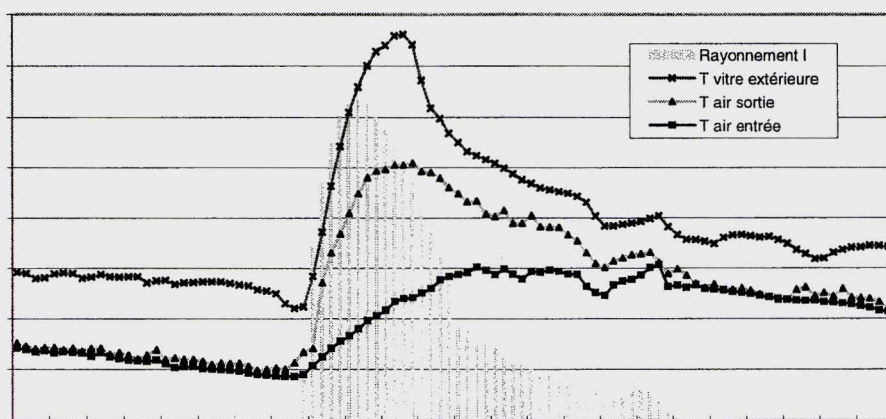


La façade double-peau

Chapitre 5 Mesures in-situ et en laboratoire



Liste des collaborateurs et planning

Durée du projet : mars 1993 – juin 1998
Travail réalisé au Laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment de l'Institut de technique du bâtiment – DA – EPFL

Rédaction du rapport : Prof. André P. Faist

Personnel

Prof. Dr Ing. André P. Faist, chef de projet

Typologie : Zohreh Zaerpour, architecte EPFL
J.-P. Eggimann, Dr es sc. Phys. EPFL
Ausilio Bauen, Ing. Phys. EPFL
Catherine Merz, architecte EPFL

Mesures : Stéphane Citherlet, Ing. Phys. EPFL
Icham Jaafar, Alexandre Closset, étudiants EPFL
Flourentzos Flourentzou, Ing. DEA
Pierre Loesch, mécanicien
Urs Meierhofer, laborant

Lumière naturelle

Prof. Dr J.-L. Scartezzini, LESO/PB - EPFL
Dimitrios Lymberis, ingénieur EINEV

Acoustique

Prof. Dr M. Rossi, DE – LEMA – EPFL
W. Koeller, assistant, DE – LEMA - EPFL

Coordination CVSE

Prof. Dr B. Keller, IHB – ETHZ

Techniques constructives

M. Laurent Félix, Edgar Joffre
Félix Constructions SA – Bussigny

Théorie, simulations, recommandations, synthèse

Prof. André P. Faist

Secrétariat

Sylvette Renfer, secrétaire

Liste des symboles

a	Coefficient d'absorption de la lumière	-
A	Section efficace totale	m^2/m_{lin}
A_H	Ouverture géométrique supérieure du canal	m^2/m_{lin}
A_B	Ouverture géométrique inférieure du canal	m^2/m_{lin}
A_{sup}	Ouverture effective supérieure du canal	m^2/m_{lin}
A_{inf}	Ouverture effective inférieure du canal	m^2/m_{lin}
$C_{d,H}$	Coefficient de décharge de l'ouverture supérieure	-
$C_{d,B}$	Coefficient de décharge de l'ouverture inférieure	-
D_G	Débit d'air	$m^3/h.m_{lin}$
g	Accélérateur de la pesanteur	m/s^2
G	Intensité solaire incidente sur la façade	$W/m.m_{lin}$
G_{air}	Intensité transmise à l'air	$W/m.m_{lin}$
H	Hauteur totale du canal de la double-peau	m
$h_{étage}$	Hauteur d'étage	m
h_{pp}	Hauteur plancher – plafond	m
h_t	Position du niveau neutre par rapport à l'ouverture supérieure du canal	m
h_{c+c}	Conductance thermique surfacique par conduction et convection	W/m^2K
I	Intensité (du rayonnement)	W/m^2
k	Coefficient surfacique de transmission thermique (valeur k)	W/m^2K
l_p	Profondeur du local	m
m	Variable météorologique, $m = I/\Delta T$	W/m^2K
n	Taux de renouvellement en air frais	1/h
N	Nombre d'étages, nombre maximal d'étages ventilables	-
N^*	$N^* = N - h_t / 2 \cdot h_{étage}$	-
T_B	Température (absolue) de l'air à la base du canal	K
T_H	Température (absolue) au sommet du canal	K
T_{en}	Température (absolue) à l'entrée du canal	K
T_{canal}	Température (absolue) dans le canal	K
v_B	Vitesse de l'air dans l'ouverture inférieure	m/s
v_H	Vitesse de l'air dans l'ouverture supérieure	m/s
α	Coefficient de transfert surfacique	W/m^2K
α_{ext}	Coefficient de transfert surfacique avec l'air extérieur	W/m^2K
α_{int}	Coefficient de transfert surfacique avec l'air intérieur	W/m^2K
ΔT	Différence de température	K
$\rho \cdot C_p$	Capacité thermique volumique de l'air	J/m^3K

Table des matières

Préface	1
5. Mesures in-situ et en laboratoire	3
5.1 Exploitation de mesures existantes	3
5.1.1 Calage du modèle TQV sur les mesures	7
5.2 Mesures en laboratoire	9
5.2.1 Résultats : profondeur du canal d = 0,6 m	12
5.2.2 Profondeur du canal d = 0,15 m	15
5.3 Mesures in-situ	17
5.3.1 Bâtiment des Telecom-PTT	17
5.3.2 Bâtiment Felimob	36
5.4 Annexes	50
5.4.1 Centre industriel et artisanal "Marcinhès" Meyrin (GE)	50
5.4.2 Modèle de laboratoire	51
5.4.3 Bâtiment des Telecom-PTT	52
5.4.4 Bâtiment Felimob	54

La table des matières du rapport complet se trouve à la fin du présent rapport.

Préface

Le rapport "La façade double-peau" rend compte de l'étude de "l'Incidence de la typologie des façades double-peau sur leurs performances énergétiques et en physique du bâtiment". C'est sous ce titre (en allemand "Zusammenhang zwischen der Typologie von Doppelwand-Fassaden und ihrem energetischen und bauphysikalischen Verhalten") qu'une requête déposée auprès de l'Office fédéral de l'énergie en 1993 a permis de mener à bien un travail tant expérimental que théorique.

La première démarche a consisté en un répertoriage et une classification des façades double-peau construites en Europe et dans le monde en vue d'en dégager les principales typologies.

La démarche suivante a consisté à mener en parallèle des mesures en laboratoire sur une maquette de géométrie simple et à établir un modèle mathématique exploitable sur ordinateur. Les mesures en laboratoire (ainsi que des mesures réalisées à Genève par Pahud [1]) ont permis de valider le modèle mathématique qui sera lui-même exploité pour réaliser une série d'études paramétriques.

Enfin, des rapports concernant les aspects relatifs à la lumière naturelle et à l'acoustique ont été établis sous la responsabilité des Professeurs J.-L. Scartezini (LESO-PB) et M. Rossi (LEMA).

Le rapport final qui présente l'ensemble du travail réalisé dans le cadre de ce projet est structuré comme suit.

Un premier livret regroupe les chapitres 1 à 4 dans lesquels on trouvera à côté d'une description sommaire des principes physiques qui régissent le fonctionnement d'un système double-peau, l'ensemble des propriétés de tels systèmes accompagnés des considérations pratiques qui en découlent. Ce livret est destiné en priorité aux praticiens architectes et ingénieurs désireux de mettre en œuvre une façade double-peau avec les meilleures chances de succès.

Le second livret (chapitre 5) présente l'ensemble des mesures réalisées in-situ ainsi qu'en laboratoire. Si ce livret retiendra d'emblée l'attention des physiciens et ingénieurs du bâtiment, il intéressera également l'architecte qui y trouvera une analyse de deux réalisations pratiques très différentes tant dans leur expression architecturale que dans leur comportement, analyse riche en leçons pratiques.

Le troisième livret explicite les principes physiques et leurs développements mathématiques sur lesquels reposent les considérations pratiques résumées dans le premier livret. Il contient également les études paramétriques qui ont contribué à établir de nombreuses règles pratiques. Il se termine par les conclusions générales relatives au projet dans son ensemble.

Le dernier livret regroupe tous les dossiers établis en soutien au projet. On y trouvera tout d'abord l'étude typologique complète et remise à jour, puis les dossiers relatifs aux mesures in-situ (immeubles Telecom-PTT et Felimob) et finalement les rapports concernant la lumière naturelle et les études acoustiques.

5. Mesures in-situ et en laboratoire

Les mesures exploitées dans le cadre de ce projet sont de trois sortes :

1. *Mesures existantes.* Il s'agit des mesures effectuées par M. D. Pahud au cours de son travail de thèse. D'excellentes qualités, elles ont permis de caler le modèle mathématique TQV.
2. *Mesures en laboratoire.* Devant la complexité du système double-peau et la difficulté de travailler sur des immeubles en pleine exploitation, il a paru nécessaire de procéder à des mesures en laboratoire sur un modèle grandeur nature.
3. *Mesures in-situ.* Des campagnes de mesure ont été menées sur deux immeubles situés dans la région lausannoise.

5.1 Exploitation de mesures existantes

Les mesures réalisées en 1992/93 par M. D. Pahud sur le Centre industriel et artisanal (immeuble Marcinhès) à Meyrin (GE) ont servi à caler le modèle mathématique TQV.

Description¹

Les 3'400 m² de façade double-peau sont répartis sur les 4 faces de l'édifice, dont l'axe principal est orienté sud-ouest. La peau intérieure est constituée, à chaque étage, d'un double vitrage monté sur un contre-cœur en béton (épaisseur 11 cm). La peau intérieure, en double vitrage, est fixée à 25 cm de la peau intérieure par une structure verticale à ponts thermiques coupés. Nous distinguons trois types de double-peau : la double-peau "normale", la double-peau "opaque" et la double-peau "attique". La double-peau "normale" constitue le 82% de l'ensemble. En module de 1.5 m de largeur, elle mesure 13 à 20 m de haut. Elle peut être ouverte sur l'extérieur en bas et en haut, et par conséquent ventilée par circulation naturelle de l'air (Figure 5.1.1). Les données techniques complémentaires dont l'objet de l'annexe 5.4.1.

Mesures

Comme le montre D. Pahud, l'exploitation des mesures in-situ réalisées à Meyrin est rendue extrêmement difficile d'une part par le manque de stabilité des conditions météorologiques et d'autre part par l'effet perturbateur du vent. En tenant compte du fait que ΔT n'est pas une fonction linéaire du rayonnement solaire I , mais que v^2 est une fonction linéaire de ΔT , on peut, à partir des mesures représentées par les figures 5.1.2 et 5.1.3 établir le tableau 5.1.4. La mesure à 118 W/m² est jugée plus fiable que les 3 autres.

¹ D. Pahud. Etude du Centre Industriel et Artisanal Marcinhès à Meyrin (GE). Rapport final, sept. 1993, GPA et CUEPE, Université de Genève.

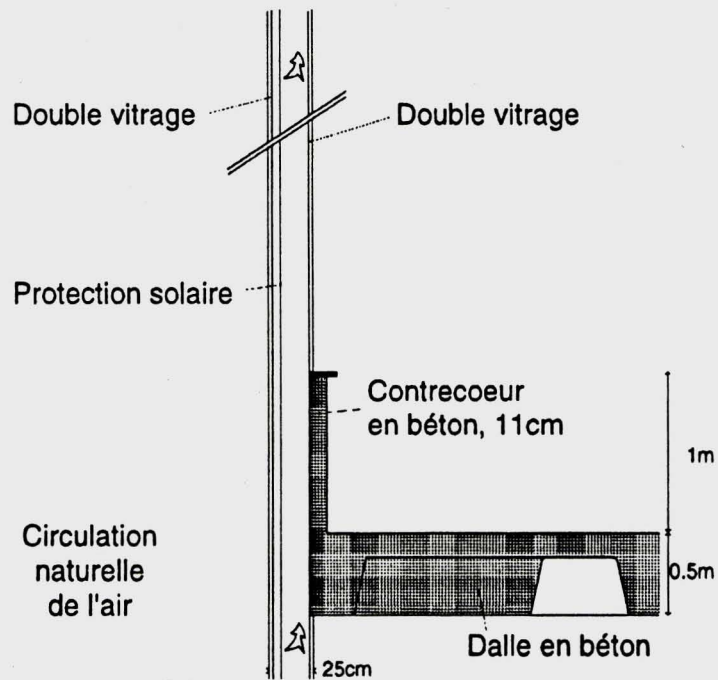


Figure 5.1.1 : Coupe transversale d'un module double-peau "normal"
 Seules les mesures réalisées sur la double-peau de type "normal" ont été exploitées.

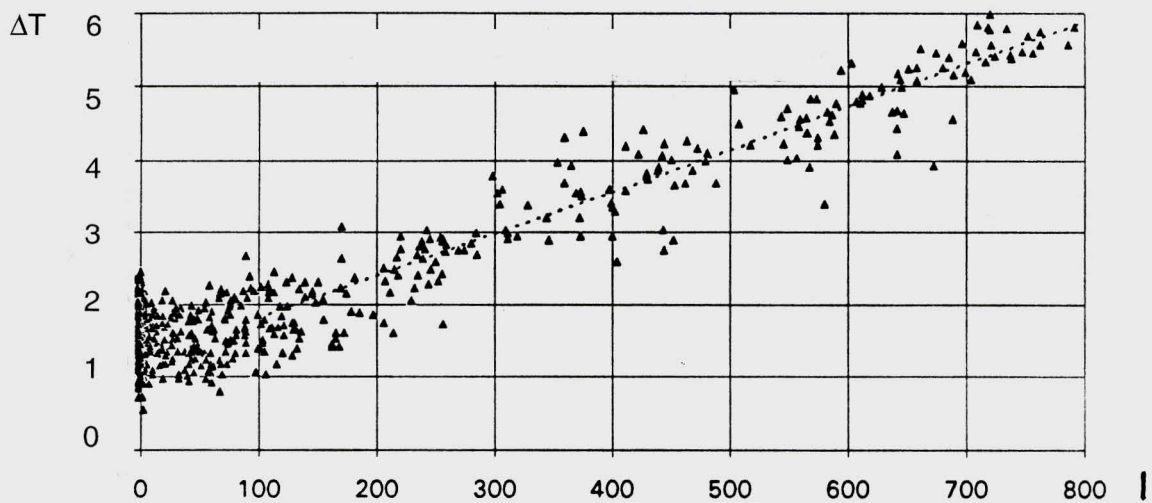


Figure 5.1.2 : Augmentation de la température de l'air dans le canal de la double-peau
 ΔT différence de température de l'air entre le haut et le bas du canal [K]
 I ensoleillement vertical sur la façade [W/m^2]

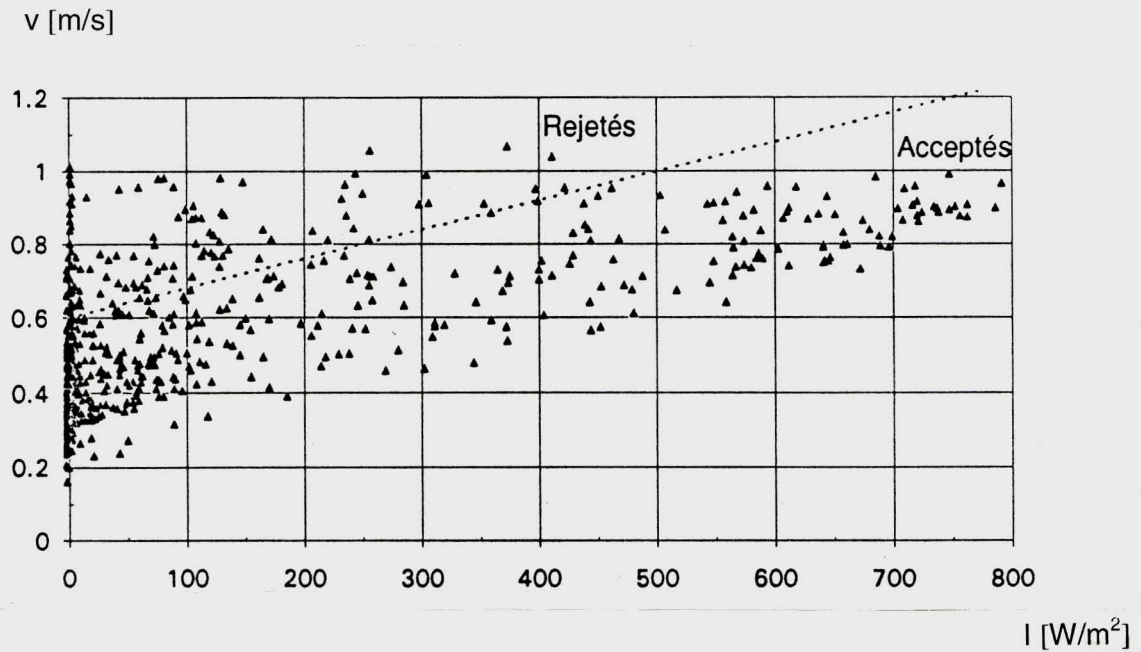


Figure 5.1.3 : Vitesse de l'air dans le canal de la double-peau.
Les valeurs supérieures de la vitesse provoquées par l'effet du vent sont rejetées.

I [W/m^2]	v [m/s]	ΔT_{air} [K]
0	$0,43 \pm 0,04$	$1,2 \pm 0,1$
118	$0,55 \pm 0,02$	$2,0 \pm 0,0$
500	$0,78 \pm 0,08$	$4,0 \pm 0,1$
800	$0,93 \pm 0,09$	$5,7 \pm 0,1$

Tableau 5.1.4 : Immeuble Marcinhès. Mesures.
Les mesures effectuées de nuit ($I = 0$) montrent que les pertes de chaleur de la façade intérieure suffisent à chauffer l'air du canal, ce qui crée un mouvement d'air ascendant.

Résultats

Une fois les paramètres physiques de la double-peau fixés (Annexe 5.4.1), les seuls paramètres libres sont le coefficient de décharge C_d et le coefficient d'échange de chaleur air-paroi h_{c+c} . Ces deux paramètres agissant en sens opposé tant sur la vitesse que sur l'échauffement de l'air, la solution est unique.

Le meilleur calage a été obtenu en corrigeant la valeur k_{cc} du contre-cœur ainsi que le coefficient d'absorption de celui-ci :

$$\begin{array}{llll} C_d & = & 0,42 \pm 0,005 & [-] \\ h_{c+c} & = & 3,07 \pm 0,01 (+ 6,9 \cdot v^2) & [W/m^2 K] \\ k_{cc} & = & 5,42 W/m^2 K & (\text{au lieu de } 3,2 W/m^2 K) \\ a_{cc} & = & 0,6 & (\text{au lieu de } 0,7) \end{array}$$

Les principales étapes de ce calage sont récapitulées au § 5.1.1.

Du point de vue énergétique, en l'absence de rayonnement, 2/3 de l'énergie perdue par la façade est emportée par l'air alors que le 1/3 restant traverse l'écran. Pour un rayonnement intense ($\geq 500 W$), les températures du vitrage intérieur et du contre-cœur sont supérieures à la température intérieure. L'air emporte 15% du rayonnement incident alors que les gains solaires directs et indirects représentent respectivement 37% et 9%. Le solde (39%) est formé du rayonnement réfléchi auquel s'additionne la chaleur perdue par la façade vers l'extérieur.

Discussion

Bien que précieux, les résultats obtenus ci-dessus restent limités. Les mesures disponibles ne concernent que la température et la vitesse de l'air du canal de la double-peau. Pour être complètes, il manque les températures des peaux intérieure et extérieure, ainsi que la mesure des flux de chaleur.

On remarquera la robustesse du modèle, spécialement en ce qui concerne le coefficient de décharge C_d . On notera également que la modification de ce dernier influence l'échauffement de l'air, mais par le bilan énergétique.

5.1.1 Calage du modèle TQV sur les mesures

Centre industriel et artisanal (Immeuble Marcinhès).

■ Modèle avec contre-cœur, $k = 3,2$ [W/m² K], $a = 0,7$

$$C_d = 0,42 ; h_{c+c} = 3 + 6,9 \cdot v^2 \text{ [W/m}^2 \text{ K]}$$

I [W/m ²]	v [m/s]		ΔT_{air} [K]		I _{air} [W/m ²]
	mesure	calcul	mesure	calcul	
0	0,43 ± 0,04	0,41	1,2 ± 0,1	1,14	10,4
118	0,55 ± 0,02	0,55	2,0 ± 0	2,01	24,7
500	0,78 ± 0,08	0,81	4,0 ± 0,1	4,30	78,1
800	0,93 ± 0,09	0,95	5,7 ± 0,1	5,90	125,6

$$C_d = 0,42 ; h_{c+c} = 2,97 + 6,9 \cdot v^2 \text{ [W/m}^2 \text{ K]}$$

I [W/m ²]	v [m/s]		ΔT_{air} [K]		I _{air} [W/m ²]
	mesure	calcul	mesure	calcul	
0	0,43	0,41	1,2	1,14	10,4
118	0,55	0,55	2,0	2,00	24,6
500	0,78	0,81	4,0	4,29	77,8
800	0,93	0,95	5,7	5,88	125,1

- Calage des paramètres du contre-cœur : $k = 4,42 \text{ [W/m}^2\text{]}$, $a = 0,6$

$$C_d = 0,42 ; h_{c+c} = 3,07 + 6,9 \cdot v^2 \text{ [W/m}^2\text{ K]}$$

I [W/m ²]	v [m/s]		ΔT_{air} [K]		I _{air} [W/m ²] calcul
	mesure	calcul	mesure	calcul	
0	0,43 ± 0,04	0,42	1,2 ± 0,1	1,22	11,4
118	0,55 ± 0,02	0,55	2,0 ± 0	2,00	24,6
500	0,78 ± 0,08	0,79	4,0 ± 0,1	4,13	73,6
800	0,93 ± 0,09	0,93	5,7 ± 0,1	5,61	116,8

Cette solution est jugée meilleure que les deux précédentes.

