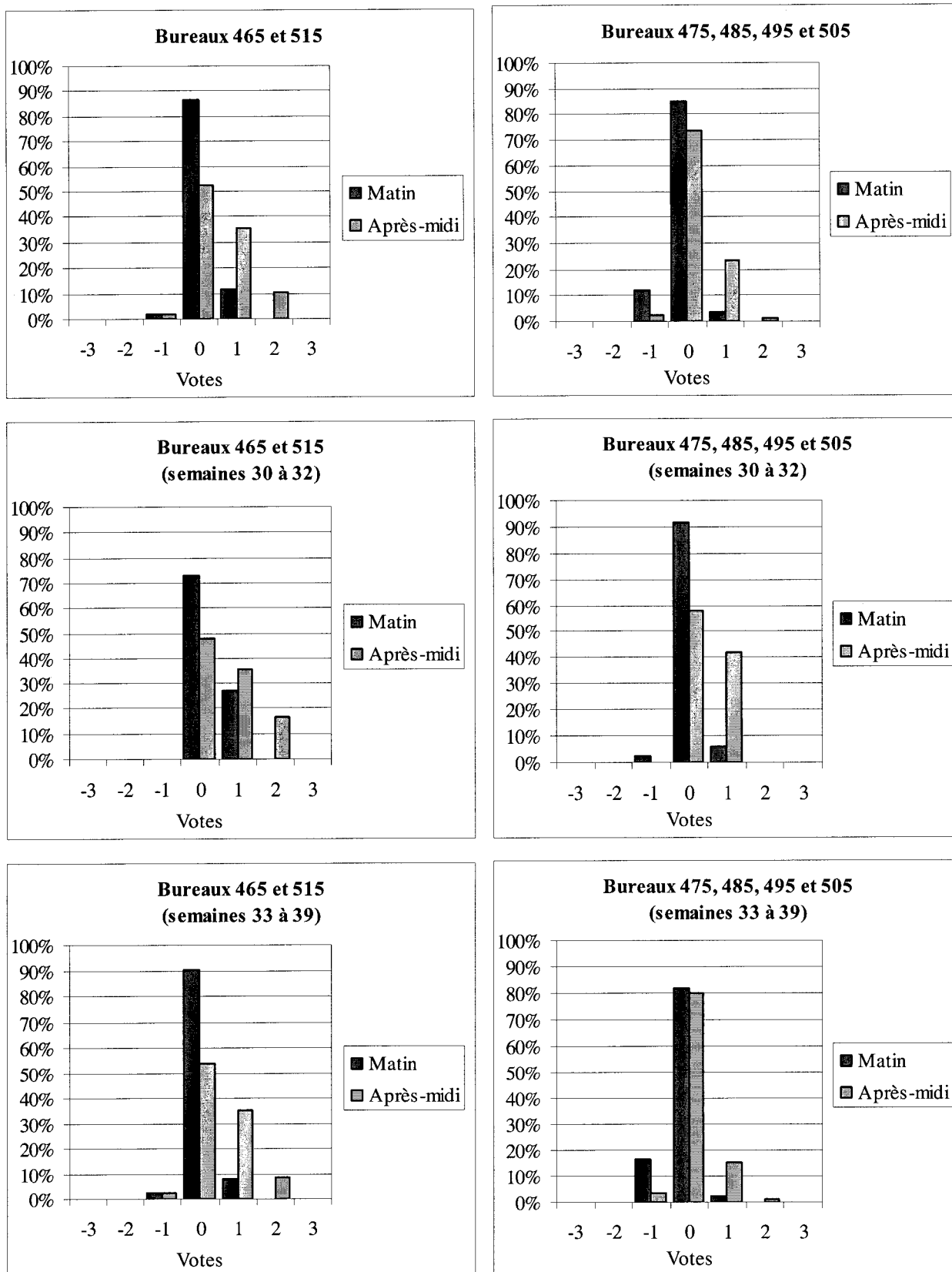


Figure 14: Confort dans les bureaux: votes des occupants:



### Stores et éclairage artificiel

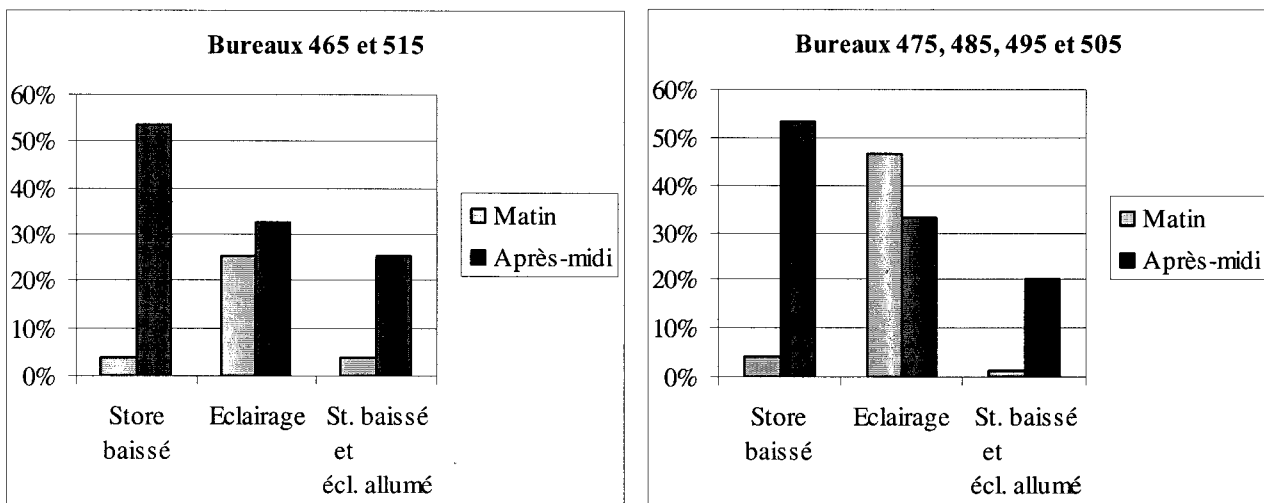
Les bureaux 465 et 475 sont équipés de store en toile tandis que les bureaux 485 à 515 ont des stores à lamelles.