- Modélisation simplifiée, sans contre-cœur

L'absence de contribution du contre-cœur est compensée par une augmentation du coefficient d'échange h_{c+c} . Il s'ensuit un déficit à $I = 0$ et un excès d'énergie transférée à l'air pour $I > 118 \text{ W/m}^2$. C_d est inchangé.

$$C_d = 0,42 ; h_{c+c} = 4,2 + 6,9 \cdot v^2 \text{ [W/m}^2\text{ K]}$$

I [W/m ²]	v [m/s]		ΔT_{air} [K]		I _{air} [W/m ²] calcul
	mesure	calcul	mesure	calcul	
0	0,43	0,40	1,2	1,10	9,9
118	0,55	0,55	2,0	2,00	24,8
500	0,78	0,81	4,0	4,28	78,0
800	0,93	0,95	5,7	5,79	123,0

5.2 Mesures en laboratoire

Ces mesures ont été réalisées par S. Citherlet sur un modèle grandeur nature en bois et verre acrylique.

Description

Le module double-peau de laboratoire est constitué d'éléments rectangulaires empilables dont les petits côtés sont isolés et les grands côtés réalisés en verre acrylique. L'action du soleil est simulée par des panneaux chauffants électriques disposés contre l'une des faces intérieures du vitrage acrylique. Six modules empilés forment un canal ouvert aux deux extrémités, d'une hauteur totale de 3,84 m (Fig. 5.2.1).

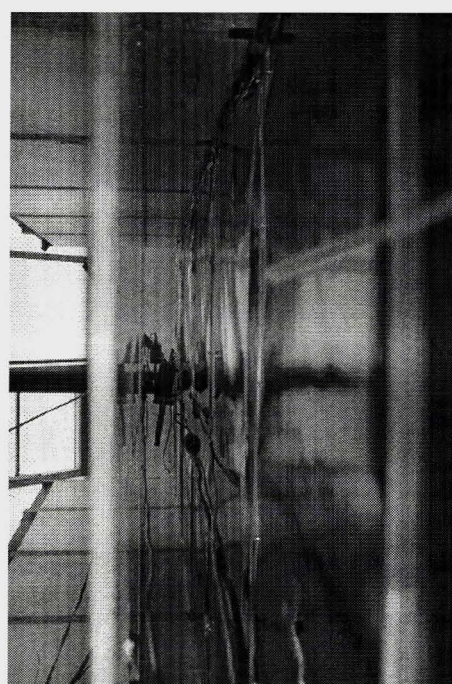
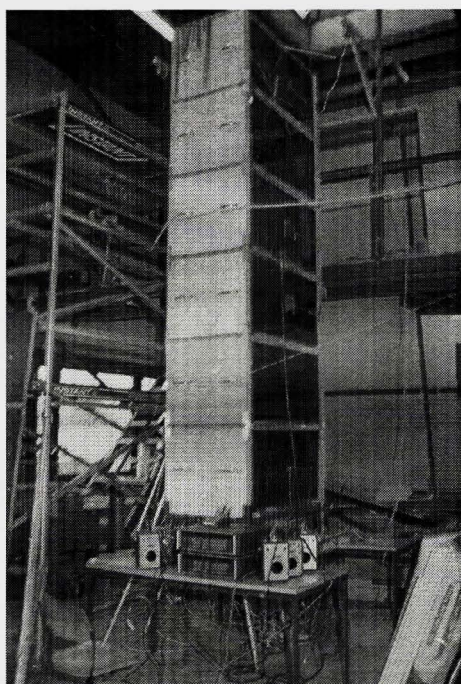


Figure 5.2.1 : Module double-peau de laboratoire.
Il est constitué de 6 modules empilables d'une hauteur totale de 3,84 m.
Des panneaux chauffants simulent l'action du soleil.

Les mesures reportées automatiquement sur une chaîne d'acquisition de mesures portent sur les *températures* des parois et de l'air (en bas, au milieu et en haut) sur les *flux de chaleur* traversant les parois (au milieu) ainsi que sur la *vitesse de l'air* (en haut). La figure 5.2.2 inventorie la position ainsi que la nature des sondes. Les principaux paramètres physiques du modèle font l'objet de l'annexe 5.4.2. Modèle de laboratoire.

Date, Heure

Puissance par panneau


Ouverture supérieure


Ouverture inférieure


Profondeur du canal

Vitesse de l'air

 Fluxmètre [W/m²]

 Sonde ventilée [°C]

 Sonde de surface [°C]

 Anémomètre [m/s]

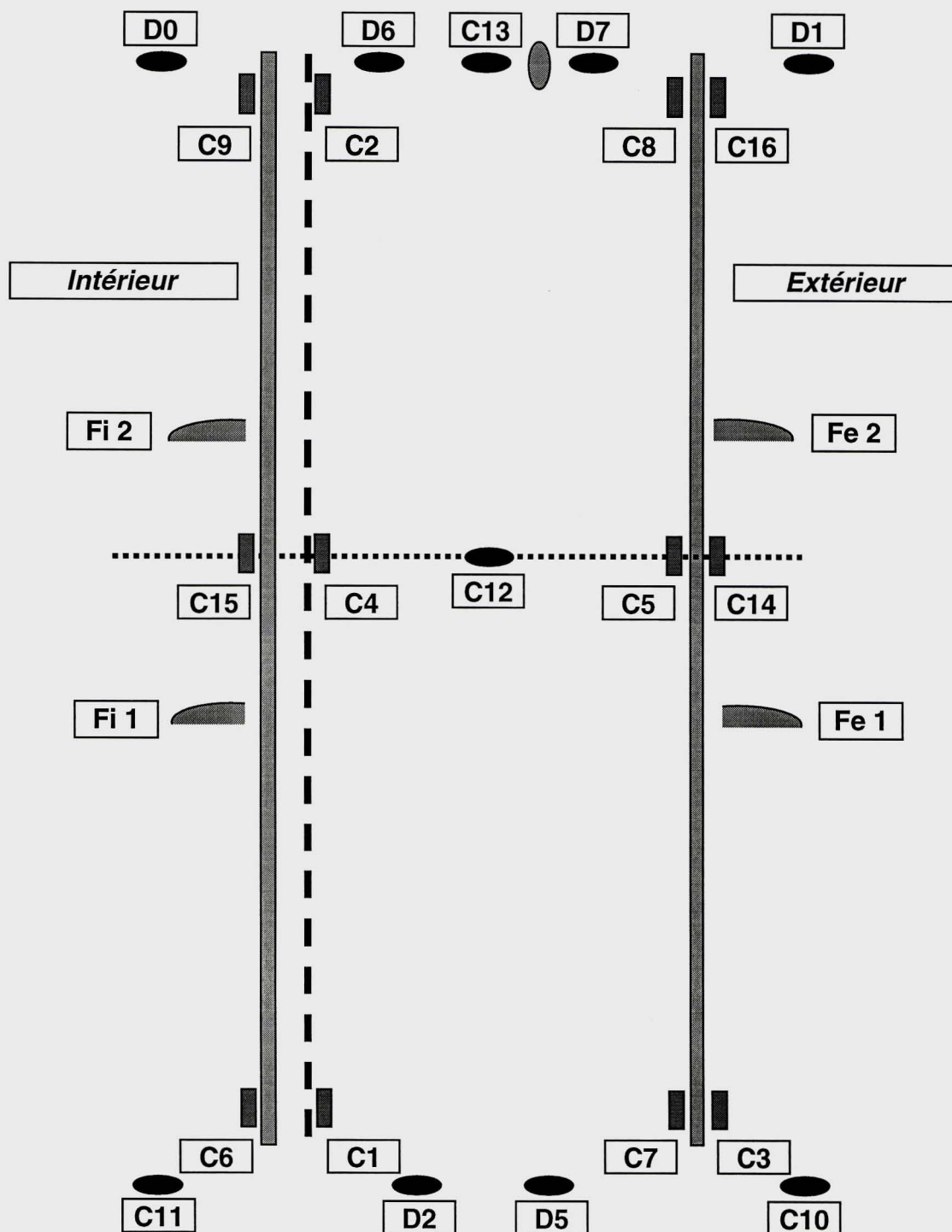


Figure 5.2.2 : Protocole de mesure avec disposition des sondes.

Mesures

Mis à part les habituels soucis d'étalonnage, les mesures de température de surface et de flux de chaleur sont satisfaisantes. Il n'en est pas de même des mesures de température et de vitesse de l'air dans la partie supérieure du canal. Ces dernières se sont trouvées perturbées par le manque de hauteur sous plafond (dans la halle du Génie civil de l'EPFL) et par le côté turbulent de l'écoulement à la sortie du canal.

Différents critères permettent de juger de la valeur réciproque de mesures réalisées à différentes puissances de chauffage :

- la puissance qui traverse les parois (de même que celle qui est emportée par l'air) est proportionnelle à la puissance de chauffage.
Ce critère permet de détecter le dysfonctionnement des fluxmètres et de corriger leur dérive éventuelle.
- l'élévation de température de l'air augmente comme la puissance de chauffage élevée à la puissance $2/3$ (racine cubique du carré de la puissance).
Ce critère permet d'apprécier la qualité de ces mesures.
- la vitesse de l'air augmente comme la racine cubique de la puissance de chauffage.
Ce critère a montré que les mesures de vitesse à basse puissance sont souvent peu fiables.

Principe de calage des mesures

La mesure des températures de surface et des flux permet de calculer, pour chaque puissance de chauffage, la valeur des coefficients de transfert " α_{ext} " et " α_{int} ". Il reste quatre paramètres à caler :

- le coefficient de transfert d'énergie des éléments chauffants vers l'écran (peau extérieure). Il est ajusté par calage de l'émissivité ε du verre acrylique,
- le coefficient de transfert d'énergie des éléments chauffants vers le verre intérieur (peau intérieure). Il est ajusté par calage de la distance d séparant ces derniers,
- le coefficient de transfert de chaleur entre les parois et l'air du canal h_{c+c} ,
- le coefficient de décharge C_d .

Les deux premiers coefficients règlent la répartition des flux de chaleur qui sortent par les parois extérieure et intérieure ainsi que la répartition des températures des vitrages. Les deux derniers influencent la température et la vitesse de l'air du canal.

Les mesures ont été faites à deux profondeurs différentes du canal : $d = 0,6$ m et $d = 0,15$ m.

5.2.1 Profondeur du canal $d = 0,6$ m

La profondeur du canal ($d = 0,6$ m) est importante par rapport à la largeur du modèle ($l = 1,24$ m), les échanges d'énergie et la circulation de l'air sont compliqués et perturbés par la présence des cotés. Le modèle de calcul (bidimensionnel) ne décrit qu'imparfaitement la réalité (tridimensionnelle). Les flux de chaleur températures et vitesses calculées sont en excellent accord avec les mesures pour les valeurs des paramètres C_d , h_{c+c} , ε et d portées sur le tableau 5.2.3.

d [m]	A_{HAUT} [m ² /m _{lin}]	A_{BAS} [m ² /m _{lin}]	C_d [-]	h_{c+c} [W/m ² K]	ε [-]	d [mm]
0,6	0,6	0,6	0,46 ± 0,01	4,0 ± 0,2 (+ 6,9 v ²)	0,29 ± 0,01	3 ± 0,5
0,6	0,25	0,25	0,46 ± 0,01	4,4 ± 0,1 (+ 6,9 v ²)	0,33 ± 0,03	3,5 ± 0,5
0,6	0,25	0,125	0,22 ± 0,005	4,45 ± 0,05 (+ 6,9 v ²)	0,43 ±	14 ± 1

Tableau 5.2.3 : Résultat du calage des mesures ($d = 0,6$ m).

Discussion

Bien qu'il soit possible d'obtenir un excellent accord sur les flux de chaleur et les températures (et partiellement sur les vitesses), on ne peut rien en conclure sur la pertinence et la validité en d'autres circonstances des paramètres C_d , h_{c+c} , ε et d qui ont permis de caler le modèle, spécialement dans le dernier cas ($A_{HAUT} = 0,25$, $A_{BAS} = 0,125$). Une étude plus approfondie de la circulation de l'air dans le modèle (expérimentale et théorique) serait nécessaire.

Calage du modèle TQV sur les mesures

- Section $0,6 \times 1,24 \text{ m}^2$; $A_{HAUT} = 0,6$, $A_{BAS} = 0,6 \text{ m}^2/\text{m}_{lin}$

$$C_d = 0,46 \pm 0,01$$

$$h_{c+c} = 4,0 \pm 0,2 (+ 6,9 \text{ v}^2) \quad [\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}]$$

$$\varepsilon = 0,29 \pm 0,01$$

$$d = 0,003 \pm 0,0005 \quad [\text{m}]$$

I	I _{ext}	I _{air}	I _{int}	T _{écran}	T _{panneau}	T _{vd}	ΔT _{air}	V _{air}
mesure 506 calcul	61,5	-	245	29,7	57	9,6	2,9	0,38
	61,6	199,3	245,1	29,7	57	39,6	2,9	0,37
mesure 380 calcul	44,4	-	184	28,0	50,4	36,6	-	-
	45	154,9	180	28,1	49,3	36,3	2,5	0,34
mesure 253 calcul	32,6	-	125	24,8	40,0	31,5	-	0,30
	31,0	105,1	116,8	24,5	39,4	30,7	1,9	0,30
mesure 127 calcul	16,2	-	63,6	23,3	32,2	26,6	-	-
	13,8	55,7	57,5	22,7	30,4	25,9	1,2	0,25
mesure ±	1%	-	1%	0,5°	0,5°	0,5°	0,2°	0,05
calcul ±	1%	1%	1%	1°	0,5°	0,1°	0,1°	0,01

Intensités [W/m^2] ; températures [$^{\circ}\text{C}$] ; vitesse [m/s]

■ Section $0,6 \times 1,24 \text{ m}^2$; $A_{\text{HAUT}} = 0,25$, $A_{\text{BAS}} = 0,25 \text{ m}^2/\text{m}_{\text{lin}}$

$$\begin{aligned} C_d &= 0,46 \pm 0,01 \\ h_{c+c} &= 4,4 \pm 0,1 (+ 6,9 \text{ v}^2) && [\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}] \\ \varepsilon &= 0,33 \pm 0,03 \\ d &= 0,0035 \pm 0,0005 && [\text{m}] \end{aligned}$$

I	I_{ext}	I_{air}	I_{int}	$T_{\text{écran}}$	T_{panneau}	T_{vd}	ΔT_{air}	V_{air}
mesure 506	62	-	217	29,9	57,4	41	5,9	0,52
	calcul	61,3	221,6	223,1	29,8	57,4	41,6	5,7
mesure 380	50,9	-	161,5	28,8	51,1	35,8	-	-
	calcul	50,9	166,6	162,5	28,8	49,6	35,9	4,7
mesure \pm	1%	-	1%	0,5°	0,5°	0,5°	0,2°	0,05
calcul \pm	1%	1%	1%	1°	0,5°	0,1°	0,1°	0,01

■ Section $0,6 \times 1,24 \text{ m}^2$; $A_{\text{HAUT}} = 0,25$, $A_{\text{BAS}} = 0,125 \text{ m}^2/\text{m}_{\text{lin}}$

$$\begin{aligned} C_d &= 0,22 \pm 0,005 \\ h_{c+c} &= 4,45 \pm 0,05 (+ 6,9 \text{ v}^2) && [\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}] \\ \varepsilon &= 0,43 \pm 0,001 \\ d &= 0,014 \pm 0,001 && [\text{m}] \end{aligned}$$

I	I_{ext}	I_{air}	I_{int}	$T_{\text{écran}}$	T_{panneau}	T_{vd}	ΔT_{air}	V_{air}
mesure 253	35,7	-	90,2	26,2	41,8	29,6	8,5	-
	calcul	35,5	127,3	90,2	26,1	41,5	26,9	8,4
mesure 127	19,6	-	47,2	24,0	32,9	25,7	4,6	-
	calcul	19,2	61,4	46,4	23,9	32,0	25,6	5,2
mesure \pm	1%	-	1%	0,5°	0,5°	0,5°	0,2°	-
calcul \pm	1%	1%	1%	1°	0,5°	0,1°	0,1°	0,01

5.2.2 Profondeur du canal $d = 0,15$ m

Des mesures ont été réalisées pour deux valeurs différentes des ouvertures A_{HAUT} et A_{BAS} . Les flux, températures et vitesses calculés sont en excellent accord avec les mesures pour les valeurs des paramètres C_d , h_{c+c} , ε et d portées sur le tableau 5.2.4.

d [m]	A_{HAUT} [m ² /m _{lin}]	A_{BAS} [m ² /m _{lin}]	C_d [-]	h_{c+c} [W/m ² K]	ε [-]	d [mm]
0,15	0,15	0,15	0,365 ± 0,05	3,4 ± 0,1 (+ 6,9 v ²)	0,49 ± 0,02	7 ± 1
0,15	0,075	0,075	0,54 ± 0,03	2,4 ± 0,1 (+ 6,9 v ²)	0,48 ± 0,01	6 ± 1

Tableau 5.2.4 : Résultat du calage des mesures ($d = 0,15$ m).

Calage du modèle TQV sur les mesures

- Section 0,15 x 1,24 m²; $A_{\text{HAUT}} = 0,15$, $A_{\text{BAS}} = 0,15$ m²/m_{lin}

$$\begin{aligned}
 C_d &= 0,365 \pm 0,005 \\
 h_{c+c} &= 3,4 \pm 0,1 (+ 6,9 v^2) && [\text{W/m}^2 \text{ K}] \\
 \varepsilon &= 0,49 \pm 0,01 \\
 d &= 0,007 \pm 0,001 && [\text{m}]
 \end{aligned}$$

l	l_{ext}	l_{air}	l_{int}	T_{écran}	T_{panneau}	T_{vd}	ΔT_{air}	v_{air}
mesure 380	64,8	-	161,9	31,1	52,8	35,8	7,2	0,48
	calcul	64,5	154,2	161,3	31,0	52,8	7,2	0,47
mesure 253	44,4	-	108,8	28,3	43,8	31,3	5,4	0,43
	calcul	41,4	105,2	106,4	27,6	42,7	5,5	0,42
mesure 123,2	19,7	-	50,6	24,5	32,6	25,8	3,4	0,32
	calcul	18,0	54,6	50,6	24,0	31,7	3,6	0,34
mesure ±	6%	-	2%	0,5°	0,3°	0,3°	0,2°	0,02
calcul ±	1%	1%	1%	1°	0,5°	0,1°	0,05°	0,01

■ Section 0,15 x 1,24 m²; A_{HAUT} = 0,075, A_{BAS} = 0,075 m²/m_{lin}

C _d	=	0,54 ± 0,03	
h _{c+c}	=	2,4 ± 0,1 (+ 6,9 v ²)	[W/m ² K]
ε	=	0,48 ± 0,01	
d	=	0,006 ± 0,001	[m]

I	I _{ext}	I _{air}	I _{int}	T _{écran}	T _{panneau}	T _{vd}	ΔT _{air}	V _{air}
mesure 504	95,5	-	211,9	31,2	59,7	39,6	9,69	0,83
	calcul	95,5	196,7	211,8	31,2	59,7	10,32	0,83
mesure 395	74,9	-	166,1	28,8	52,1	35,0	8,24	-
	calcul	74	152,3	168,7	28,6	51,9	8,67	0,76
mesure 253	48	-	106,5	25,4	42,2	29,5	6,36	-
	calcul	47,4	96,3	109,4	25,3	41,1	6,36	0,66
mesure 127	24	-	53,3	21,1	29,6	23,9	3,99	-
	calcul	24,7	47,8	54,5	21,3	30,0	3,97	0,52
mesure ±	5%	-	5%	0,3°	0,3°	0,3°	0,5°	0,052
calcul ±	1%	1%	1%	0,1°	0,1°	0,1°	0,3°	4%

5.2.3 Conclusion

Les mesures en laboratoire sur modèle grandeur nature sont le complément indispensable des mesures réalisées in-situ sur des objets réels. Celles présentées ci-dessus ont permis de s'assurer de la validité du modèle développé : les températures peuvent être reproduites à mieux que 0,5°C près et les flux de chaleur à 1% près (à condition de connaître exactement les valeurs de α_{ext} et α_{int}). Aucune tentative n'a par contre été faite pour prédire théoriquement les valeurs du coefficient de décharge C_d et la conductance thermique surfacique h_{c+c}.

La hauteur du canal (H = 3,84 m) ainsi que sa largeur (1,24 m) ont été dictées par des limitations de place (hauteur sous plafond de la halle) et de moyens (coût, disponibilité). Ces dimensions limitent fortement la portée des résultats trouvés qui ne peuvent en aucun cas être transposés tel quel dans la pratique.

5.3 Mesures in-situ

Les mesures in-situ ont porté sur deux bâtiments situés dans l'Ouest lausannois : le bâtiment des Telecom PTT à Ecublens ainsi que le bâtiment Felimob à Bussigny.

5.3.1 Bâtiment des Telecom-PTT

Description

Le bâtiment des Telecom-PTT situé au Nord de la route du Lac à l'extrémité Sud-Est de la parcelle de l'EPFL est aisément identifiable par la superstructure métallique qui reçoit des antennes et des plates-formes de service (Fig. 5.3.1-1). La façade Est qui abrite les fonctions administratives est fermée par une double-peau formée d'un écran en simple vitrage et d'une façade intérieure entièrement vitrée. Des volets mobiles sont aménagés dans l'écran. Un caillebotis permet la circulation à chaque étage (pour le nettoyage) et des clapets en position supérieure permettent de fermer le canal de la double-peau en saison froide (Fig. 5.3.1-2). Les données techniques de la façade double-peau font l'objet de l'Annexe 5.4.3.

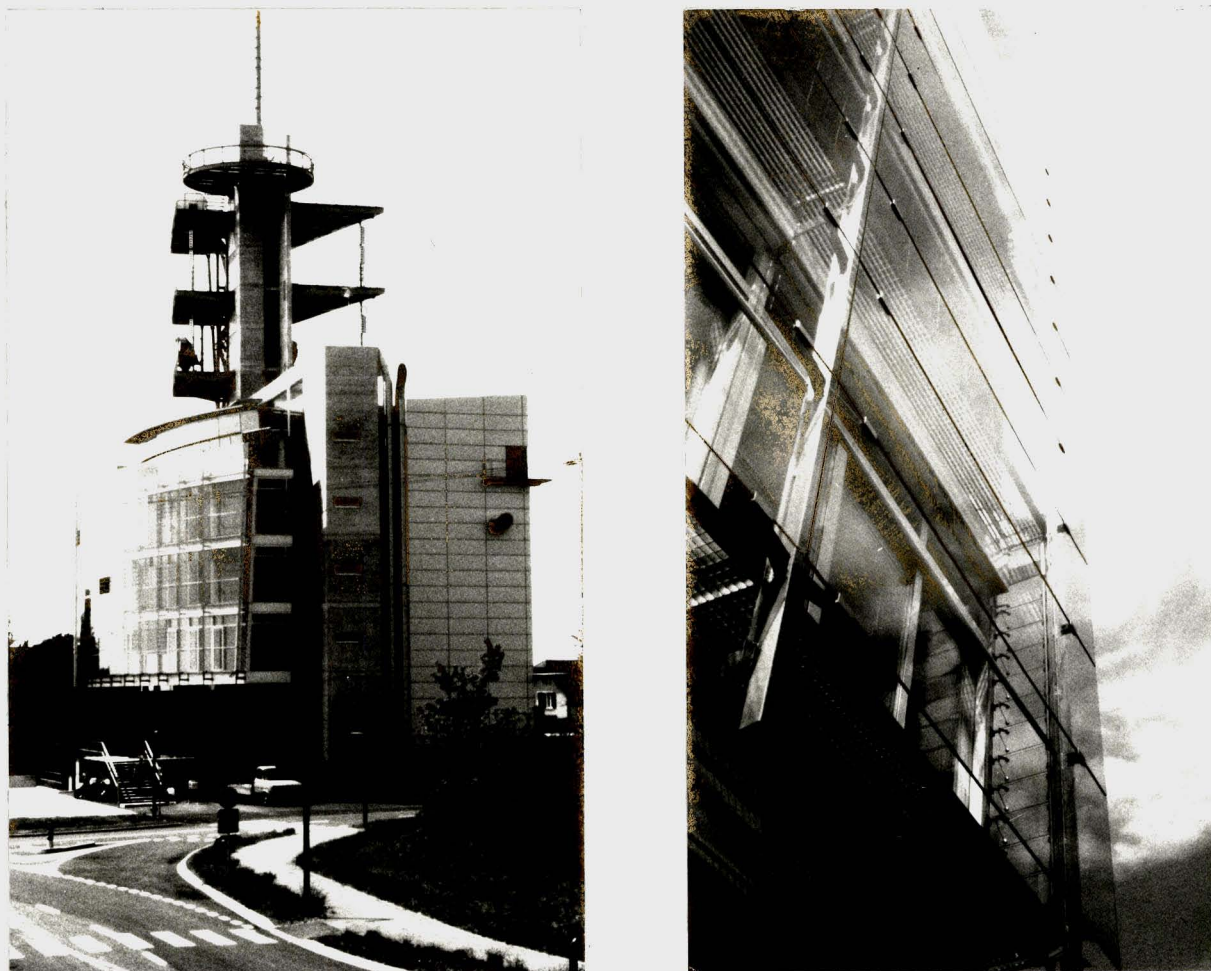


Figure 5.3.1-1 : Bâtiment des Telecom-PTT

Ce bâtiment situé sur le terrain de l'EPFL à Ecublens est pourvu d'une double-peau sur sa façade Est. Un caillebotis permet à chaque étage de procéder aux travaux de nettoyage et d'entretien.

Façade Est (double-peau)
Coupe technique

- | | | | |
|----|--|----|---|
| 1 | Toiture ventilée zinc titane | 11 | Assemblage Louvres ouvrants pour nettoyage façade depuis galerie |
| 2 | Isolation laine de verre sur panneaux alu | 12 | Clapet de ventilation (position hiver fermé, position été ouvert) |
| 3 | Pannes UNP | 13 | Console inox de support écran |
| 4 | Charpente métallique profils IPE soudés | 14 | Grille Caillebotis inox |
| 5 | Store d'obscurcissement | 15 | Façade triple vitrage avec porte-fenêtre coulissante |
| 6 | Façade triple vitrage fixe avec couche sélective | 16 | Panneau plein isolé alu |
| 7 | Ecran vitré | 17 | Partie vitrage fixe |
| 8 | Support vertical inox profil T | 18 | Dallage en granit noir |
| 9 | Bras inox de fixation verres avec pattes de réception | 19 | Isolation en pente sur étanchéité et dalle béton armé |
| 10 | Louvres en verre orientables jusqu'à 90° à l'horizontale | | |

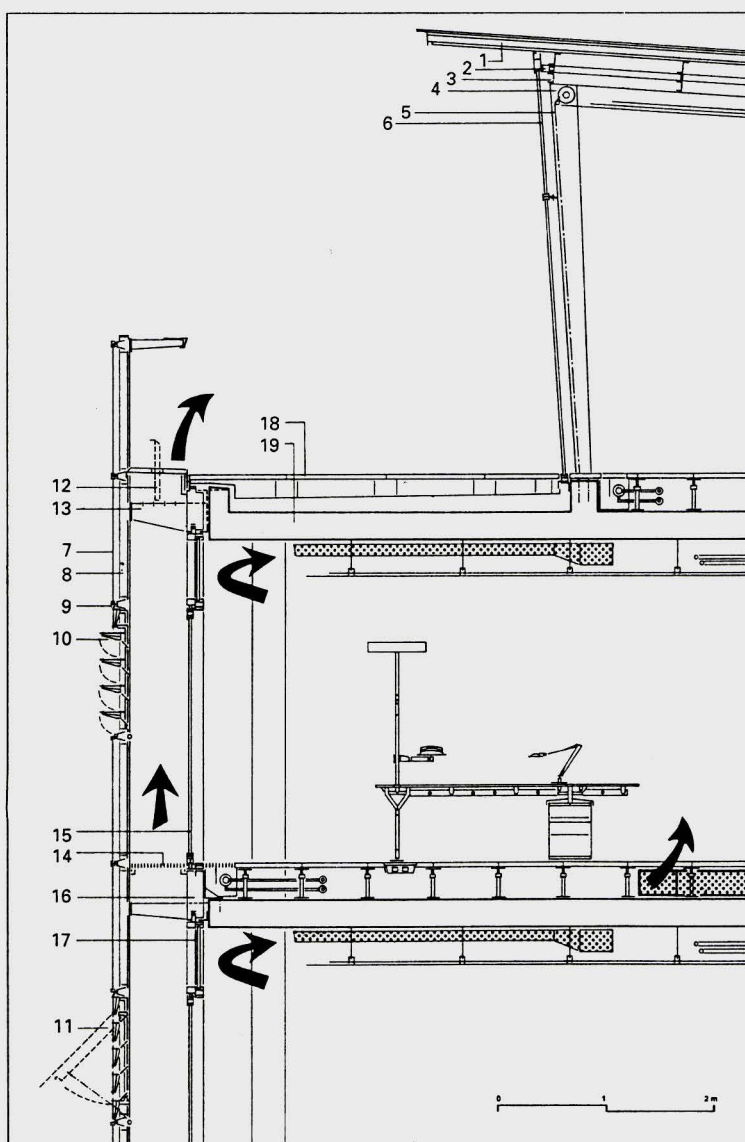


Figure 5.3.1-2 : Bâtiment des radio-communications Telecom-PTT, Lausanne-Ecublens
 Façade Est (double-peau).

Source : Construire en acier 2/1996.

**Mesures sur la Façade
Télécom PTT**
Date : .
Météo LESO
Text: [°C]
Vent: [m/s]
IhGlobal: [W/m²]
IhDiffus: [W/m²]

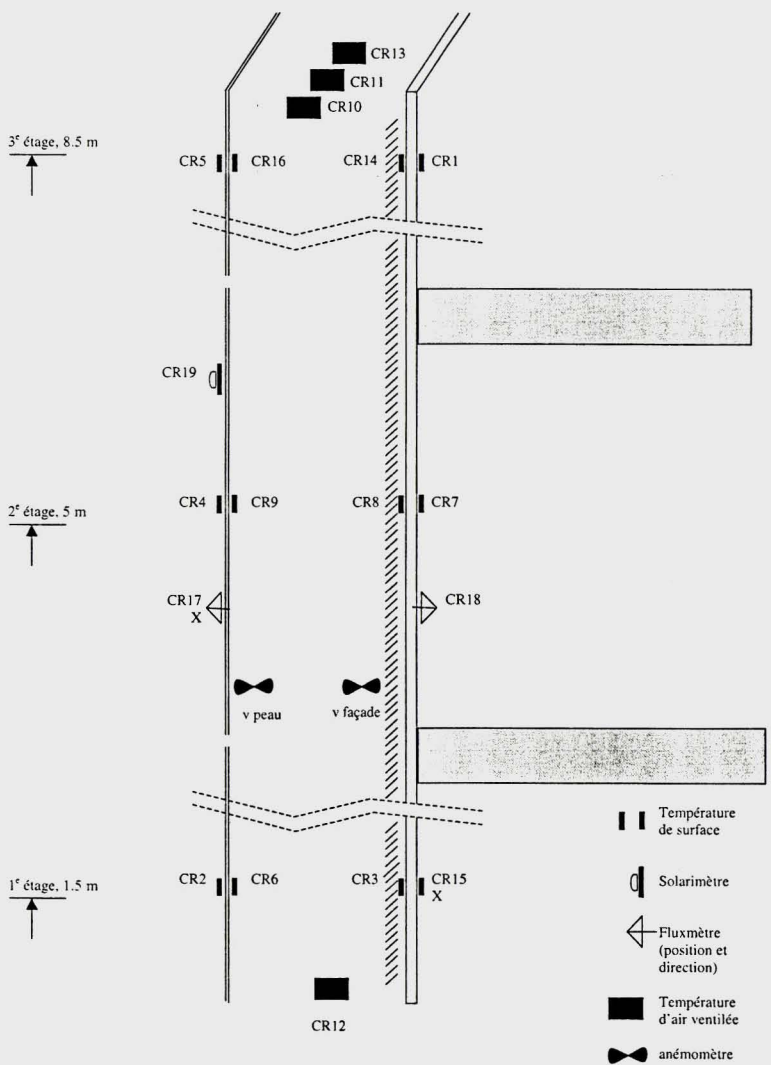
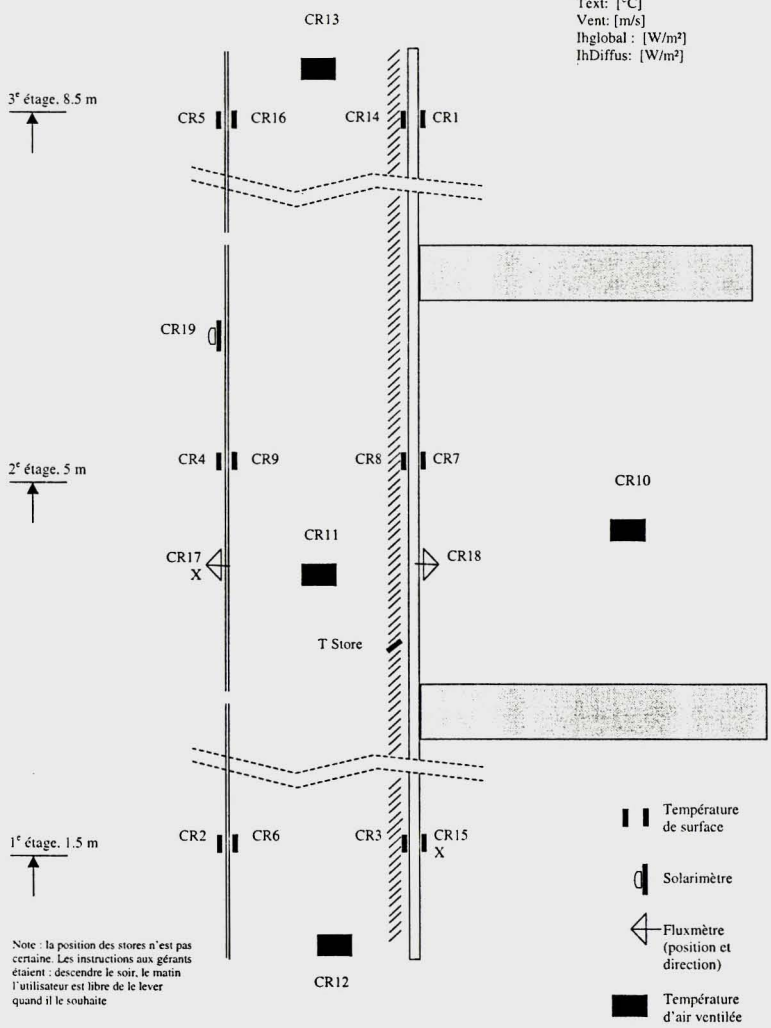


Figure 5.3.1-3 : Bâtiment des Telecom-PTT, Lausanne-Ecublens
Nature et disposition des sondes de mesure. Durant la campagne de mesures de septembre 1996, la mesure des vitesses de l'air dans le canal a été supprimée au profit de la mesure de la température de l'air à mi-hauteur, ainsi que de la mesure de la température intérieure.

Mesures

Des campagnes de mesure ont été organisées en mars-avril 1996, puis en septembre 1996. La nature et la disposition des sondes se trouvent sur la Figure 5.3.1-3. Le compte-rendu détaillé de ces mesures fait l'objet du Dossier Telecom-PTT.

Compte tenu de la grande profondeur de la double-peau, il n'a pas été possible de faire des observations précises des mouvements de l'air au moyen d'un dispositif de production de fumée. Seule l'importance du vent latéral sur le déplacement de l'air dans la double-peau a été mise en évidence.

Résultats

Mesures de nuit (septembre 96)

En faisant la moyenne des mesures prises de nuit (entre 21h00 et 06h00) du 7 au 12 sept. 96, on obtient le Tableau 5.3.1-4 qui appelle les commentaires suivants :

- en moyenne sur la période considérée, l'écran est à la même température que l'air extérieur. Il ne peut par conséquent qu'échanger de la chaleur par rayonnement avec la voûte céleste,
- la température de l'air du canal est voisine ou égale à la température de l'air extérieur. Par conséquent, le store (baissé) ne peut échanger de la chaleur avec l'écran que par rayonnement ($h_r \cong 4,21 \text{ W/m}^2\text{K}$),
- la différence entre le flux de chaleur qui traverse le vitrage (par ex. $8,7 \text{ W/m}^2$) et celui qui parvient à l'écran ($4,6 \text{ W/m}^2$) nous donne le flux emporté par l'air ($4,1 \text{ W/m}^2$). Il représente en moyenne 47% des pertes totales,
- les bilans instantanés (08.09.96 – 23h00 et 11.09.96 – 03h00) sont en accord avec les conclusions précédentes.

En reportant la différence de température entre le vitrage extérieur (de la façade intérieure) et l'air extérieur en fonction de la vitesse du vent (Fig. 5.3.1-5), on constate que cette différence de l'ordre de 3°C par vent faible ($v < 0,5 \text{ m/s}$) tend vers 2°C par vent fort ($v > 6 \text{ m/s}$). Il en est de même pour le store. Globalement on constate donc que de nuit, l'écran joue surtout un rôle de protection contre le vent et n'est traversé que par un flux de 3 à 6 W/m^2 qui représente les pertes vers le ciel.

En attribuant à α_{ext} une valeur de $15 \text{ W/m}^2\text{K}$ (vent de $2,3 \text{ m/s}$), on obtient le Tableau 5.3.1-6.

7-12 sept. 96 21h00-06h00	Extérieur	Ecran	Canal	Store	Vitrage	Intérieur	k	Unités
Flux de chaleur	4,6 (53%)	4,6	4,1 (47%)	8,7	8,7	8,7	--	W/m ²
Températures	10,6	10,6	10,5	11,7	13,3 / 20,7	22,1	--	°C
Coefficients de transfert	--	--	5,9	5,4	1,18	6,2	0,76 ± 4%	W/m ² K
			3,2					
8 sept. 96 23h00								
Flux de chaleur	3 (39%)	3	4,7 (61%)	7,7	7,7	7,7	--	W/m ²
Températures	11,7	11,7	11,62	12,4	13,8 / 20,6	22,01	--	°C
Coefficients de transfert	--	--	11,0	5,7	1,13	5,4	0,75	W/m ² K
			3,7					
11 sept. 96 03h00								
Flux de chaleur	5,9 (57%)	5,9	4,5 (43%)	10,4	10,4	10,4	--	W/m ²
Températures	9,7	9,6	9,61	11	12,8 / 29,9	22,38	--	°C
Coefficients de transfert	--	--	8,0	5,9	1,28	6,8	0,82	W/m ² K
			3,4					

Tableau 5.3.1-4 : Bâtiment Telecom-PTT

Caractéristiques thermiques de nuit. Saison froide.

Conditions météorologiques : 7-12 sept. 96, entre 21h00 et 06h00 et 08.09.96, 23h00, 11.09.96, 03h00.

Sur la période observée, en moyenne 47% de la chaleur est transmise à l'air qui circule dans la double-peau.

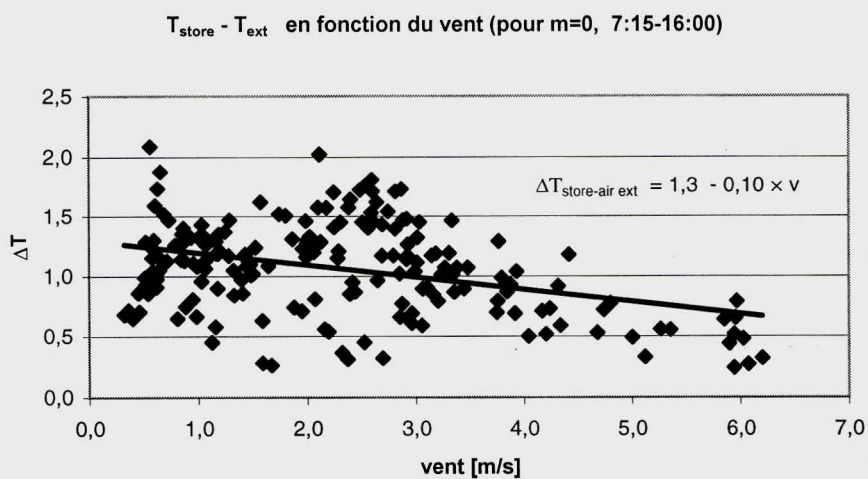
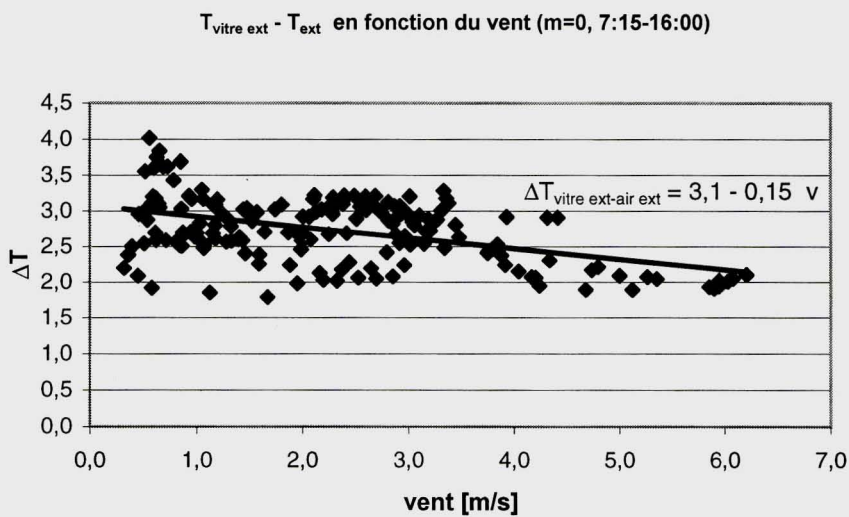


Figure 5.3.1-5 : Bâtiment Telecom-PTT. Effet du vent.
 En l'absence de rayonnement ($m = 0$), la température du vitrage extérieur de la paroi intérieure n'est que peu sensible à la force du vent extérieur. Il en est de même pour le store (baissé).
 Mesures du 7 au 12 sept. 1996.