Les bureaux 475 et 485 ont des lampadaires. L'éclairage des autres bureaux se fait par les plafonniers usuels.

Les stores extérieurs sont largement utilisés l'après-midi (plus de 50% du temps d'occupation des bureaux).

Pour une période estivale, l'éclairage est largement utilisé le matin! On note aussi l'utilisation simultanée de l'éclairage et des stores (plus de 20% l'après-midi).

Figure 15: Utilisation des stores et de l'éclairage:



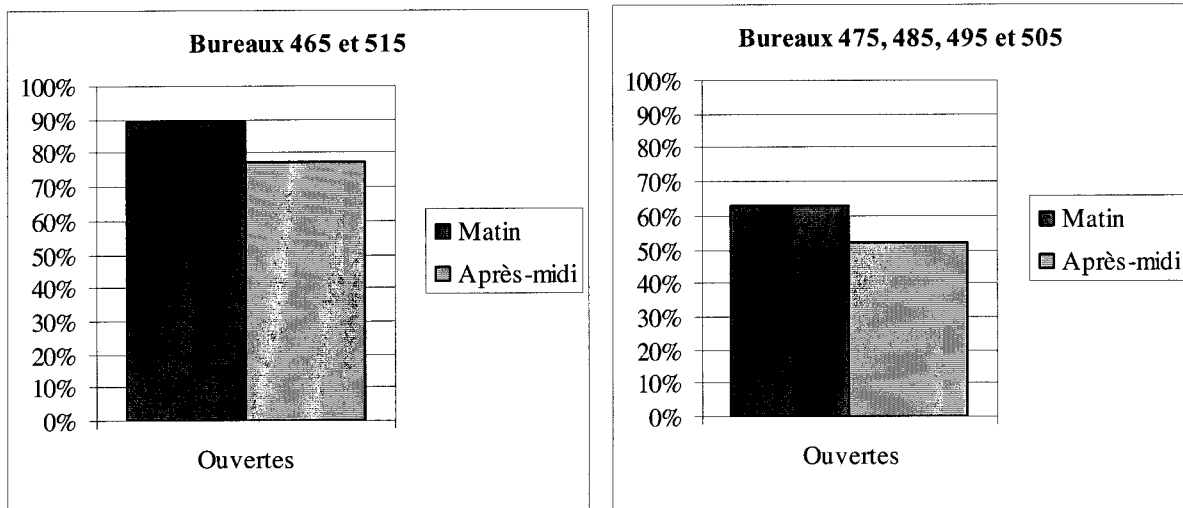


## Fenêtres et portes

### Fenêtres

Tous les bureaux sont pourvus d'une fenêtre oscillo-battante. Les bureaux 485 et 495 comportent en plus une petite fenêtre (appelée guichet), s'ouvrant à la française, protégée par une grille pare-pluie. Il suffit qu'il y ait une ouverture vers l'extérieur, quelles que soient la fenêtre et le mode d'ouverture, pour que le bureau soit désigné comme ayant une fenêtre ouverte.

Figure 16: Utilisation des fenêtres:



### Portes

Les portes qui s'ouvrent sur le couloir sont, pour tous les bureaux sauf le 495, ouvertes lorsque le bureau est occupé et fermées dans le cas contraire. La porte du bureau 495 reste en principe fermée. Les portes entre le bureau 505 et les deux bureaux voisins (495 et 515) sont en permanence fermées.

### Mesures des week-ends

Certains week-ends ont été mis à profit pour effectuer des mesures particulières en absence d'occupants. Ces mesures sont ensuite utilisées dans un modèle pour déterminer l'importance de différents paramètres. Les paramètres sont représentés dans le modèle par une variable "réduite". Il s'agit d'une variable sans unité, variant seulement de -1 à +1. -1 et +1 correspondent aux valeurs extrêmes que peut prendre cette variable. Ainsi, et à condition que lors des expériences (mesures) toutes les variables soient réparties dans l'ensemble de leur plage de variation et que le modèle soit représentatif du phénomène étudié, l'importance des effets de chaque paramètre sera proportionnel aux coefficients du modèle.

Paramètres	Variable réduite	Valeur de la variable réduite		
		-1	0	1
Température extérieure $\theta_{ext}$	$e = \frac{\theta_{ext} - 22}{5}$	17°C	22°C	27°C
Rayonnement global vertical ouest $I_{ext}$	$r = \frac{I_{ext}}{250} - 1$	0 W/m <sup>2</sup>	250 W/m <sup>2</sup>	500 W/m <sup>2</sup>
Emplacement	$p$	bureau non refroidi	bureau refroidi au bord	bureau refroidi central
Aire couverte par les panneaux refroidissants	$a = \frac{nb. \text{panneaux}}{3} - 1$	0 panneau	3 panneaux	6 panneaux
Type store	$t$	toile	-	lamelles
Store	$s$	levé	mi-baissé	baissé
Fenêtre	$f$	fermée	-	ouverte