Ecran	Store baissé	Valeur k	Amélioration
non	non	0,93	--
oui	non	0,88	5%
non	oui	0,80	14%
oui	oui	0,76	18%

Tableau 5.3.1-6 : Immeuble Telecom-PTT. Effet de l'écran et de l'abaissement du store.

On constate le rôle important joué par le store. Les calculs des valeurs k ne tiennent pas compte de la présence du cadre de fenêtre, elles sont de ce fait optimistes (k en W/m²K).

De nuit, l'effet de l'écran seul (-5%) est de peu d'intérêt par rapport à celui du store baissé (-14%). La combinaison des deux éléments conduit à un potentiel d'économie (vitrages uniquement) de 18%.

Mesures de jour

L'observation des températures par un jour ensoleillé (Fig. 5.3.1-7) montre clairement la relation entre leur évolution et le rayonnement incident sur la façade. Cette dernière (orientée à l'Est) reçoit du rayonnement direct et diffus jusqu'à 12h00 puis seulement du rayonnement diffus. Le déphasage des températures par rapport au rayonnement est très faible : moins de 2 heures. L'échauffement de l'air dans la double-peau dépend essentiellement (et pratiquement sans retard par rapport à celle-ci) de la température de la façade intérieure (vitres, cadres, store baissé).

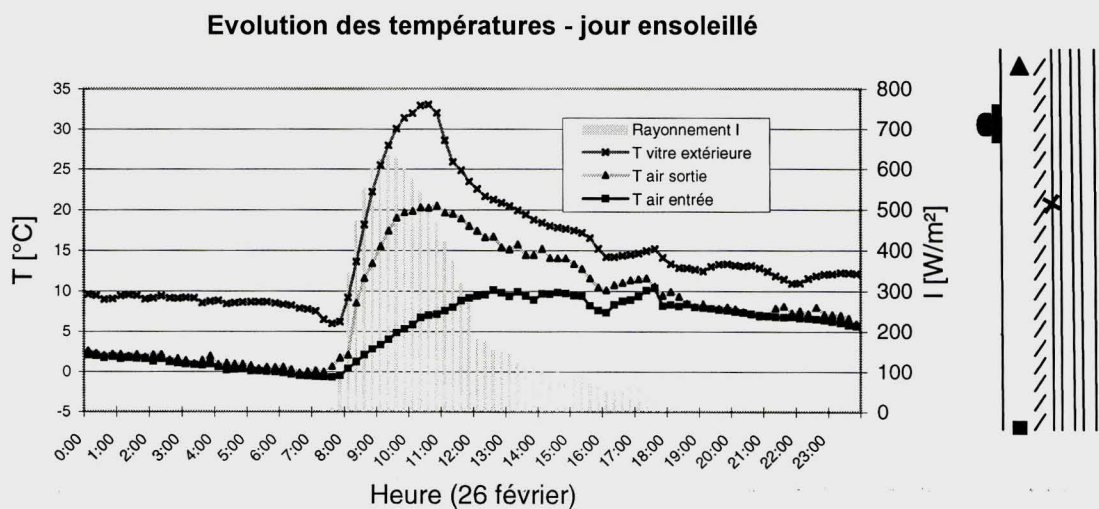


Figure 5.3.1-7 : Evolution des températures – jour ensoleillé.

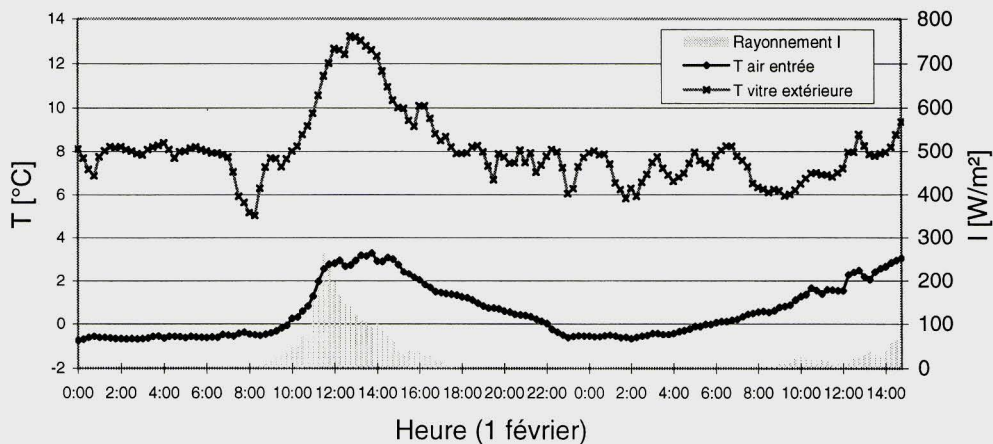
La façade orientée à l'Est reçoit un rayonnement direct et diffus jusqu'à 12h00, puis seulement diffus par la suite. Les températures de la façade et de l'air à la sortie du canal de la double-peau suivent l'évolution du rayonnement avec un déphasage de moins de 2 heures.

Mesures : 26 février 1996.

La mesure des vitesses de l'air dans le canal de la double-peau permet de vérifier le fait que leur répartition n'est pas homogène : la vitesse de l'air est plus forte le long de l'écran et de la peau intérieure qu'au centre et ce n'est qu'à partir d'une certaine hauteur que l'air se met en mouvement dans toute la section du canal (surtout si ce dernier est relativement profond). La figure 5.3.1-8 montre l'évolution du rayonnement solaire et des températures de l'air (à l'entrée du canal) et de la vitre extérieure (graphique du haut). Les vitesses de l'air le long de l'écran et de la façade intérieure (graphique du bas) fluctuent énormément. Leurs valeurs moyennes (sur quelques heures) sont corrélées avec l'évolution des températures.

Dans la présentation des résultats ci-après, toutes les mesures telles que $m = I / (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) < 0,4 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ ont été omises afin de ne pas fausser la corrélation de jour par le résultat des mesures nocturnes ($m = 0$).

Rayonnement solaire et températures



Vitesses de l'air dans le canal

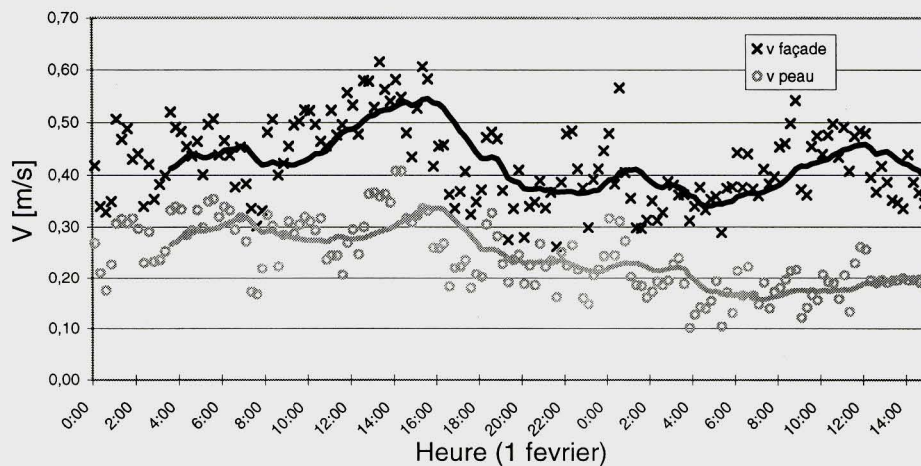


Figure 5.3.1.-8 : Vitesse de l'air dans le canal de la double-peau.

Le mouvement ascendant de l'air prend naissance dans le canal de la double-peau le long de l'écran et de la peau intérieure. Sous l'action du rayonnement, la vitre (et le store) s'échauffe (graphique du haut). Les vitesses de l'air le long de l'écran et de la façade intérieure (graphique du bas) fluctuent très fortement. Leurs valeurs moyennes (sur quelques heures) sont corrélées avec l'évolution des températures. Mesures : 1^{er} février 1996.

Les observations principales sont les suivantes :

■ Vitre extérieure de la peau intérieure

La température de cette vitre (de même que celle du store lorsqu'il est baissé) influe fortement le mouvement de l'air dans le canal de la double-peau. En séparant les mesures en deux classes (avant et après 9h00 du matin), on obtient une augmentation linéaire de la température du vitrage en fonction du rayonnement incident (Fig. 5.3.1-9). En début de matinée, la température de la vitre (durant la période de mesures) est de 10,8°C, elle augmente de 1,5 K par 100 W/m² du rayonnement incident.

En reportant la température du vitrage en fonction de la variable météorologique $m = I / (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})$, on s'affranchit des valeurs particulières des températures intérieure et extérieure (Fig. 5.3.1-10). On obtient un meilleur calage des mesures, spécialement de celles prises entre 9h00 et 16h00. A faible rayonnement ($m < 0,4$), la température de la vitre est de 16,8°C.

En étudiant la différence de température entre le vitrage extérieur (de la peau intérieure) et l'air extérieur, on observe que cette différence est toujours positive ($T_{\text{vitrage}} > T_{\text{ext}}$) durant la période considérée (Fig. 5.3.1-11). En début de matinée, elle augmente de 1,4 K par 100 W/m² de rayonnement incident. En fin d'après-midi ($I < 100 \text{ W/m}^2$), cette différence devient indépendante de la valeur prise par le rayonnement.

■ Store

Le store (baissé) s'échauffe fortement en présence de rayonnement (Fig. 5.3.1-12), pratiquement deux fois plus que le vitrage qu'il protège. On observe une croissance linéaire de la différence de température $\Delta T = T_{\text{store}} - T_{\text{ext}}$ en fonction du rayonnement en début de matinée de 3 K par 100 W/m². Plus tard, la loi cesse d'être linéaire et la différence de température est nulle pour de faibles valeurs du rayonnement (fin d'après-midi, $I < 100 \text{ W/m}^2$).

■ Effet du vent

En présence de rayonnement ($m > 0$) aucune corrélation n'est décelable entre la différence de température $\Delta T = T_{\text{store}} - T_{\text{ext}}$ et la vitesse du vent (Fig. 5.3.1-13).

■ Echauffement de l'air dans le canal

L'échauffement de l'air dans le canal de la double-peau (hauteur du canal 10,6 m) est une fonction linéaire du rayonnement incident (Fig. 5.3.1-14). Il est de 0,94 K par 100 W/m² de rayonnement incident. En dessous de 100 W/m², il n'y a pas d'échauffement significatif de l'air. La différence de température à l'origine (0,7 K) provient des pertes thermiques de la façade ($T_{\text{int}} > T_{\text{ext}}$ sur la période considérée).

En reportant la différence de température de l'air entre le haut et le bas du canal de la double-peau en fonction de l'intensité du rayonnement incident (Fig. 5.3.1-15), on observe un groupe compact de mesures pour $I = 100 \text{ W/m}^2$ ($0 < \Delta T < 2 \text{ K}$) suivi d'un nuage de points dont certains présentent des valeurs négatives ($T_{\text{sortie}} < T_{\text{entrée}}$) et ceci même pour des valeurs élevées du rayonnement.

■ Température de la vitre intérieure

La température de surface de la vitre intérieure a une grande influence sur la sensation de confort thermique de l'occupant du local. En début de matinée, sa température relativement basse (Fig. 5.3.1-16) n'est toutefois que peu inférieure à celle de l'air intérieur (différence inférieure à 2 K). Elle augmente assez rapidement sous l'effet du rayonnement ($m \neq 0$). Plus tard dans la journée, sa température descend rarement en dessous de 17°C et est une fonction linéaire de la variable météorologique $m = I / (T_{\text{int}} > T_{\text{ext}})$. Au-dessus de 25°C, il y a risque de surchauffe pour l'occupant.

En reportant la différence de température $\Delta T = T_{\text{vitrage intérieur}} - T_{\text{int}}$ en fonction de la variable météorologique $m = I / (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})$, on s'affranchit de l'effet des valeurs particulières de T_{int} et T_{ext} (Fig. 5.3.1-17). On observe qu'en début de matinée la vitre est plus froide que l'air intérieur : $\Delta T = 1,8$ K pour $m = 0$. Plus tard dans la journée, cette différence est réduite à $-0,6$ K et devient nulle pour $m = 8,4$ W/m²K (par exemple $I = 164$ W/m² et $T_{\text{int}} - T_{\text{ext}} = 20$ K) : il n'y a plus de pertes thermiques à travers le vitrage. Ceci dénote une très grande sensibilité au rayonnement incident qui conduit à un bilan thermique favorable accompagné d'une forte prédisposition aux surchauffes, et ceci même lorsque le store est baissé.

Discussion

La façade double-peau du bâtiment des Telecom-PTT est un élément à haute isolation thermique ($0,76 < k_{\text{partie vitrée}} < 0,88$). Très fortement vitré, il présente par conséquent un déphasage en température très faible (moins de 2 heures) par rapport au rayonnement incident et pratiquement nul par rapport aux variations journalières de la température extérieure. La façade profite de gains solaires très importants : store baissé, la température du vitrage intérieur devient égale à celle de l'air intérieur (pertes thermiques nulles) pour une valeur de la variable météorologique $m = 8,4$ W/m² K (par exemple $I = 164$ W/m² et $T_{\text{int}} - T_{\text{ext}} = 20$ K). Cette situation favorable en saison froide peut rapidement conduire à des surchauffes déjà à l'entre-saison si ces gains ne sont pas évacués par une ventilation (ou un rafraîchissement) approprié. En orientation Ouest, le risque de surchauffe serait encore accru.

De nuit, la peau extérieure forme avant tout écran contre le vent. A elle seule, elle n'apporte qu'une faible réduction des pertes (5 à 8%). Près de la moitié des pertes thermiques est emportée par l'air qui traverse la double-peau (de bas en haut).

De jour l'écran (qui n'offre qu'une protection acoustique très modeste) amplifie les gains de chaleur en saison froide, mais freine l'évacuation de la chaleur en saison chaude.

Les stores installés entre les deux peaux jouent un rôle majeur dans la réduction des pertes thermiques nocturnes (14% de réduction des pertes à eux seuls, 18% en combinaison avec l'écran pour la partie vitrée uniquement) et le contrôle des gains solaires de jour.

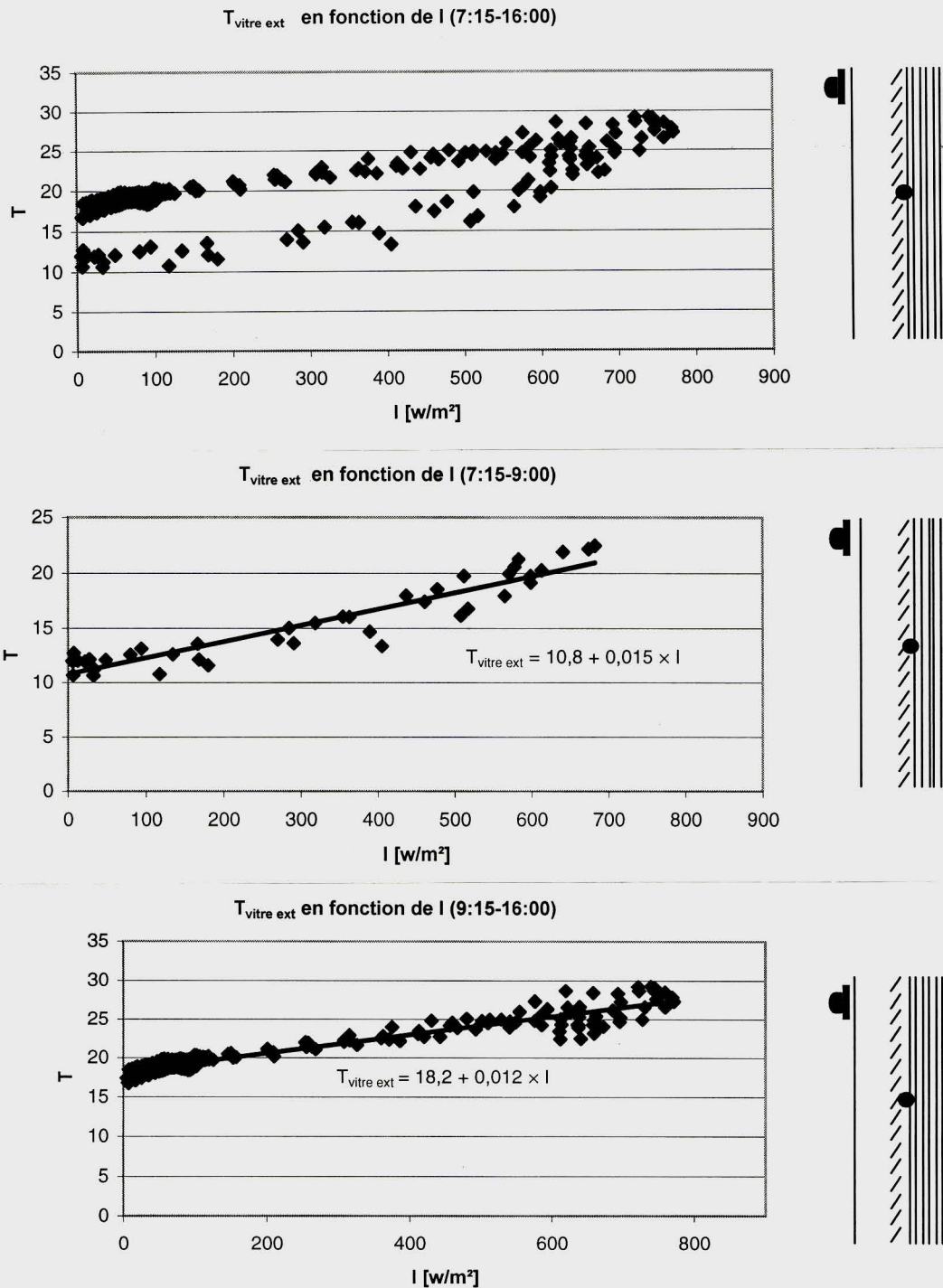


Figure 5.3.1-9 : Bâtiment Telecom-PTT. Echauffement du vitrage.
 Température de la vitre extérieure (du vitrage intérieur) en fonction du rayonnement incident. En début de matinée, la température de la vitre est de 10,8°C. Elle augmente de 1,5 K par 100 W/m² de rayonnement incident. Mesures du 7 au 12 septembre 1996.

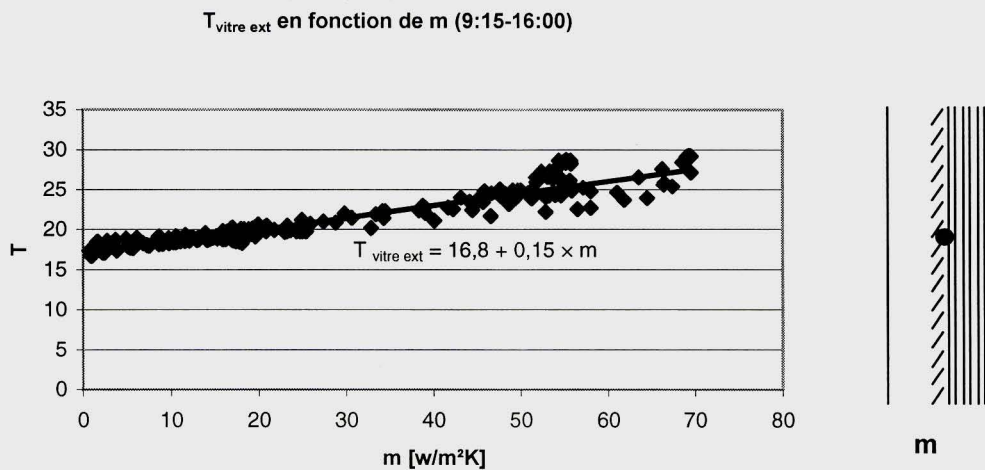
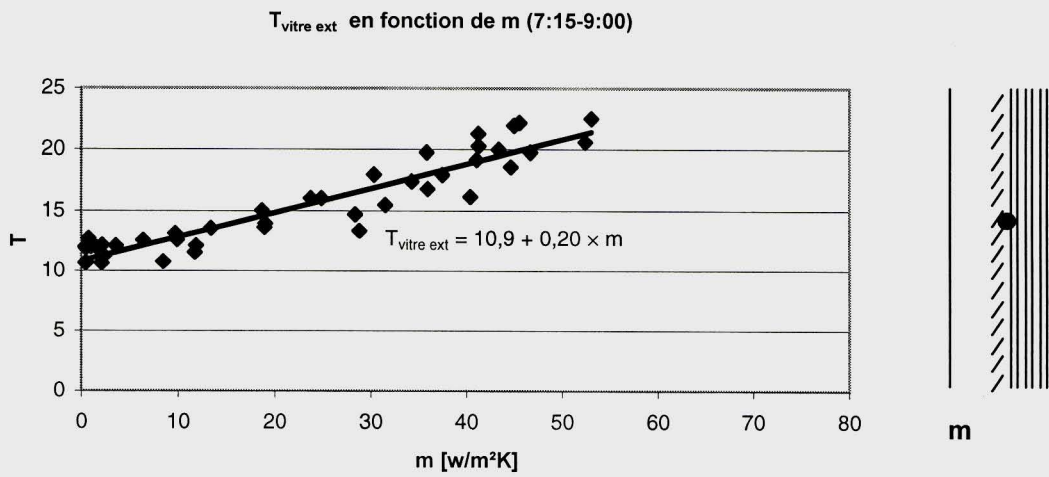
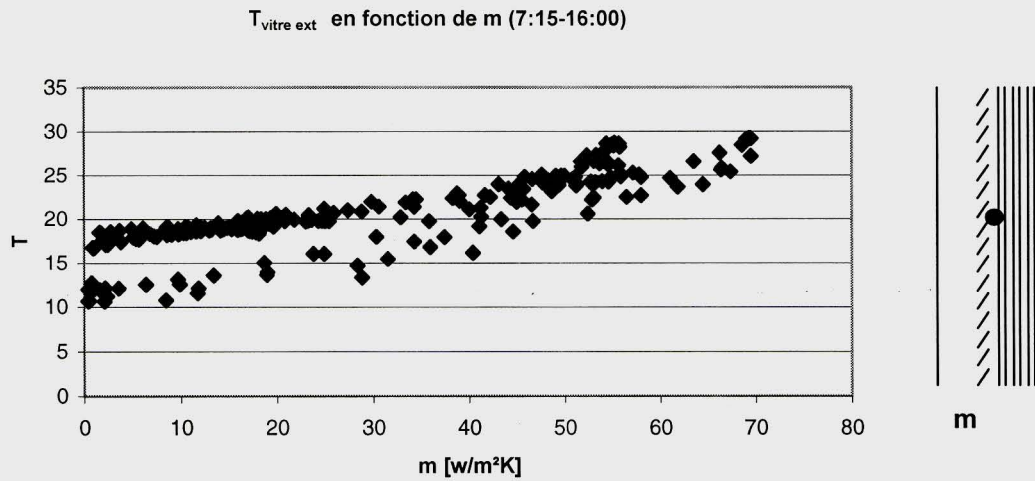


Figure 5.3.1-10 : Bâtiment Telecom-PTT. Echauffement du vitrage.

Température de la vitre extérieure en fonction de la variable météorologique $m = I / (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})$. En séparant les mesures en deux classes (avant et après 9h00), on obtient un excellent calage des mesures en fonction de m .

Mesures du 7 au 12 septembre 1996.

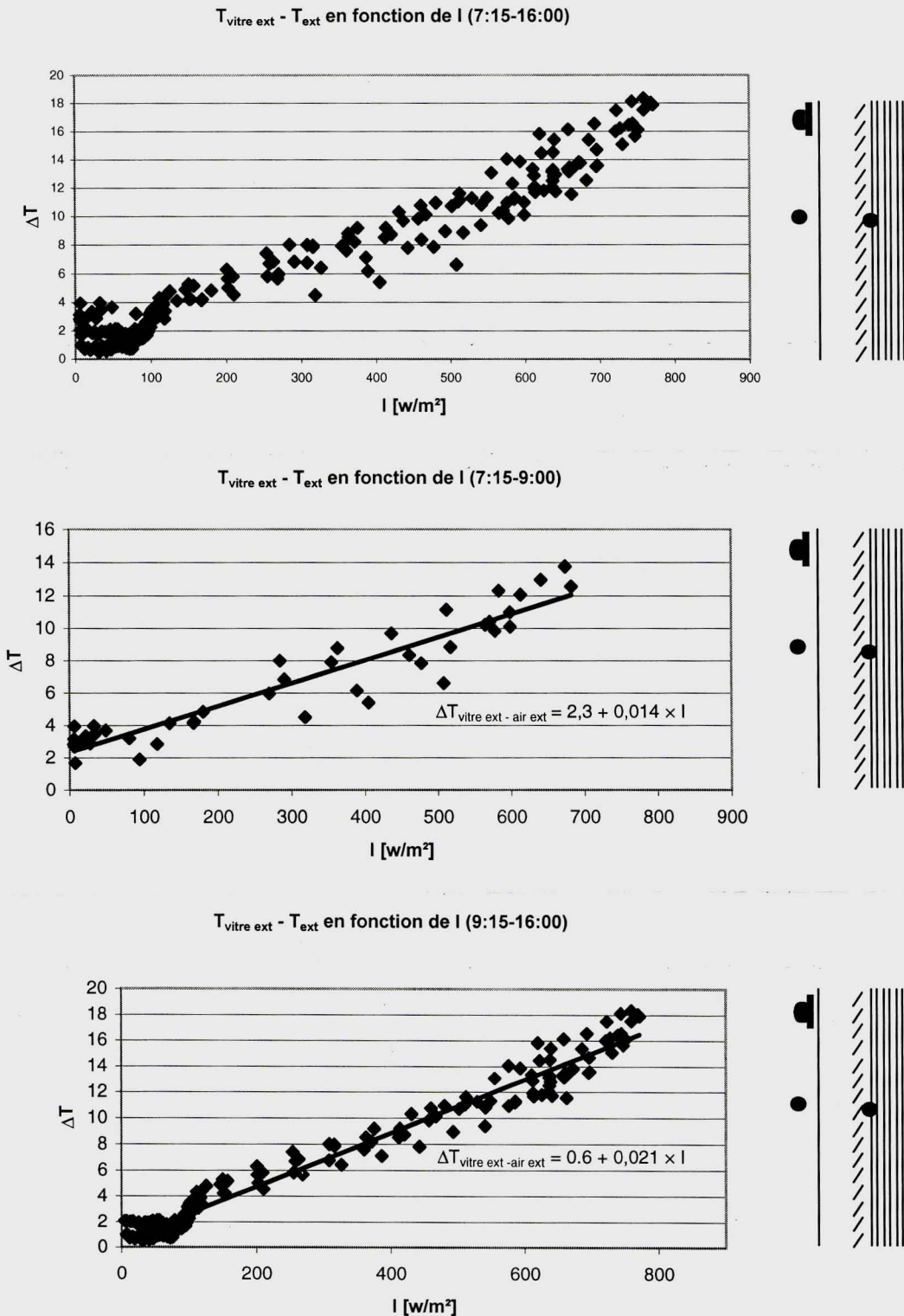


Figure 5.3.1-11 : Bâtiment Telecom-PTT. Echauffement du vitrage.

Différence de température entre la vitre extérieure (de la peau intérieure) et l'air extérieur en fonction du rayonnement incident sur la paroi.

Durant la période de mesure, le vitrage dont la température est d'environ 2K supérieure à celle de l'air extérieur voit sa température augmenter linéairement en fonction de I sauf en fin d'après-midi ($I < 100 \text{ W/m}^2$).

Mesures du 7 au 12 septembre 1996.

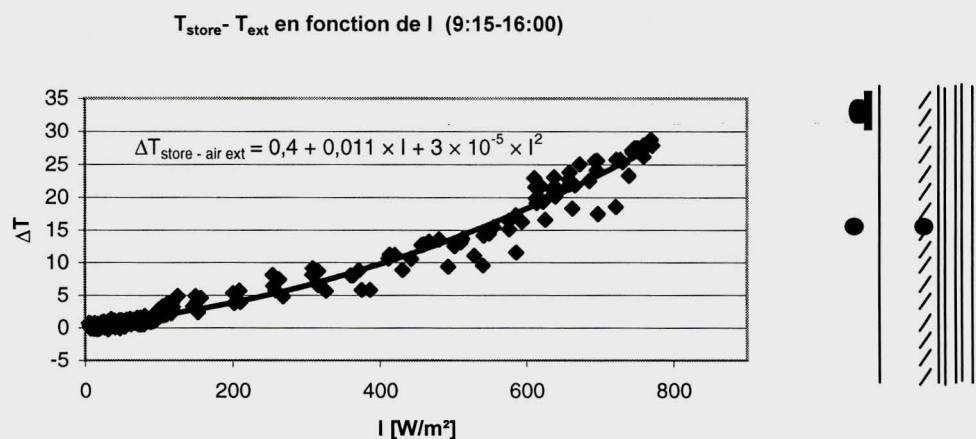
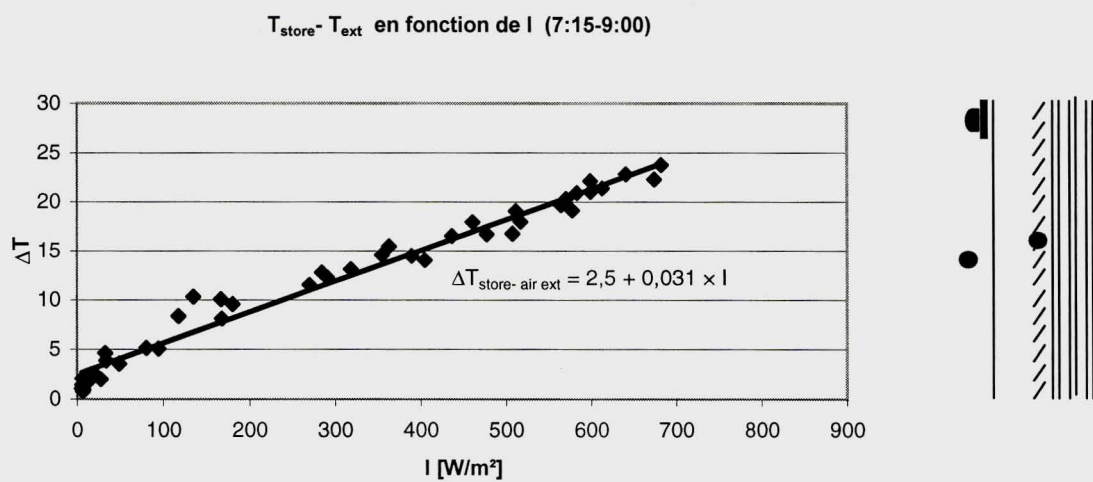
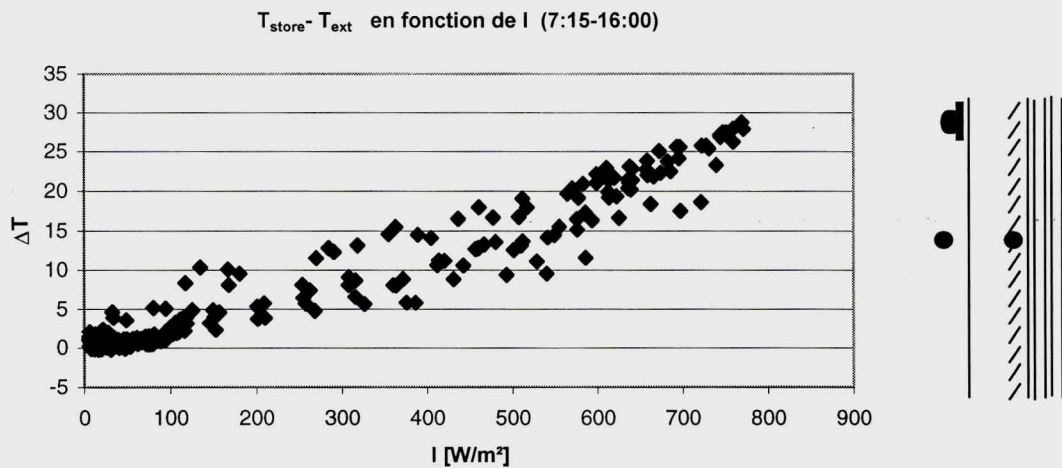


Figure 5.3.1-12 : Bâtiment Telecom-PTT. Echauffement du store.
 En début de matinée (7h15 – 9h00), la différence de température entre le store et l'air extérieur augmente linéairement de 3 K par 100 W/m². Plus tard, la loi cesse d'être linéaire. La différence de température est nulle pour de faibles valeurs du rayonnement (fin d'après-midi).
 Mesures du 7 au 12 septembre 1996.

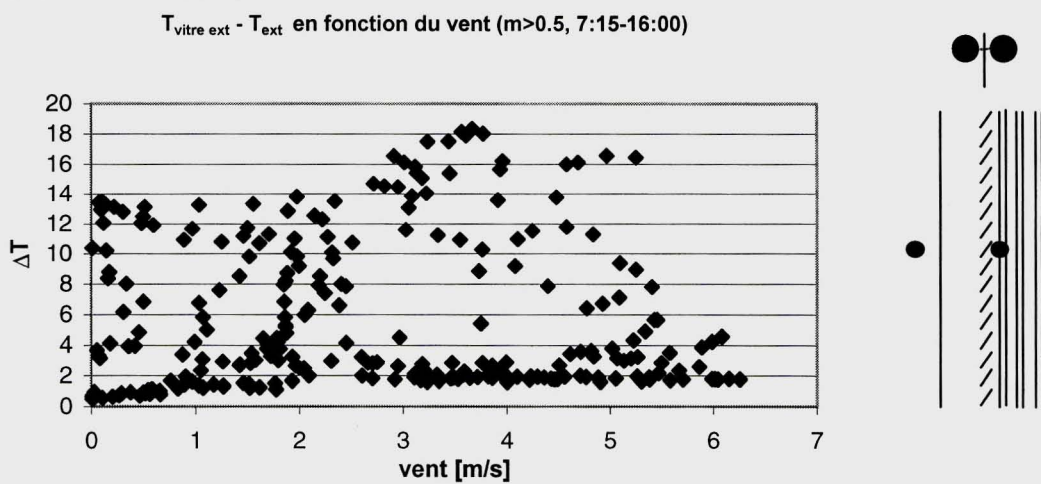


Figure 5.3.1-13 : Bâtiment Telecom-PTT. Effet du vent.
 En présence de rayonnement ($m > 0$) aucune corrélation n'est décelable
 entre $\Delta T = T_{\text{vitrage ext}} - T_{\text{ext}}$ et la vitesse du vent.
 Mesures du 7 au 12 septembre 1996.

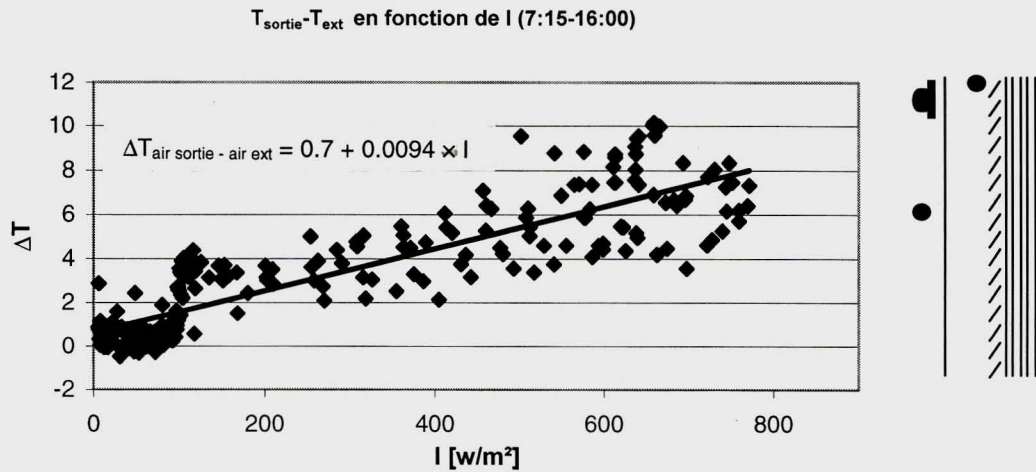


Figure 5.3.1-14 : Bâtiment Telecom-PTT. Echauffement de l'air dans le canal.
 L'échauffement de l'air dans le canal de la double-peau est une fonction linéaire de l'intensité du rayonnement. Il augmente de 0,94 K par 100 W/m^2 (pour une hauteur totale du canal de 10,6 m). En dessous de 100 W/m^2 , il n'y a pas d'échauffement significatif de l'air. La différence de température à l'origine (0,7 K) provient des pertes thermiques de la façade ($T_{\text{int}} > T_{\text{ext}}$). Mesures du 7 au 12 septembre 1996.

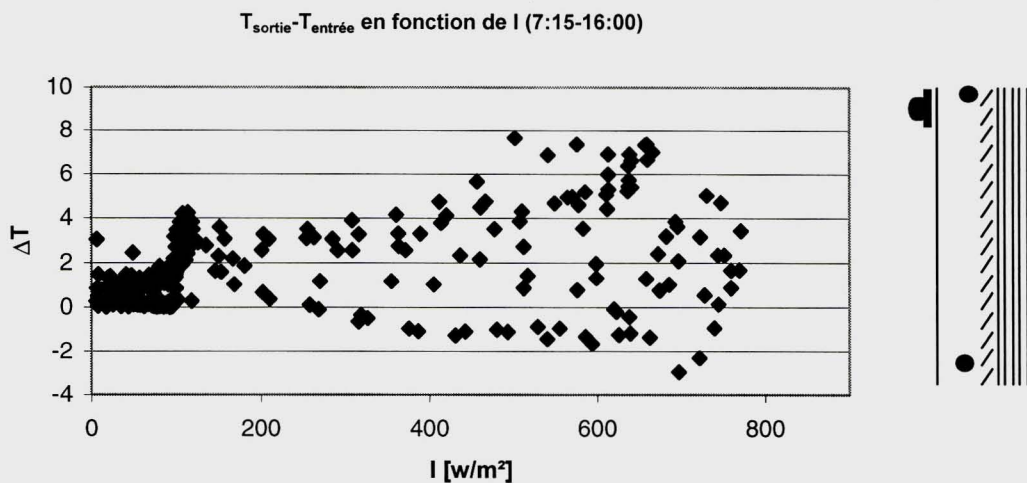


Figure 5.3.1-15 : Bâtiment Telecom-PTT. Echauffement de l'air dans le canal.
 Aucune conclusion ne peut être tirée de la comparaison des températures de l'air à l'entrée et à la sortie du canal de la double-peau. Mesures du 7 au 12 septembre 1996.

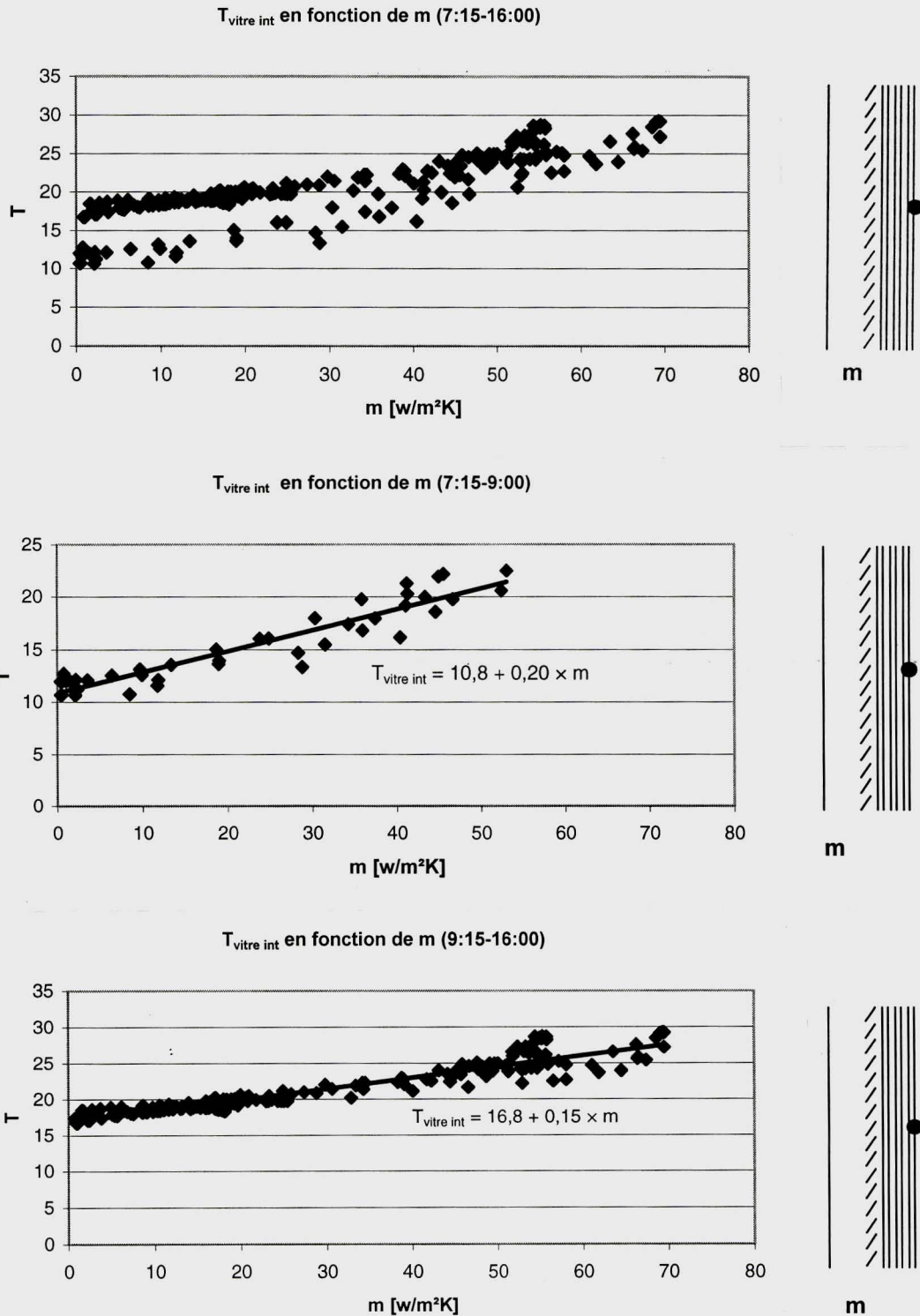


Figure 5.3.1-16 : Bâtiment Telecom-PTT. Echauffement du vitrage intérieur.
 Température du vitrage intérieur en fonction de la variable météorologique $m = I / (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})$. En séparant les mesures en deux périodes horaires, on obtient un excellent calage selon des lois linéaires.
 Mesures du 7 au 12 septembre 1996 ($m > 0,4$).