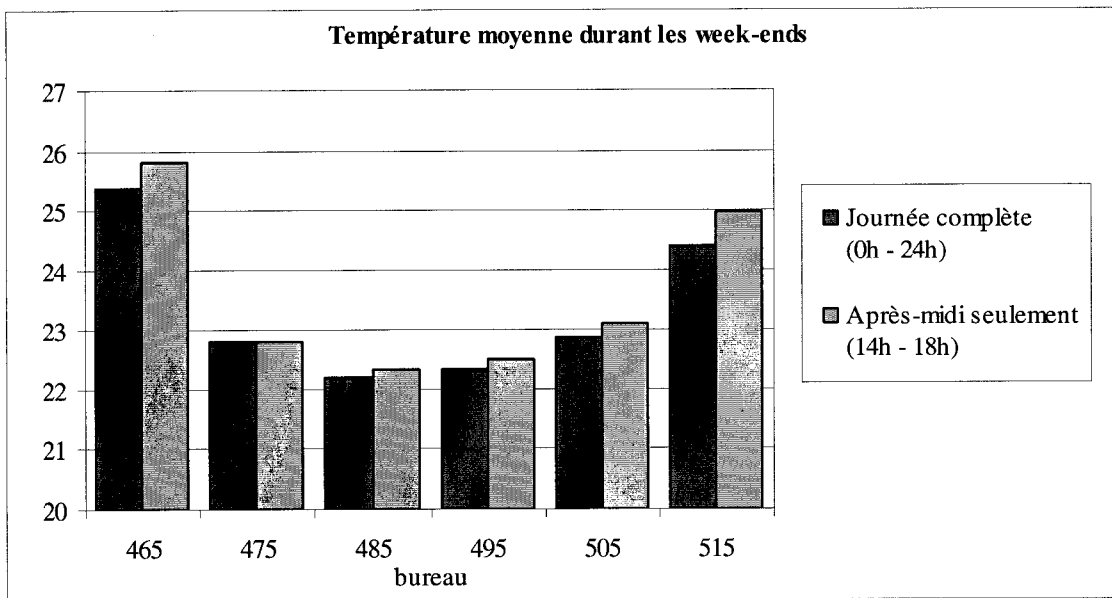
### Expériences des week-ends et valeurs des variables réduites

Week-end				7-8.8	21-22.8	28-29.8	4-5.9	11-12.9	18-19.9
Bureaux	Emplacement $p$	Aire $a$	Type de store $t$	Store et fenêtre					
				$s/f$	$s/f$	$s/f$	$s/f$	$s/f$	$s/f$
465	-1	-1	-1	-1 / -1	1 / -1	0 / -1	0 / 1	1 / -1	1 / 1
475	0	0,667	-1	-1 / -1	1 / -1	0 / -1	0 / 1	1 / -1	1 / 1
485	1	0,333	1	-1 / -1	1 / -1	0 / -1	0 / 1	1 / -1	1 / 1
495	1	0,333	1	1 / -1	-1 / -1	0 / 1	0 / -1	1 / -1	1 / 1
505	0	0,667	1	1 / -1	-1 / -1	0 / 1	0 / -1	1 / -1	1 / 1
515	-1	-1	1	1 / -1	-1 / -1	0 / 1	0 / -1	1 / -1	1 / 1
Température ext. $e$	journée			0,06	-0,74	-0,30	-0,70	-0,16	-1,02
	après-midi			0,88	+0,14	+0,46	+0,16	+0,86	-0,48
Ensoleillement $r$	journée			-0,51	-0,40	-0,63	-0,52	-0,72	-0,72
	après-midi			+0,54	+0,94	+0,27	+0,78	+0,15	+0,15

En moyenne, tous les bureaux ont été soumis au même type d'expérience (store levé/baissé, fenêtre fermée/ouverte).

La température des bureaux durant les week-ends n'est pas influencée par les occupants et les échanges thermiques avec le couloir. Le graphique de ces températures a la même forme que lors de la comparaison des températures des locaux (chapitre "Différence entre locaux de même type"). Les différences sont plus marquées et l'on observe l'écart de 2 à 3°C entre le locaux non refroidis et les locaux refroidis ainsi que l'écart de 0,5°C entre les bureaux centraux 485 et 495 et les bureaux de bord 475 et 505.

Figure 17: Température moyenne des bureaux:



L'analyse mathématique des résultats pour mettre en évidence les paramètres les plus importants suppose que la température intérieure des bureaux dépend de manière "linéaire" de plusieurs paramètres. Le modèle choisi est le suivant:

$$\text{modèle "général": } \theta = c + c_e \cdot e + c_r \cdot r + c_p \cdot p + c_a \cdot a + c_t \cdot t + c_s \cdot s + c_f \cdot f$$

$$\text{modèle "store": } \theta = c + c_e \cdot e + c_r \cdot r + c_t \cdot t$$

où les  $c_{...}$  sont les coefficients du modèle.

L'analyse mathématique par régression multilinéaire des mesures permet d'établir la valeur des coefficients. Pour une plage de conditions données, conditions établies lors de la définition des variables centrées réduites, les coefficients les plus élevés indiquent les paramètres les plus importants. Ce modèle est très simplifié et ne permet pas de voir les éventuelles interactions entre certains paramètres.

L'analyse globale de toutes les mesures (6 bureaux pendant 6 week-ends) ne permet pas de tirer des conclusions particulières, mais confirme le "bon sens" :

- la température des locaux augmente avec la température extérieure;
- l'ensoleillement n'a presque pas d'influence (l'incertitude sur le coefficient est aussi élevée de que le coefficient lui-même);
- l'emplacement central est favorable par rapport aux autres emplacements;
- une surface de plafond froid plus grande refroidit davantage;
- le type de store n'a aucune importance;
- l'abaissement du store diminue la température intérieure;
- l'ouverture de la fenêtre n'a pas d'influence.

Afin de mieux voir l'effet des stores, on sélectionne uniquement les mesures avec les stores baissés (analyse 2). Notre modèle est donc simplifié et le terme  $c_s \cdot s$  n'existe donc plus. Cette analyse montre des phénomènes étonnants.

- l'ensoleillement a une forte influence (avec une grande incertitude), mais dans le sens opposé à celui auquel on s'attend: plus il y a de soleil et plus la température des bureaux baisse;
- le type de store n'a presque pas d'influence (l'incertitude sur le coefficient est aussi élevée de que le coefficient lui-même);
- l'ouverture de la fenêtre a une influence importante: une fenêtre ouverte ( $f = -1$ ) continuellement (journée complète c'est-à-dire jour et nuit) abaisse la température des bureaux tandis qu'une fenêtre ouverte seulement l'après-midi l'augmente;
- les autres effets sont inchangés par rapport à l'analyse précédente.