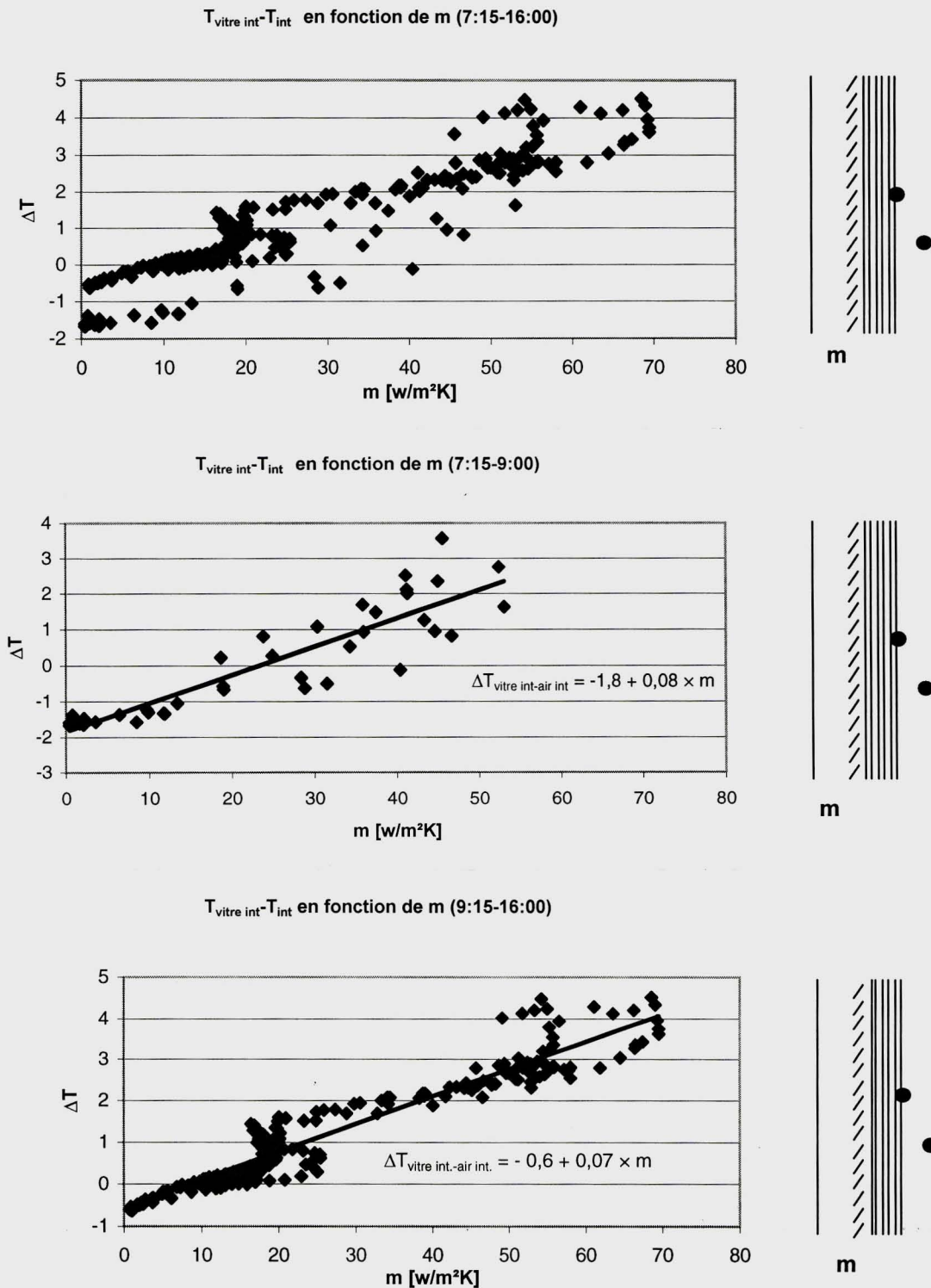


Figure 5.3.1-17 : Bâtiment Telecom-PTT. Echauffement de la vitre intérieure.
 Différence de température entre la vitre intérieure et l'air intérieur en fonction de la variable météorologique $m = I / (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})$. On observe une assez grande dispersion des points au-dessus de $m = 20 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Cette dispersion est atténuée par la séparation des mesures en deux classes. Mesures du 7 au 12 septembre 1996 ($m > 0,4$).

5.3.2 Bâtiment FELIMOB

Description

Le bâtiment FELIMOB est situé en bordure de la route de Renens sur un site dégagé. Très simple de forme, il se présente comme un prisme de section carrée dont les angles sont abattus. L'entrée du bâtiment est marquée par une découpe pratiquée dans l'angle inférieur droit (Fig. 5.3.2-1).

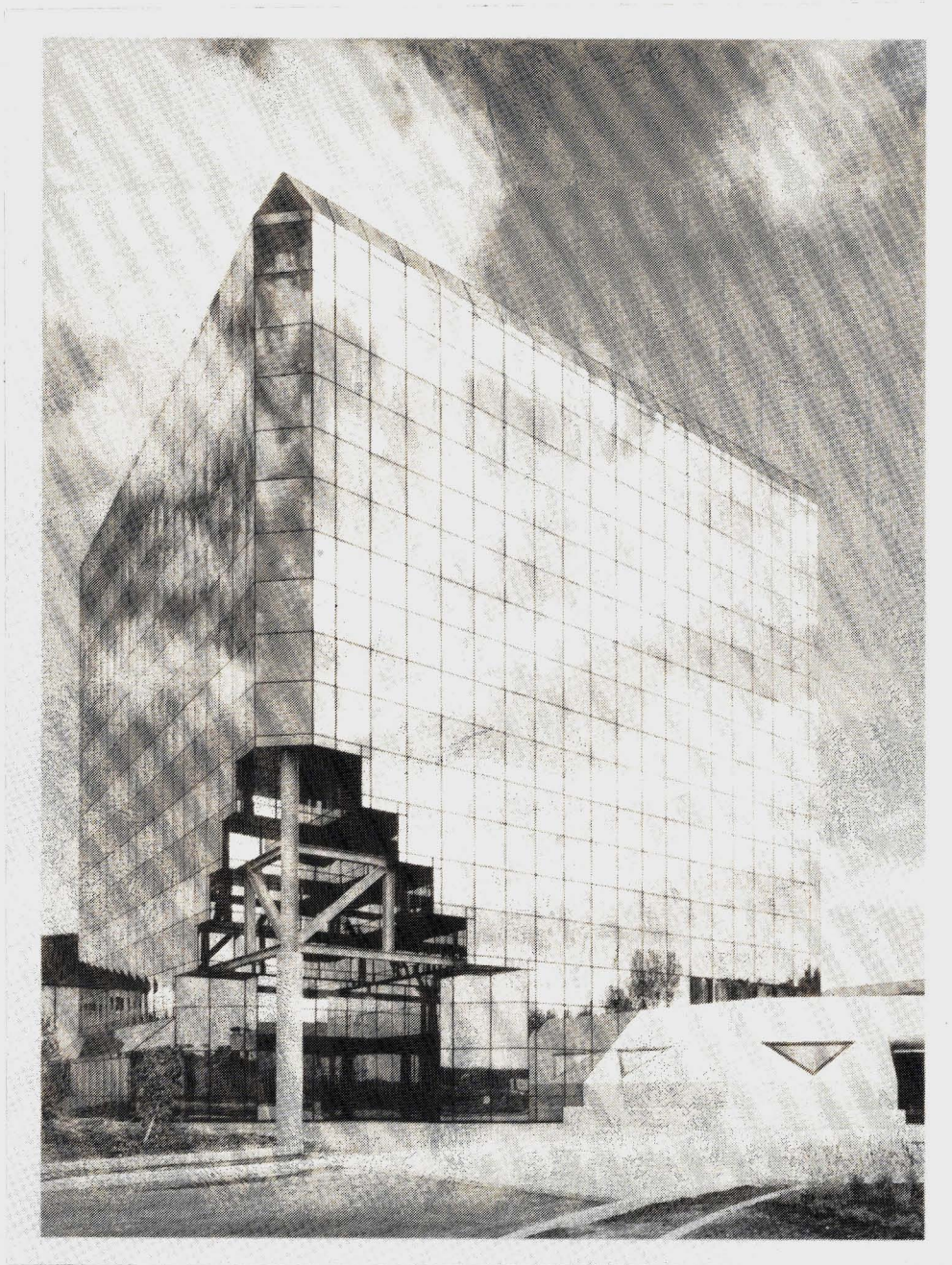


Figure 5.3.2-1 : Bâtiment FELIMOB – Bussigny-près-Lausanne.

La façade intérieure comporte des vitrages ouvrants de haute qualité qui occupent (avec leur cadre) 50% de la surface. Le contre-cœur isolé (qui occupe la surface restante) comporte un muret de béton. L'écran placé à 60 mm de la façade intérieure est constitué de panneaux de verre simple clair trempé. Toutes les façades sont de construction identique. Devant le contre-cœur, une peinture foncée, appliquée sur la face arrière de l'écran, permet de donner (de jour) un aspect uniforme à la façade. Aucune protection solaire mobile n'est prévue dans le canal de la double-peau. Le bâtiment est climatisé. Le tableau 5.3.2-2 récapitule les principales caractéristiques des vitrages. Les données physiques sont l'objet de l'Annexe 5.4.4.

		Ecran	Ecran en allège	Vitrage
Transmission Lumineuse (TL)	%	63	0	77
Réflexion Lumineuse (RL)	%	33	16	13
Transmission Énergétique (TE)	%	62	0	52
Réflexion Énergétique	%	25	~25	19
Absorption Énergétique (AE)	%	13	~75	29
Facteur Solaire (FS)	%	65	0	65
Transmission Ultraviolet (UV)	%	36	-	18
Coefficient k	[W/m ² · K]	5,8	5,8	1,5
Shading Coefficient	%		100	75
Indice de couleur RD 66			-	97

Tableau 5.3.2-2 : Caractéristiques principales des vitrages.

L'écran est constitué d'un verre simple alors que le vitrage (intérieur) est double.

Mesures

Plusieurs campagnes de mesures ont été menées à l'aide d'un dispositif instrumental installé en façade Sud-Ouest (220°). La figure 5.3.2-3 inventorie la position et la nature des sondes. Les mesures de climat extérieur ont été complétées par celles relevées au LESO sur le site de l'EPFL. Le rapport détaillé des mesures fait l'objet du Dossier FELIMOB.

Les mesures physiques ont été complétées par une analyse qualitative de l'écoulement de l'air dans la façade double-peau réalisée à l'aide d'un dispositif fumigène.

Résultats

La figure 5.3.2-4 montre la manière d'introduire la fumée à la base de la double-peau ainsi qu'une vue de la façade durant l'expérience. On note immédiatement que de la fumée sort uniquement par la fente du joint situé au niveau supérieur de l'étage : le canal est à cette hauteur en légère surpression alors qu'il est en légère dépression au niveau des fentes qui font face au bord inférieur des fenêtres. On notera également qu'une fraction importante de la fumée monte jusqu'au haut du canal en longeant la façade intérieure.

Mesures sur la façade
FELIMOB

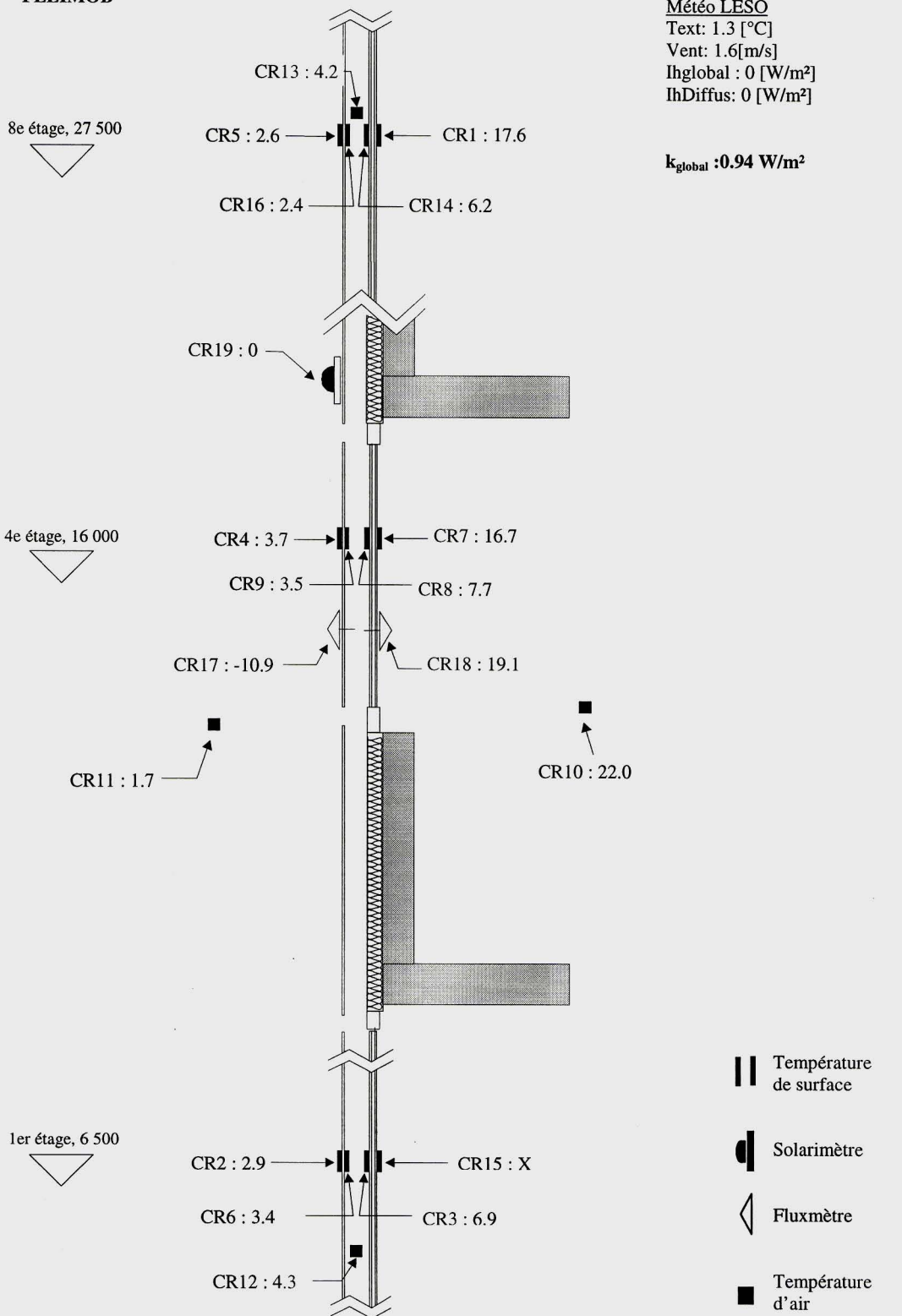


Figure 5.3.2-3 : Bâtiment FELIMOB – Bussigny-près-Renens
Position et nature des sondes de mesure. Les résultats se réfèrent à la moyenne des mesures nocturnes (21h00 – 06h00) du 23 déc. 96 au 28 févr. 97.

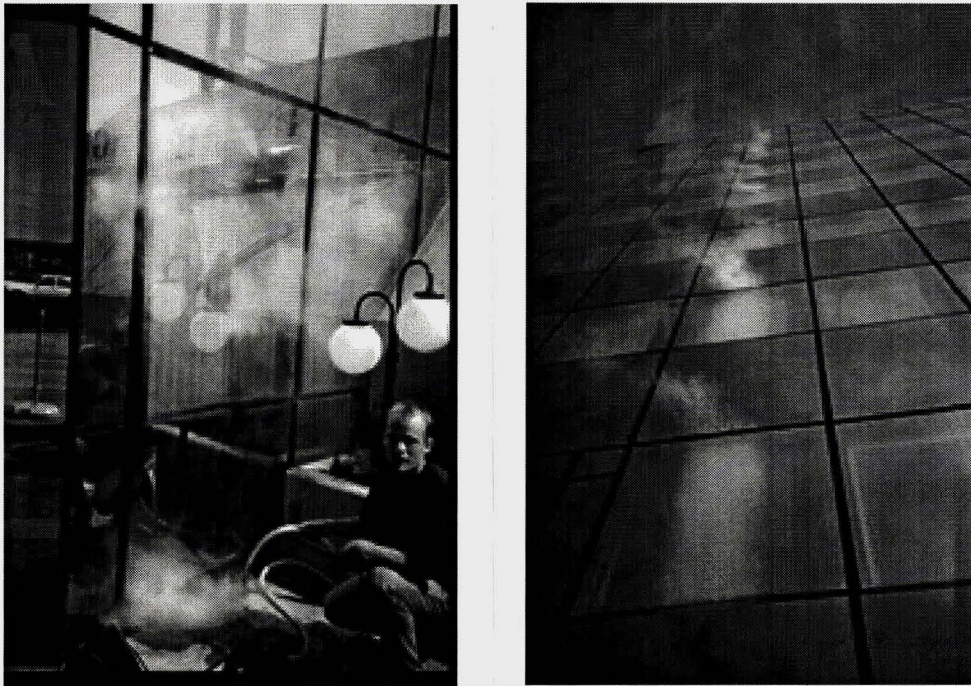


Figure 5.3.2-4 : Analyse de l'écoulement de l'air dans le canal de la double-peau.
De la fumée est introduite à la base du canal de la double-peau (photo de gauche). On observe une émission de fumée par le joint ouvert situé au niveau supérieur des étages (photo de droite). La fumée se propage jusqu'au dernier étage.

L'explication en est la suivante : la forte absorption du rayonnement solaire par le contre-cœur chauffe l'air qui se déplace à grande vitesse devant le joint situé à la base de la fenêtre. La dépression ainsi créée aspire de l'air frais extérieur. La chaleur transmise à l'air étant plus faible au niveau de la fenêtre, il se crée une surpression à la hauteur du joint supérieur par lequel l'air sort. De nuit, on peut supposer que cette situation s'inverse (Fig. 5.3.2-5). La face extérieure de l'écran est par conséquent en contact avec de l'air dont la température est supérieure (par vent nul ou faible) à celle de l'air extérieur.

Mesures de nuit

En faisant la moyenne des mesures prises de nuit (entre 21h00 et 06h00) entre le 23 déc. 96 et le 28 févr. 97 (fig. 5.3.2-3), on obtient le tableau 5.3.2-6 qui appelle les commentaires suivants :

- la conductance du vitrage $\Delta = 2,12 + 5\%, -10\% \text{ W/m}^2 \text{ K}$ correspond à celle que l'on peut déduire de la valeur fournie par le constructeur ($K = 1,5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$)
Ceci permet de valider les mesures fournies par le fluxmètre et les sondes de température.

- la valeur du coefficient de transfert $\alpha_{int} = 3,6 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ est très basse : elle correspond au terme de rayonnement et doit être imputable aux conditions locales (géométrie, mode de chauffage).
-
- la valeur trouvée pour $\alpha_{ext} = 5,45 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ est anormalement basse. Nous l'attribuons au fait que l'écran est enveloppé par de l'air dont la température est supérieure à celle de l'air extérieur.
- sur la période observée, 47% de la chaleur cédée par les vitres est transmise à l'air.