Cette influence surprenante de l'ensoleillement peut être due à plusieurs causes:

- les mesures effectuées ne sont pas assez représentatives du problème étudié: les mesures ne se répartissent pas de manière optimale dans l'ensemble de la plage de variation des paramètres;
- les interactions entre les paramètres sont négligées;
- il n'est pas tenu compte des changements dans la régulation de l'installation: certains paramètres importants sont négligés;
- les bureaux sont parfois occupés même durant les week-ends: l'influence de l'occupant, même limitée à quelques heures, n'est pas prise en compte;
- les panneaux refroidissants absorbent la chaleur apportée par le soleil et la régulation peut éventuellement surcorriger l'influence du soleil même s'il elle n'en a pas une connaissance directe: la sonde de température extérieure peut recevoir du soleil par réflexion sur le sol et la température de retour de l'eau peut s'élever suite à l'arrivée du soleil dans les bureaux.

Pour mieux répondre à la question "le type de store a-t-il une influence?", on ne prend en compte que les mesures avec les stores baissés dans les bureaux non refroidis (analyse 3). Ainsi la compensation que font les panneaux refroidissants sur l'effet des store est éliminée. Notre modèle ne comprend donc plus les termes liés aux bureaux refroidis ( $c_p \cdot p$  et  $c_a \cdot a$ ). On observe alors que:

- l'influence de l'ensoleillement est amplifiée et toujours dans le même sens;
- la température extérieure  $a$ , durant l'après-midi, une influence inverse; les remarques précédentes sur l'ensoleillement s'applique aussi à la température extérieure;
- le type de store a une influence: les lamelles ( $t = +1$ ) sont préférables à la toile ( $t = -1$ );
- l'influence de l'ouverture de la fenêtre est augmentée.

Afin d'éliminer des éventuels effets parasites dus aux changements dans la régulation, on élimine de notre sélection les mesures faites avant le 15 août (lorsque les performances de l'installation étaient limitées) et on ne s'intéresse qu'aux stores avec un modèle simplifié (analyse 4). Cet ensemble de mesures semble plus cohérent que les 2 précédents puisque:

- l'ensoleillement augmente la température intérieure;
- une température extérieure plus élevée conduit à une température intérieure plus élevée;
- le type de store a la même influence que précédemment: les lamelles sont préférables à la toile.

Ces différentes analyses montrent que le nombre d'expériences différentes est faible par rapport aux nombres de questions posées et que les expériences ne sont pas suffisamment bien réparties pour répondre avec certitudes à toutes les questions. Il est évident qu'il est impossible d'avoir un ensemble idéal d'expériences puisqu'il est impossible de fixer la valeur de certains paramètres (température extérieure, ensoleillement, (dys)fonctionnement de la régulation).

	Analyse 1: toutes les mesures		Analyse 2: seulement stores baissés		Analyse 3: stores baissés locaux non refroidis		Analyse 4: stores baissés locaux non refroidis après mi-août modèles "store"	
nb. mesures	36		18		6		5	
nb. coefficients	8		7		5		4	
	journee complete	après- midi	journee complete	après- midi	journee complete	après- midi	journee complete	après- midi
$c$	25,0 $\pm 1,0$	23,8 $\pm 0,3$	36,9 $\pm 6,3$	25,5 $\pm 1,1$	52,8 $\pm 6,8$	29,0 $\pm 0,7$	28,6 $\pm 1,2$	22,7 $\pm 0,3$
$c_e$	1,9 $\pm 0,4$	1,4 $\pm 0,3$	4,9 $\pm 1,7$	-0,8 $\pm 0,9$	8,9 $\pm 1,9$	-2,4 $\pm 0,6$	<b>1,7</b> $\pm 0,6$	<b>0,6</b> $\pm 0,3$
$c_r$	1,1 $\pm 1,6$	-0,6 $\pm 0,5$	18,4 $\pm 8,7$	-5,9 $\pm 2,1$	38,2 $\pm 9,4$	-10,0 $\pm 1,5$	<b>6,4</b> $\pm 2,1$	<b>2,5</b> $\pm 0,6$
$c_p$	-0,6 $\pm 0,2$	-0,8 $\pm 0,3$	-0,6 $\pm 0,4$	-0,6 $\pm 0,3$				
$c_a$	-0,9 $\pm 0,3$	-1,0 $\pm 0,3$	-0,8 $\pm 0,4$	-1,1 $\pm 0,3$				
$c_t$	-0,2 $\pm 0,1$	-0,1 $\pm 0,1$	-0,2 $\pm 0,2$	-0,2 $\pm 0,2$	<b>-0,5</b> $\pm 0,2$	<b>-0,4</b> $\pm 0,1$	<b>-0,5</b> $\pm 0,2$	<b>-0,4</b> $\pm 0,1$
$c_s$	-0,6 $\pm 0,2$	-1,0 $\pm 0,2$						
$c_f$	-0,3 $\pm 0,2$	-0,2 $\pm 0,2$	3,0 $\pm 1,6$	-3,1 $\pm 1,1$	<b>6,2</b> $\pm 1,8$	<b>-5,9</b> $\pm 0,8$		
incertitude modèle	$\pm 0,7^\circ\text{C}$	$\pm 0,7^\circ\text{C}$	$\pm 0,7^\circ\text{C}$	$\pm 0,6^\circ\text{C}$	$\pm 0,4^\circ\text{C}$	$\pm 0,3^\circ\text{C}$	$\pm 1,0^\circ\text{C}$	$\pm 1,0^\circ\text{C}$

## *Fonctionnement technique de l'installation de refroidissement*

Le fonctionnement de l'installation technique de refroidissement n'a pas été le même durant toute la période de mesure.