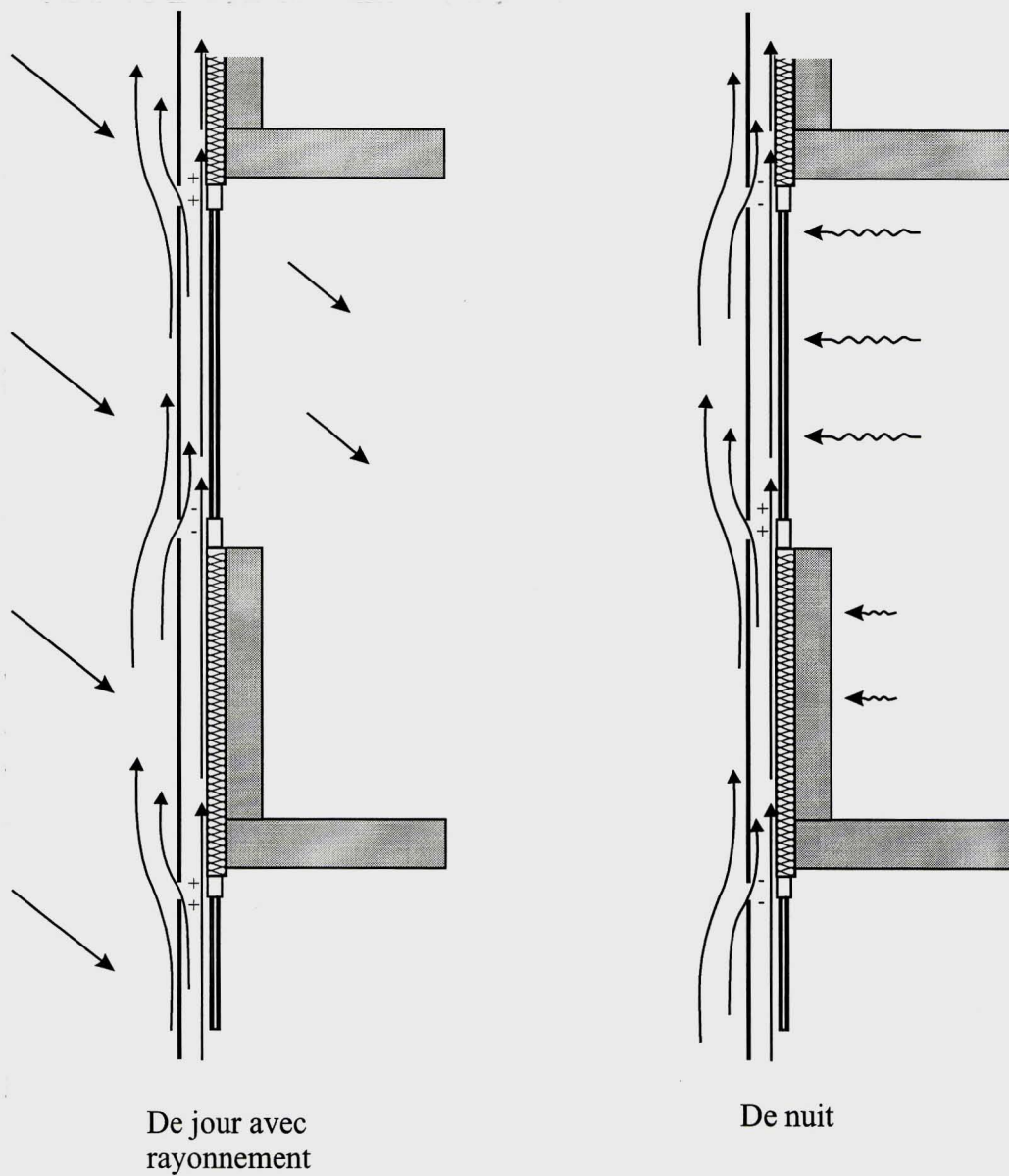


Figure 5.3.2-5 : Circulation verticale de l'air le long de la façade. Entre le jour (avec rayonnement solaire) et la nuit, la répartition des surpressions et dépressions s'inverse au niveau des fentes qui séparent les pans de verre de l'écran.

	Extérieur	Ecran	Canal	Vitrage	Intérieur	Unités
Flux de chaleur	10,9 (57%) ←	10,9	↑ 8,2 (43%)	19,1 ←	19,1 (100%)	W/m ²
Température	1,7	3,7	-	7,7 16,7	22,0	°C
Coefficient de transfert	5,45	-	7,54	2,12 + 5%; -10%	3,6	W/m ² K

Tableau 5.3.2-6 : Bâtiment FELIMOB – Bussigny-près-Renens

Caractéristiques thermiques : moyenne du 23 déc. 1996 au 28 févr. 1997 entre 21h00 et 06h00. Sur la période observée, 43% de la chaleur est transmise à l'air qui circule dans la double-peau.

La valeur k que l'on peut déduire du Tableau 5.3.2-6 est plus basse que celle que l'on calculerait selon la méthode usuelle (SIA). Elle est de 31% plus basse que celle de la même façade sans la double-peau (partie vitrée uniquement) :

Valeur k selon Tab. 5.3.2-6 :	0,95 ± 3%	W/m ² K
Valeur k selon SIA ($\alpha_{\text{ext}} = 23$; $\alpha_{\text{int}} = 8$ W/m ² K)	1,22	W/m ² K
Même façade sans écran ($\alpha_{\text{ext}} = 23$; $\alpha_{\text{int}} = 3,6$ W/m ² K)	1,26	W/m ² K

Le Tableau 5.3.2-7 détaille le résultat des mesures relatives à trois situations relevées au cours de la même période.

Date		Extérieur	Ecran	Canal	Vitrage	Intérieur	Unités
26.01.97 02h30	Flux de chaleur	9,9 63%	9,9	5,7 37%	15,6	15,6 100%	W/m ²
	Température	2,8	6,3	-	9,7 16,8	21,1	°C
	Coefficient de transfert	2,8	-	11,3	2,20	3,6	W/m ² K
10.01.97 02h00	Flux de chaleur	9,8 56%	9,8	7,6 44%	17,4	17,4 100%	W/m ²
	Température	2,4	5,2	-	9,1 17,3	22,4	°C
	Coefficient de transfert	3,5	-	10,1	2,12	2,4	W/m ² K
22.02.97 23h00	Flux de chaleur	9,6 61%	9,6	6,1 39%	15,7	15,7 100%	W/m ²
	Température	2,9	4	-	8,6 16,7	21,7	°C
	Coefficient de transfert	8,7	-	4,0	1,94	3,1	W/m ² K

Tableau 5.3.2-7 : Bâtiment FELIMOB – Bussigny-près-Renens

Caractéristiques thermiques de nuit. Saison froide.

Vitesse du vent < 0,4 m/s. On observe qu'en moyenne sur ces trois cas, 40% de la chaleur est transmise à l'air qui circule dans le canal de la double-peau.

Mesures de jour

Les mesures faites de jour en présence de rayonnement solaire montrent que le vent joue un rôle important par sa force, mais également par sa direction par rapport à la façade.

En séparant les mesures en trois classes (vent < 0,1 m/s; 0,1 < vent < 1 m/s; 1 < vent < 3 m/s), on obtient les graphiques reportés sur les figures 5.3.2-8 à 5.3.2-11. (Les mesures prises au-delà de 16h00 ont été écartées en raison de l'effet parasite du rayonnement sur les sondes de mesures des températures).

- La température de la vitre intérieure augmente linéairement d'environ 2°C par 100 W/m² de rayonnement solaire et ceci pour toutes les classes de vent (Fig. 5.3.2-8). Cette augmentation de température est favorable en hiver jusqu'à un rayonnement d'environ 400W/m², mais peut devenir source d'inconfort au-delà. En été et sans protection solaire, cet échauffement devient rapidement source d'inconfort (d'où la nécessité de climatiser l'immeuble).
- En reportant la différence de température $T_{\text{vitre}} - T_{\text{int}}$ en fonction de la variable météorologique $m = I / (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})$, on s'affranchit des valeurs particulières de T_{int} et T_{ext} (Fig. 5.3.2-9). La vitre intérieure atteint puis dépasse la température de l'air intérieur dès $m = 17 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (par exemple $I = 340 \text{ W/m}^2$ et $\Delta T = 20 \text{ K}$).
- Les joints ouverts horizontaux de l'écran ont pour effet de limiter l'échauffement de l'air dans le canal de la façade double-peau. De plus, cet échauffement ne suit pas une loi en I puissance 2/3, mais est plutôt proportionnel au rayonnement incident et ceci pour toutes les classes de vent (Fig. 5.3.2-10). Le vent (qui souffle en moyenne plus le jour que la nuit) a pour effet de diminuer l'échauffement de l'air en raison principalement de la présence des joints ouverts :

$v < 0,1 \text{ m/s}$	$\Delta T = 0,048 * I$	(4,8°C pour 100 W/m ²)
$0,1 < v < 1$	$\Delta T = 0,040 * I$	(4°C pour 100 W/m ²)
$1,0 < v < 3$	$\Delta T = 0,034 * I$	(3,4°C pour 100 W/m ²)

La grande dispersion des points peut être attribuée à l'effet de la direction du vent par rapport à la façade.

- La comparaison des températures de l'air au 1^{er} et au 8^{ème} étage (Fig. 5.3.2-11) montre qu'en fonction des conditions météorologiques on peut observer une stratification nulle, voire inversée des températures. Par vent faible ($v < 1 \text{ m/s}$), on observe ce phénomène pour un rayonnement inférieur à 400 W/m² alors que par vent plus fort, on peut observer une stratification faible à nulle même pour des valeurs élevées du rayonnement :

$I \leq 400 \text{ W/m}^2$	- 5	$< \Delta T < 10 \text{ K}$
$I > 400 \text{ W/m}^2$	0	$< \Delta T < 15 \text{ K}$

La grande dispersion des mesures (en partie imputable à la direction du vent) ne permet pas de tirer des conclusions plus précises.

Discussion

L'analyse de la façade de l'immeuble FELIMOB a permis de tirer les conclusions suivantes :

- l'isolation thermique de la façade ($k = 0,94 \text{ W/m}^2 \text{ K}$) est supérieure à celle qui découle du calcul fait selon les règles usuelles (selon calcul SIA : $k = 1,22 \text{ W/m}^2 \text{ K}$). Par rapport à la même façade sans double-peau, l'amélioration est de 31% (partie vitrée uniquement).
- la présence de joints ouverts horizontaux dans l'écran (tous les 1,45 m environ) modifie totalement l'écoulement de l'air dans le canal de la double-peau ainsi qu'à la surface extérieure de l'écran dont la température se trouve de ce fait augmentée.
- en situation hivernale, la température de la vitre intérieure devient égale à celle de l'air intérieur pour une valeur de la variable météorologique $m = 17 \text{ W/m}^2$ (c-à-d par exemple $I = 170 \text{ W/m}^2$ et $T_{\text{int}} - T_{\text{ext}} = 10 \text{ K}$). Au-delà le bilan s'inverse : la vitre chauffe le local. A cet apport de chaleur s'ajoute la part de rayonnement qui pénètre directement à travers le vitrage (41% du rayonnement incident).
- l'échauffement de l'air dans le canal de la double-peau est limité par l'effet des fentes horizontales de l'écran. Il dépend faiblement de la vitesse du vent et vaut environ 4°C pour $I = 100 \text{ W/m}^2$. Sa dépendance en fonction du rayonnement est linéaire.
- la stratification de la température de l'air dans le canal de la double-peau (et par conséquent la stratification de la température dans le bâtiment) est atténuée par l'effet des fentes de l'écran. Elle peut s'annuler, voire même s'inverser sous l'effet du vent et ceci même pour des valeurs élevées du rayonnement incident.
- en situation estivale, l'absence de protection solaire (autre que celle offerte par le verre de l'écran) conduit rapidement à une situation de surchauffe nuisible au confort intérieur (besoin de climatisation).

Les propriétés très particulières de cette façade ne permettent pas de la décrire à l'aide du modèle mathématique TQV.

Son originalité et ses propriétés intéressantes mériteraient une étude plus approfondie qui permettrait de l'optimiser, spécialement vis-à-vis du confort estival.

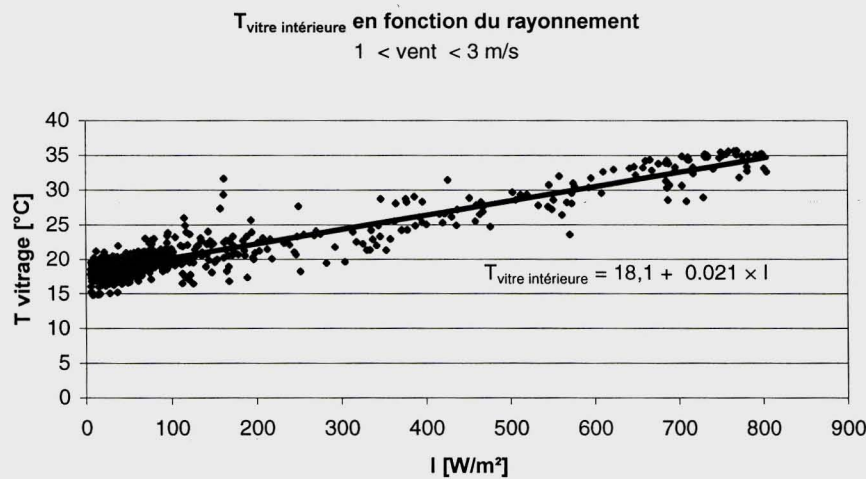
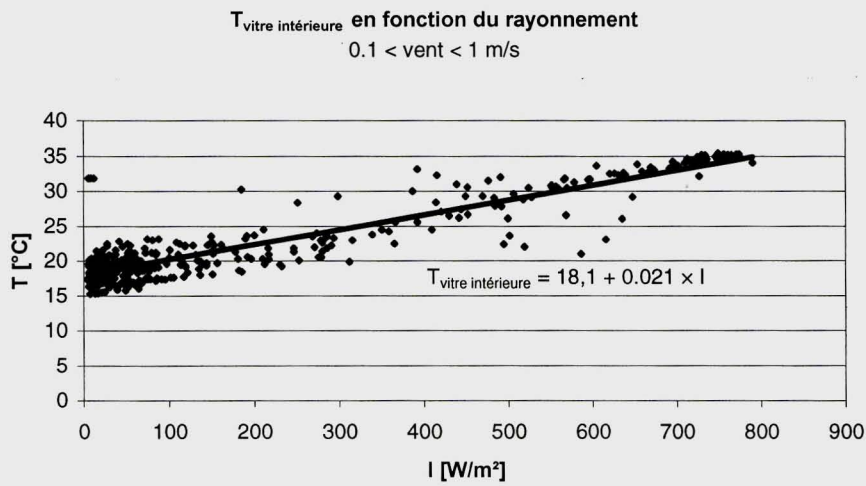
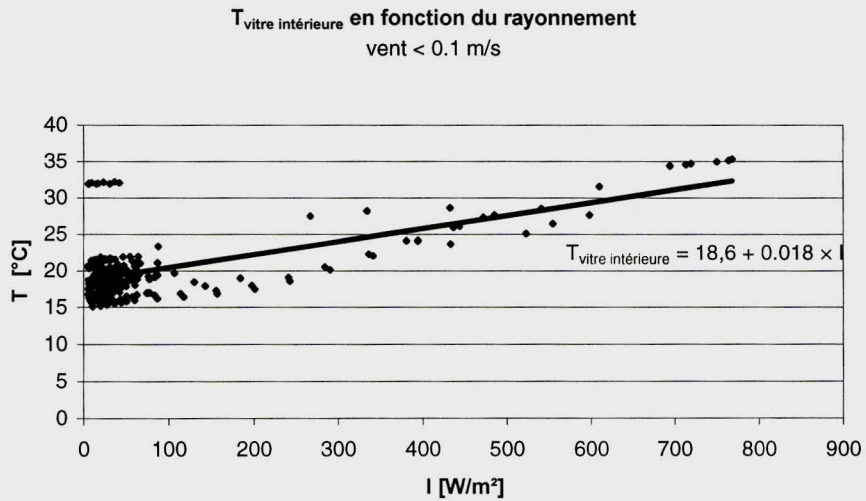


Figure 5.3.2-8 : Bâtiment FELIMOB – Bussigny-près-Renens
Température de la vitre intérieure en fonction du rayonnement incident sur le plan de la façade. Les mesures sont classées selon la force du vent. En moyenne, l'augmentation de température est de 2°C par 100 W/m². Mesures de jour du 23 déc. 96 au 28 févr. 97, jusqu'à 16h00.

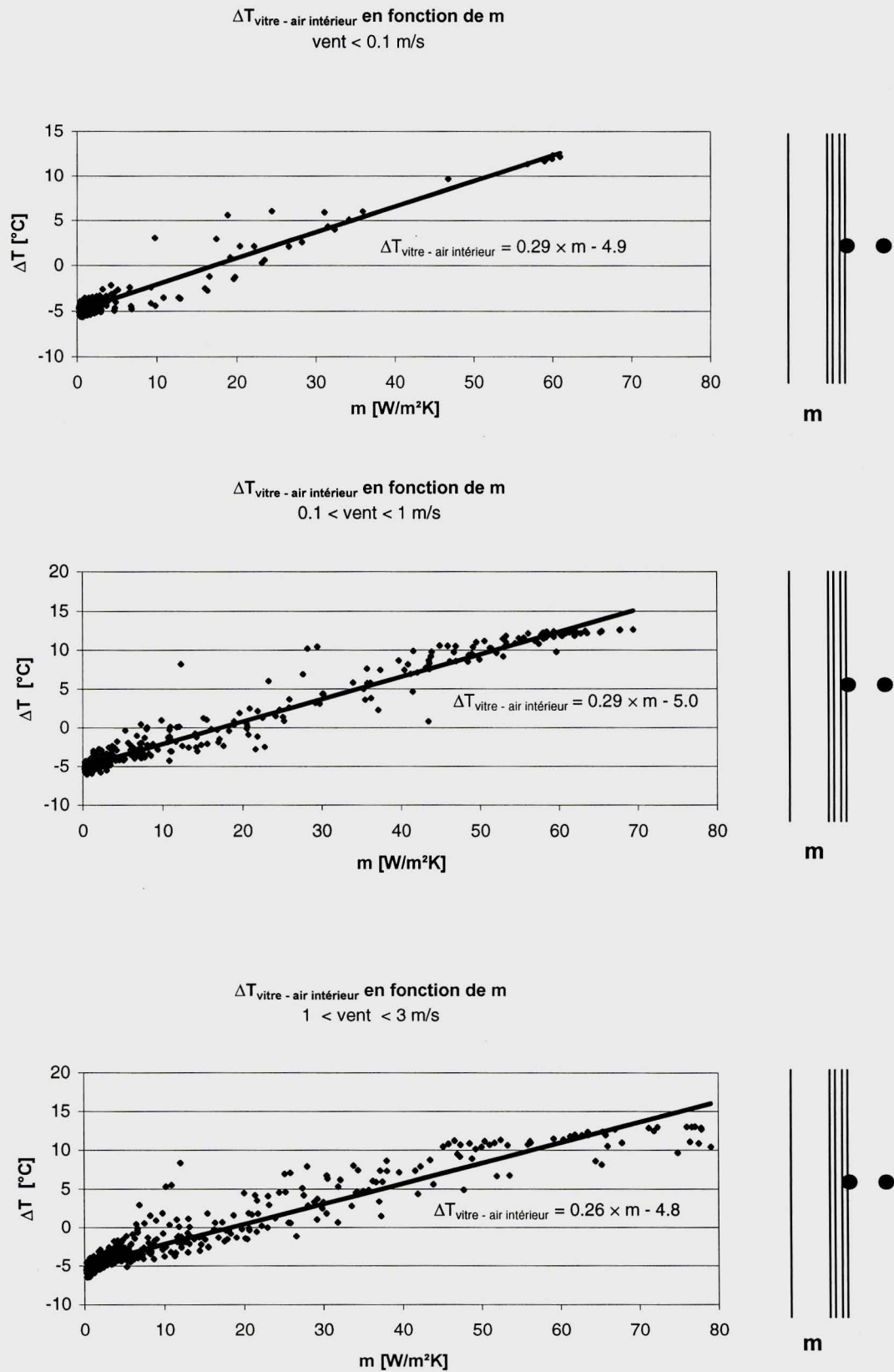


Figure 5.3.2-9 : Bâtiment FELIMOB – Bussigny-près-Renens
 Différence de température entre la vitre (intérieure) et l'air intérieur en fonction de la variable météorologique $m = I / (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})$. Pour des valeurs de m supérieures à $17 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, la température de la vitre est supérieure à celle de l'air intérieur.
 Mesures de jour du 23 déc. 96 au 28 févr. 97, jusqu'à 16h00.