Au début de la période, un dysfonctionnement d'une sonde d'humidité / température de rosée extérieure empêchait la régulation du système d'avoir connaissance de l'humidité. Pour éviter tout risque de condensation sur les panneaux refroidissants, la température de départ de l'eau a été limitée à 20°C.

Par la suite, cette sonde extérieure a été remplacée par une sonde de "risque de condensation" posée à la surface d'un panneau refroidissant du bureau 505. Cette sonde avertit la régulation lorsque l'humidité relative dépasse 97% (avec une incertitude de +2/-4 %hr).

Le débit moyen durant la période du 11 au 28 septembre est de  $1330 \pm 50$  l/h. Cette valeur est très proche du débit théorique de 1400 l/h. On observe une légère variation du débit qui n'est pas seulement due à l'incertitude de mesure. Ces variations sont parfois périodiques avec la même période que les variations de la température moyenne de l'eau.

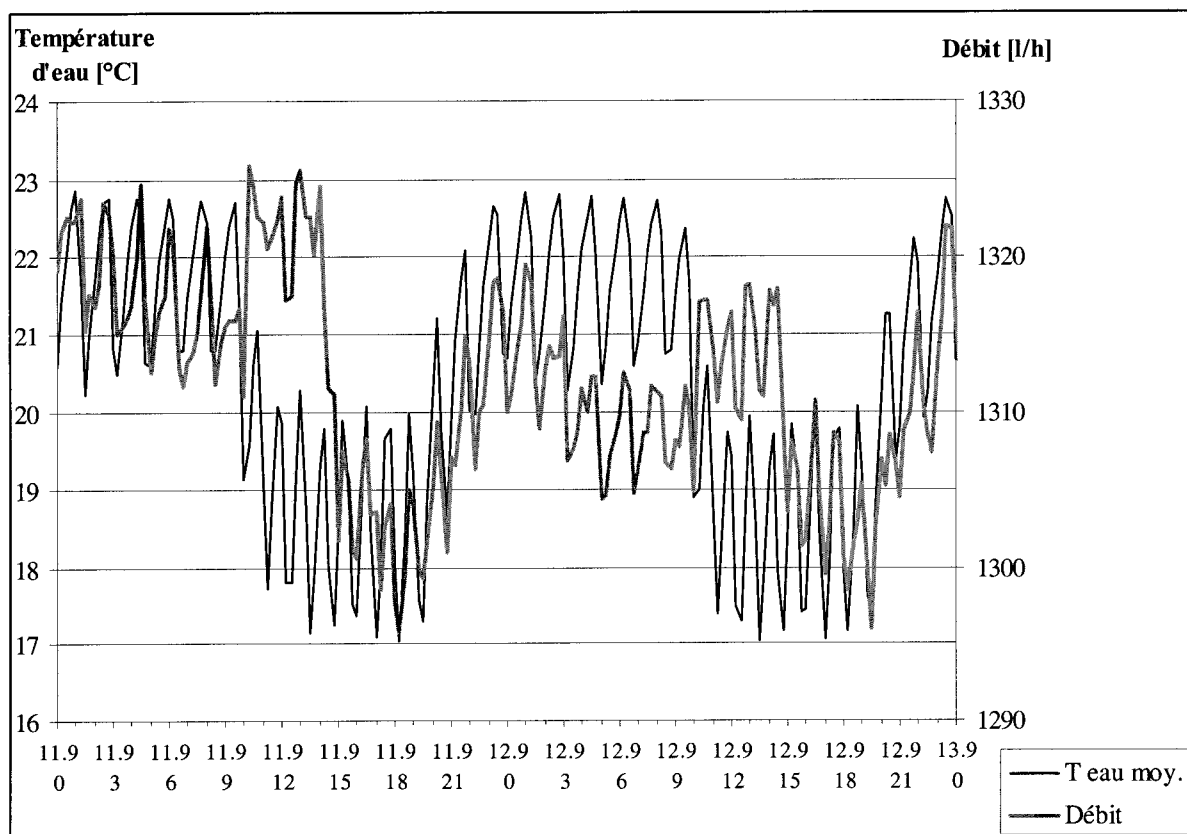
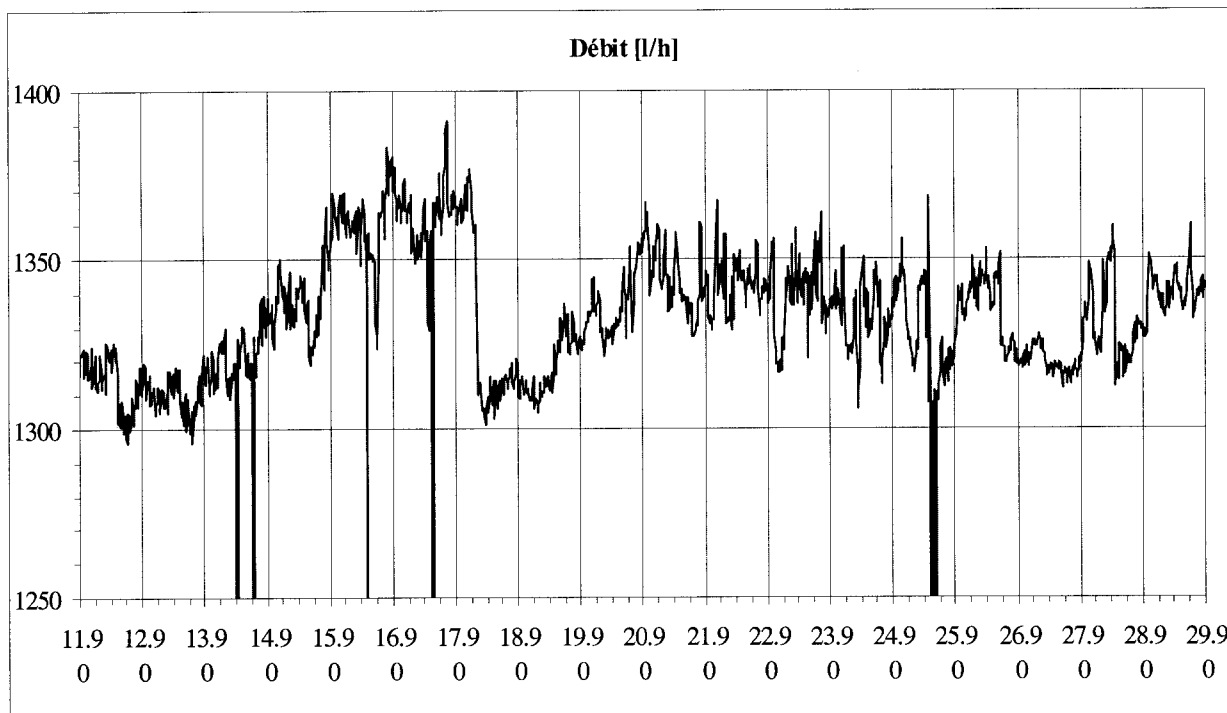
On remarque que la température mesurée de l'eau (départ) est systématiquement en dessous de la température que l'eau devrait avoir selon les consignes (température minimale: 20°C lors de l'absence de mesure de condensation, 16°C ensuite). Par exemple l'eau descend à 18,2°C au lieu de 20°C le 3 août et à 14,5°C au lieu de 16°C le 11 septembre. Ces différences sont probablement dues au cumul de plusieurs causes:

- l'incertitude de mesure des sondes de température du LESO-PB ( $\pm 0,2^\circ\text{C}$ );
- l'incertitude de mesure des sondes de température de la régulation, usuellement cette valeur est d'environ  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  ou plus;
- la représentativité de la mesure: une sonde de température ne mesure que sa propre température! Elle doit être correctement placée et le contact avec le milieu à mesurer doit être excellent.

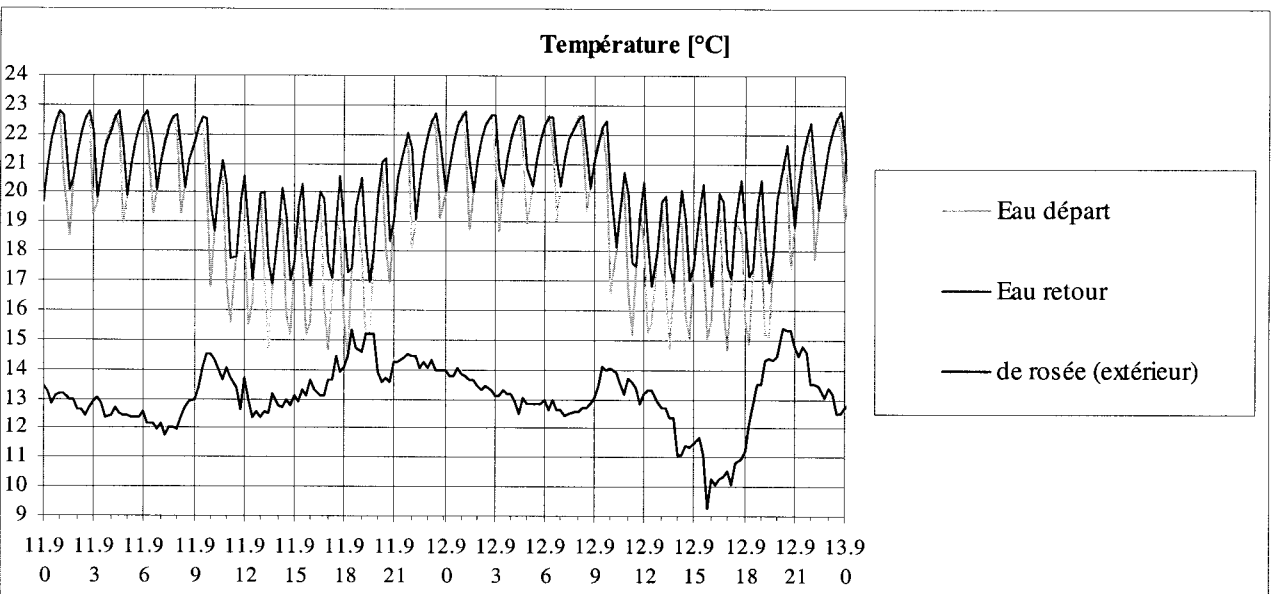
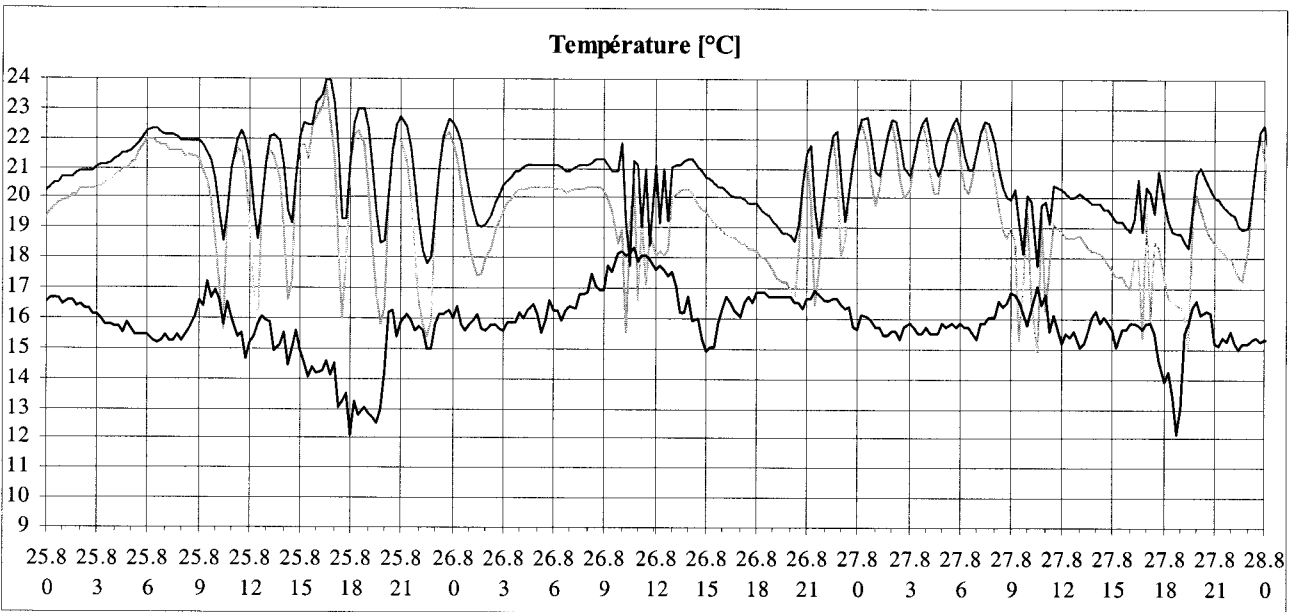
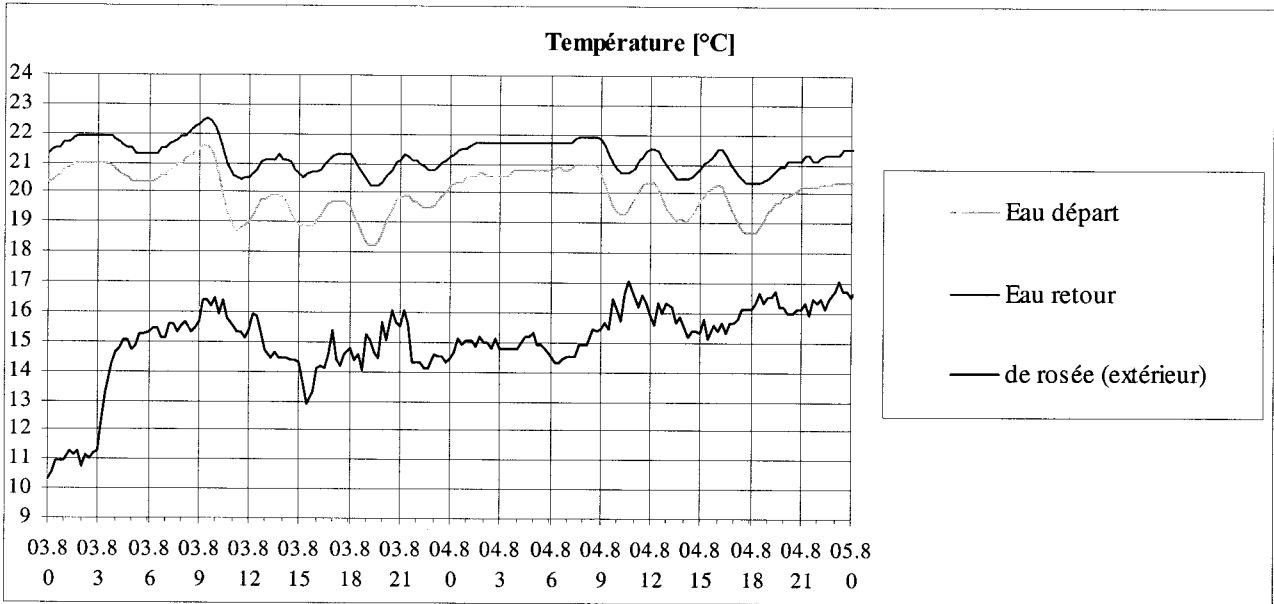
On observe de nombreux phénomènes de pendulation dus à la régulation pas encore complètement réglée. La période de variation de la température de l'eau change nettement suivant la situation et le moment de la mesure. Des valeurs représentatives des divers cas sont les suivantes.