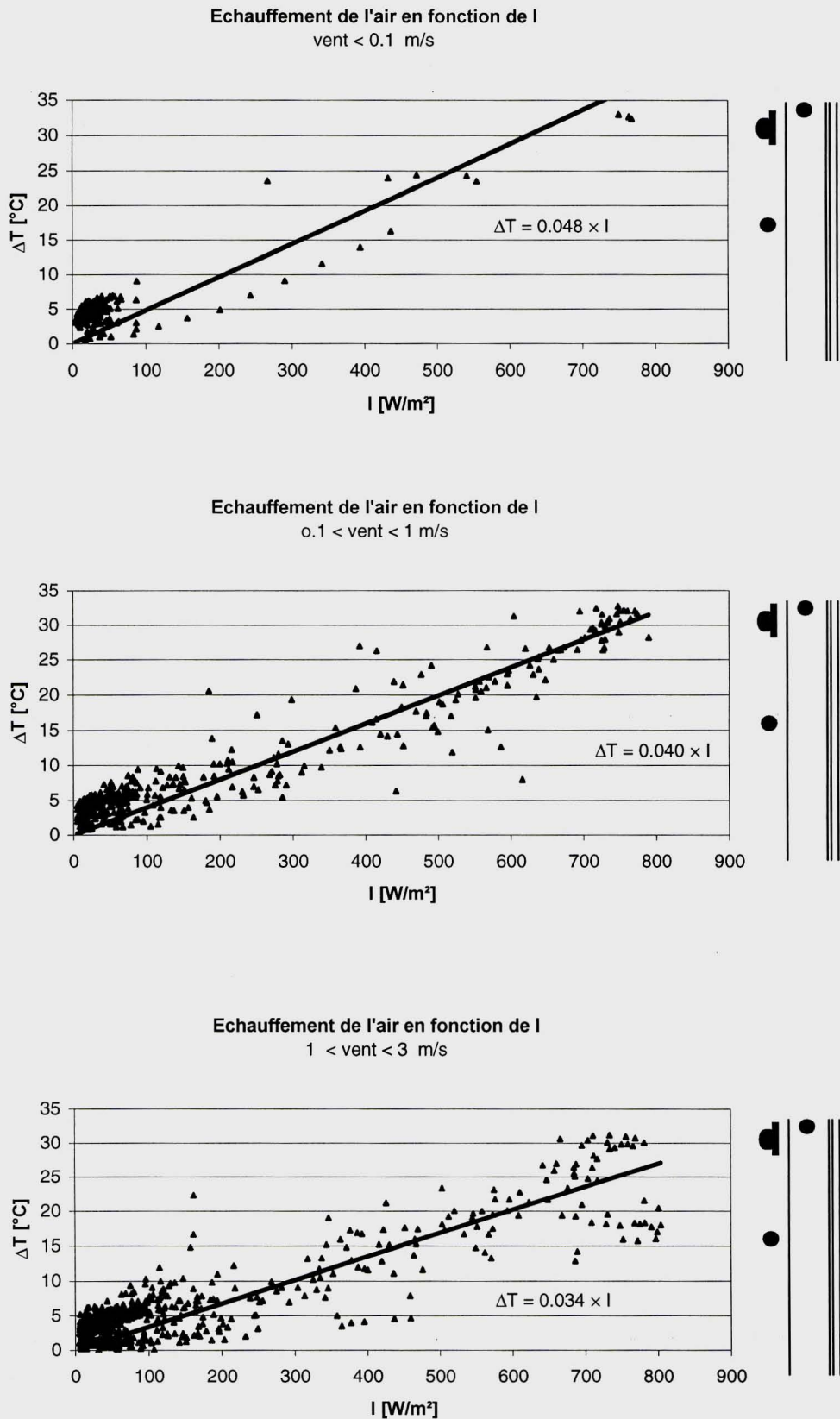


Figure 5.3.2-10 : Bâtiment FELIMOB – Bussigny-près-Renens
 Élévation de la température de l'air du canal de la double-peau. On observe une élévation de la température qui décroît légèrement lorsque la vitesse du vent augmente.
 Mesures de jour du 23 déc. 96 au 28 févr. 97, jusqu'à 16h00.

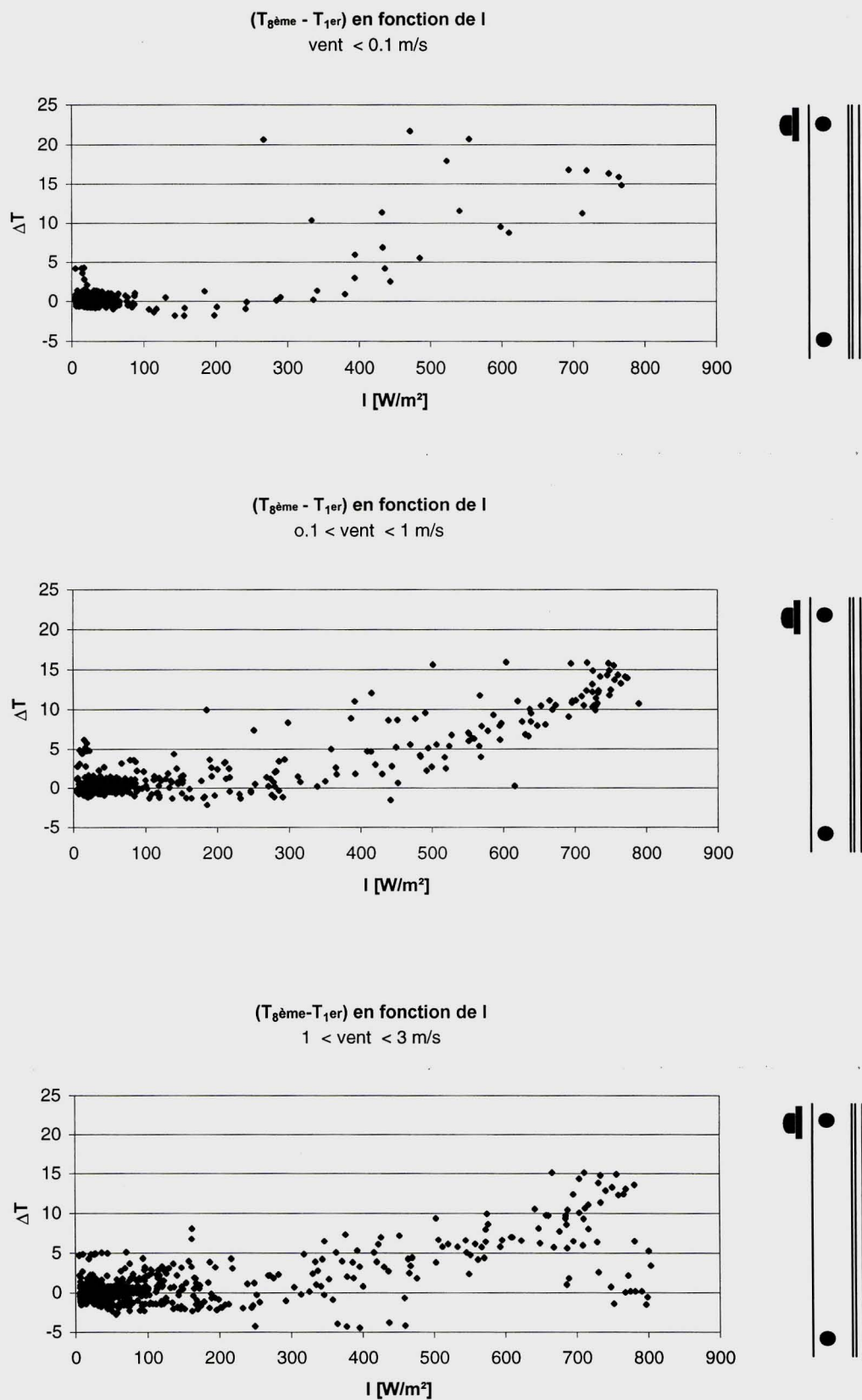


Figure 5.3.2-11 : Bâtiment FELIMOB – Bussigny-près-Renens
Stratification de la température de l'air du canal de la double-peau. On observe une stratification nulle, voire inversée, pour des valeurs élevées du rayonnement incident sur la façade.
Mesures de jour du 23 déc. 96 au 28 févr. 97, jusqu'à 16h00.

5.4 Annexes

5.4.1 Centre industriel et artisanal Marcinhès, Meyrin (GE)

Données techniques de la double-peau type "normal"

■ Peau extérieure

Vitrage extérieur double $k = 2,99 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ($\alpha_{\text{ext}} = 25$, $\alpha_{\text{int}} = 8$)
 $r = 0,15$ $a = 0,14$ $g = 0,71$ $\varepsilon = 0,89$

Vitrage simple équivalent $\alpha_{\text{ext}} = 4,55 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ($\alpha_{\text{int}} = 8$)
 $r = 0,15$ $a = 0,14$ $g = 0,71$ $\varepsilon = 0,89$

■ Peau intérieure

Vitrage côté canal $r = 0,07$ $a = 0,11$ $g = 0,82$ $\varepsilon = 0,89$

Lame d'air $d = 0,012 \text{ m}$

Vitrage côté intérieur $r = 0,07$ $a = 0,11$ $g = 0,82$ $\varepsilon = 0,89$

Contre-cœur $r = 0,3$ $a = 0,7$ $k = 3,2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

Idem après calage $r = 0,4$ $a = 0,6$ $k = 4,42 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ($\alpha_e = 25$, $\alpha_i = 8$)

Hauteur du contre-cœur 1,5 m sur une hauteur total de 4,1 m (37%).

■ Canal

Hauteur 13,0 m

Profondeur moyenne 0,25 m

Ouverture inférieure $0,25 \text{ m}^2/\text{m}_{\text{lin}}$

Ouverture supérieure $0,25 \text{ m}^2/\text{m}_{\text{lin}}$

■ Climat

Température extérieure $18,6^\circ\text{C}$

Température intérieure $24,7^\circ\text{C}$

5.4.2 Modèle de laboratoire

Modèle double-peau de laboratoire formé de 6 modules empilables

Données techniques

■ Mode de chauffage (simulation du rayonnement solaire)

Panneaux électriques modulaires	0,64 x 1,23	[m ²]
Puissance maximale	400 W (506 W/m ²)	

■ Peau extérieure

Vitrage verre acrylique	ε	=	valeur ajustée par simulation
	d	=	0,008 [m]
	λ	=	0,20 [W/m ² K]

■ Peau intérieure

Côté canal : panneaux électriques modulaires

$$\varepsilon = 0,9$$

Lame d'air d = valeur ajustée par simulation

Vitrage verre acrylique	ε	=	0,9
	d	=	0,008 [m]
	λ	=	0,20 [W/m ² K]

■ Canal

Hauteur totale	3,84 m					
Largeur intérieure	1,24 m					
Profondeur	0,60	0,60	0,60	0,15	0,15	[m]
Ouverture supérieure	0,60	0,25	0,25	0,15	0,075	[m]
Ouverture inférieure	0,60	0,25	0,125	0,14	0,075	[m]

5.4.3 Bâtiment des Telecom PTT, Lausanne – Ecublens

Double-peau en façade Est

■ Peau extérieure

Panneaux de verre simple suspendus	d = 8 mm		
Conductance du verre	$\Lambda = 0,81 / 0,008 = 101$ [W/m ² K]		
	k \cong 5,8 [W/m ² K]		
Float trempé	r = 0,08	a = 0,11	g = 0,81
Ouvrants mobiles	d = 15 mm		
	r = 0,08	a = 0,20	g = 0,72
Protection phonique	R _w ~ 33 dB		

■ Peau intérieure

Triple vitrage avec 2 couches K ($\epsilon = 0,16$) et remplissage d'Argon

	d = 4 K + 12 + 4 K + 12 + 4 = 36 mm		
Conductance du vitrage	$\Lambda = 1,27 \pm 0,13$ [W/m ² K]		
	(k \cong 1,05 \pm 0,09 [W/m ² K])		
Triplet	r = 0,14	a = 0,35	g = 0,51

Pour les besoins de la modélisation, ce triplet est remplacé par un doublet équivalent.

Verre côté canal	r = 0,154	a = 0,286	$\epsilon = 0,02$
Verre côté intérieur	r = 0,08	a = 0,14	$\epsilon = 0,02$
	d = 0,048	[m]	
Protection phonique	R _w ~ 34 dB		

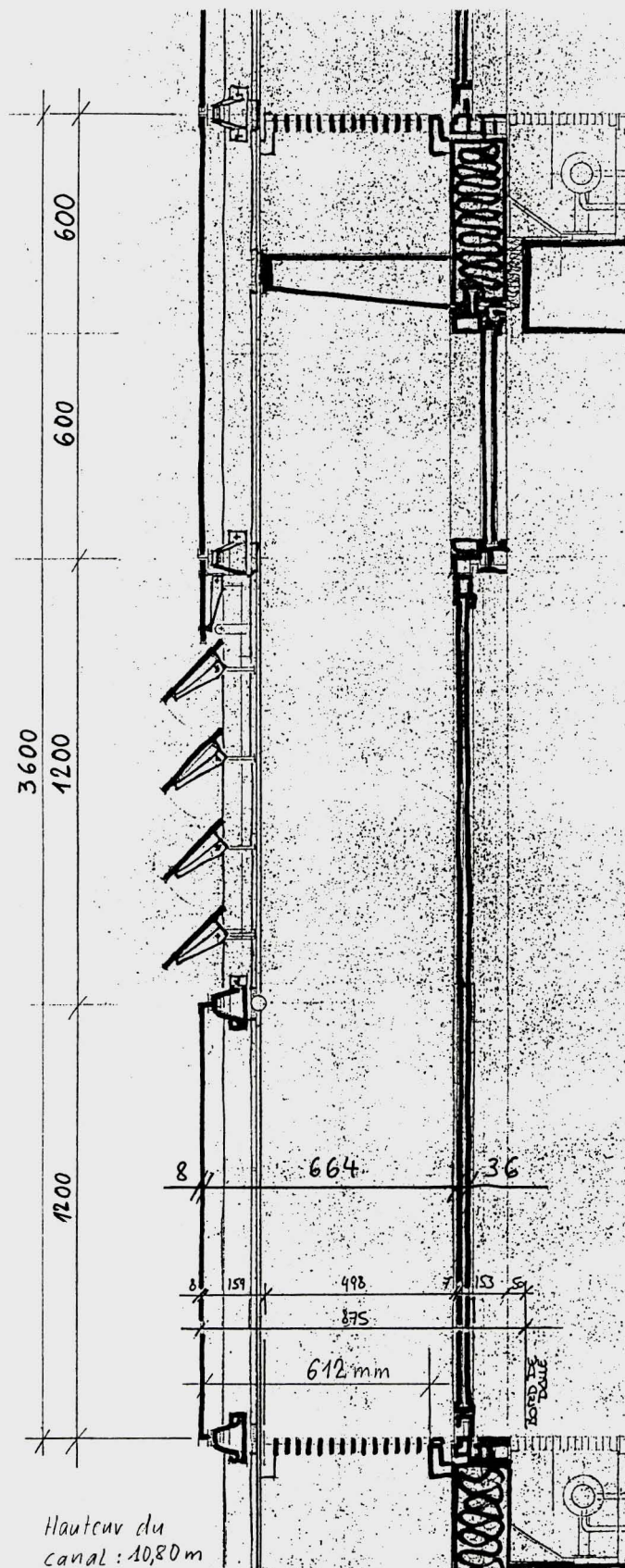
■ Canal

Hauteur	3 x 3,6 = 10,8 [m]		
Profondeur	0,664 [m]		
Ouverture inférieure	0,618 [m]		
Ouverture supérieure	0,618 / 0,120	(ouvert / fermé)	

A chaque étage, le caillebotis et sa fixation provoquent un resserrement de la section. L'absorption du rayonnement solaire par ces mêmes éléments contribue au chauffage de l'air du canal de la double-peau. Il est tenu compte de ce phénomène en augmentant de 0,24 l'absorption de l'écran.

■ Climat

Conditions météorologiques d'Ecublens. Mars – Avril 1996.



Bâtiment des Telecom PTT
 Double-peau en façade Est. Coupe verticale.

5.4.4 Bâtiment FELIMOB, Bussigny-près-Renens

Double-peau sur les quatre faces du bâtiment
Orientation de la façade mesurée : Sud-Ouest (220°)

■ Peau extérieure

Panneaux de verre simple réfléchissant	d = 8 mm
Conductance du verre	$\Lambda = 0,81 / 0,008 = 101$ [W/m ² K]
	k ~ 5,8 [W/m ² K]

Glaverbel Stopsol supersilver clair trempé. Couche Stopsol supersilver en position 1.

devant la fenêtre	r = 0,25	a = 0,13	g = 0,62
en allège	r = ~ 0,25	a = ~ 0,75	g = 0
Facteur solaire	0,65 (en allège ~ 0,15)		

L'écran est fixé sur la fenêtre et s'ouvre avec elle. Il y a possibilité de détacher l'écran de la fenêtre pour le nettoyage.

■ Peau intérieure

Double vitrage isolant	d = 6 K + 12 + 6 = 24 mm
Conductance du vitrage	$\Lambda = 2,10 \pm 0,05$ [W/m ² K]
	(k \cong 1,56 \pm 0,06 [W/m ² K])

Glaverbel Thermoplus Superlite, remplissage Argon

Verre côté canal	r = 0,10	a = 0,21	g = 0,69	$\epsilon = 0,16$
Verre côté intérieur	r = 0,07	a = 0,15	g = 0,78	$\epsilon = 0,89$
Ensemble	r = 0,19	a = 0,29	g = 0,52	
Facteur solaire	0,65			

Contre-cœur en tôle d'aluminium de teinte foncée, isolation 80 mm de laine minérale adossée à un muret de béton ép. 150 mm (k ~ 0,35 W/m² K).

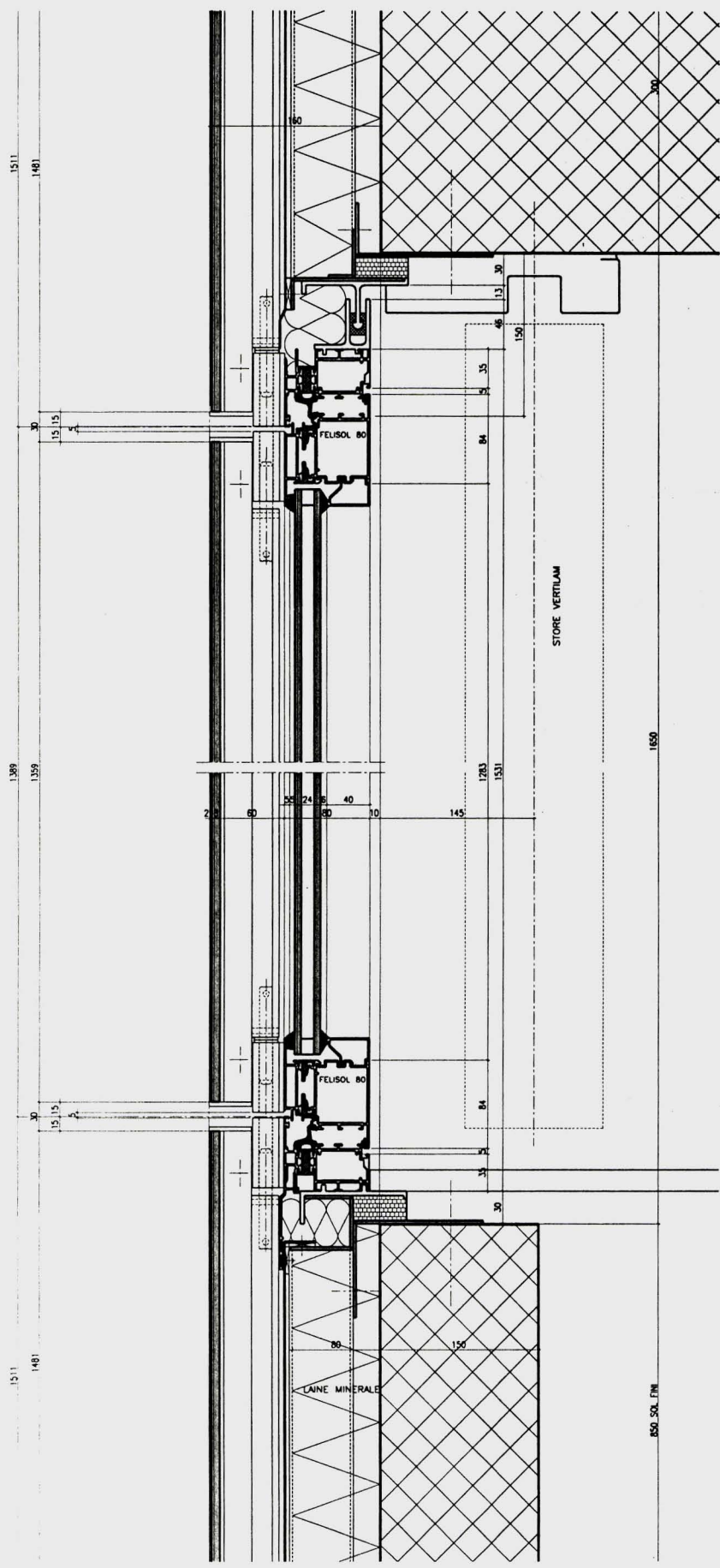
Fraction de contre-cœur	50%
Isolation thermique de l'ensemble écran-façade intérieure	k \cong 0,65 [W/m ² K]
Isolation phonique de l'ensemble	~ 40 dBA

■ Canal