Date	Situation	Période [h]	Demi-amplitude de température [°C]	
			eau départ	eau retour
3.8 après-midi	standard	4,0	0,7	0,6
<i>changement dans la régulation</i>				
25.8 après-midi	standard	2,5	3,1	2,0
26.8 matin	à la limite de la condensation	0,6	2,0	1,1
<i>changement dans la régulation</i>				
26.8 soir	standard	1,8	1,2	1,0
27.8 matin	à la limite de la condensation	0,6	2,0	1,1
12.9 nuit	standard	1,7	1,8	1,3
12.9 après-midi	standard	1,2	2,0	1,5

Figures 19a, 19b: Débit d'eau dans le circuit des plafonds refroidissants:



Figures 20a, 20b, 20c: Oscillation des températures d'eau:





## Conclusions

Bien que les mesures n'ont pu être faites que durant une partie de l'été, le climat extérieur durant la période de mesure est suffisamment représentatif du climat extérieur moyen. Il est donc possible d'utiliser les conclusions ci-dessous sans restriction due au climat.

Le fonctionnement de la régulation de l'installation de refroidissement n'a pas été adéquat durant les mesures. Durant les 2 à 3 premières semaines, un dysfonctionnement d'une sonde d'humidité a empêché une utilisation à "pleine puissance" des possibilités de refroidissement. Ces premières semaines ne sont donc absolument pas représentatives du fonctionnement du système.

Par la suite, la régulation du système n'a jamais fonctionné exactement selon son cahier des charges, néanmoins, la plus grande partie de la puissance de refroidissement était disponible. Une régulation mieux réglée permettrait peut-être d'améliorer les possibilités de l'installation.

Malgré ce fonctionnement imparfait, le risque principal de ce système a toujours été évité: il n'y a jamais eu de condensation à la surface des panneaux.

Le but premier des mesures était de vérifier le confort dans les bureaux équipés de panneaux refroidissants. Aussi bien les mesures de température que les enquêtes sur le confort ressenti par les occupants montrent une amélioration radicale du confort. La température des bureaux équipés ne dépasse plus 26°C tandis que celle des autres locaux peut dépasser les 28°C. En moyenne l'écart est de 3°C. C'est exactement la différence entre le confort et l'inconfort. L'appréciation du confort faite par les occupants montre le même résultat (après-midi, de mi-août à fin septembre):

- locaux refroidis: 80% du temps confortable, 19% inconfortable, 1% très inconfortable;
- locaux non refroidis: 54% du temps confortable, 37% inconfortable, 9% très inconfortable.

Les bureaux 485 et 495 sont équipés de 4 panneaux refroidissants tandis que les bureaux 475 et 505 en ont 5. Ces derniers bureaux sont cependant légèrement plus chauds (~0,5°C) que les précédents. Une des causes est l'effet de bord. Les bureaux 475 et 505 donnent un peu de leur fraîcheur aux bureaux voisins, respectivement le 465 et le 515, qui ne sont pas refroidis. Un autre effet de bord n'a pas été quantifié: les vides de faux-plafond de tous les bureaux de l'étage communiquent et les panneaux refroidissants ne sont pas isolés vers le haut. Leur fraîcheur passe donc vers les bureaux voisins par le vide de faux-plafond.

La charge thermique des bureaux n'a pas été mesurée. On ne peut donc établir de corrélation avec le confort des bureaux.

Les stores jouent un rôle assez importants: les baisser permet de se protéger du soleil. Les mesures montrent à peine la différence entre les stores en toile et ceux à lamelles. Ces derniers semblent tout de même plus performants sur le plan thermique. Sur le plan du confort visuel, il n'est pas nécessaire de faire tant de mesure: il suffit d'entrer dans un bureau avec store en toile pour se rendre compte de leur inefficacité totale, en particulier pour le travail à l'écran.

Les mesures ont prouvé l'efficacité de cette installation de refroidissement. Une installation à plus large échelle permettrait de diminuer les effets de bords. Une recherche sur la régulation optimale de ce type d'installation permettrait certainement d'augmenter les performances du système.

## **Annexe 1: Références**

SIA 381/2 Données climatiques relatives à la recommandation 380/1 "L'énergie dans le bâtiment"; SIA, Zurich, 1991.

SIA D012 Meteodaten für die Haustechnik; SIA, Zurich, 1987.

MeteoNorm Version 4 Edition 2000 "Global meteorological database for solar energy and applied climatology; Meteotest, Berne, 1999.

Fanger P., Thermal Comfort, Robert E. Krieger, Malabar, Floride, 1982.

ISO 7730, Moderate thermal environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort; ISO, Genève, 1984.

Roulet, C.-A.; Rossy, J.-P.; Roulet, Y. : Using Large Radiant Panels for Indoor Climate Conditioning. Energy and Buildings 30 (1999) pp121-126.



### Annexe 3: Notions de confort thermique

Le confort thermique a été largement étudié par P. Fanger. Selon sa théorie et pour des climats tempérés (en particulier, pour une humidité correspond à une température de rosée inférieure à 23°C), le confort dépend des paramètres suivants:

- l'habillement;
- l'activité;
- la température de l'air;
- l'humidité de l'air;
- la vitesse de l'air;
- la température radiative moyenne des surfaces environnantes;
- le rayonnement solaire (ou infra-rouge) reçu.

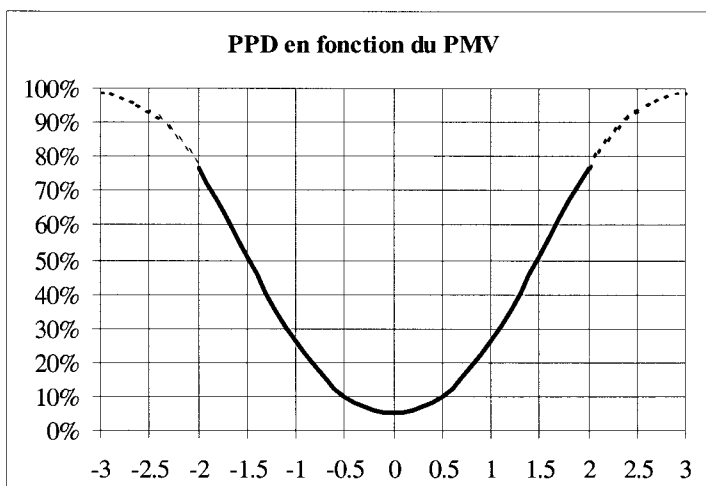
Le confort ressenti par les occupants peut être caractérisé par les expressions du tableau ci-dessous. A chaque expression correspond une valeur numérique.

vote	
-3	très froid
-2	froid
-1	frais
0	agréable
+1	légèrement chaud
+2	chaud
+3	très chaud

Ces valeurs sont appelées PMV (Predicted Mean Vote = vote moyen prévisible) lorsqu'elles sont calculées à partir des paramètres ci-dessus selon l'équation qu'a établie Fanger. A chaque valeur du PMV correspond statistiquement un PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied = pourcentage prévisible d'insatisfaits) qui est la part des personnes qui trouveraient la situation inconfortable (thermiquement).

Une situation est confortable lorsque le nombre de personnes insatisfaites ne dépasse pas 10%, ce qui correspond à un PMV allant de -0,5 à +0,5.

Figure A1: Pourcentage prévisible d'insatisfaits en fonction du vote moyen prévisible:



Pour une activité de bureau, une humidité relative de 50% et en supposant que la température des surfaces environnantes est égale à la température de l'air, on peut calculer le PMV pour diverses situations ainsi que les limites du confort.

Habillement	Limites de la température intérieure pour le confort	Extension de la limite supérieure grâce à des courants d'air
0,5 clo = tenue d'été légère (pantalons longs légers)	23 à 26,5 °C	28,5 °C
0,75 clo	21 à 25°C	27 °C
1 clo = tenue européenne traditionnelle (complet – veston – cravate)	19 à 23,5°C	25,5 °C

Figures A2a, A2b, A2c: Vote moyen prévisible pour divers habillements et vitesses d'air:

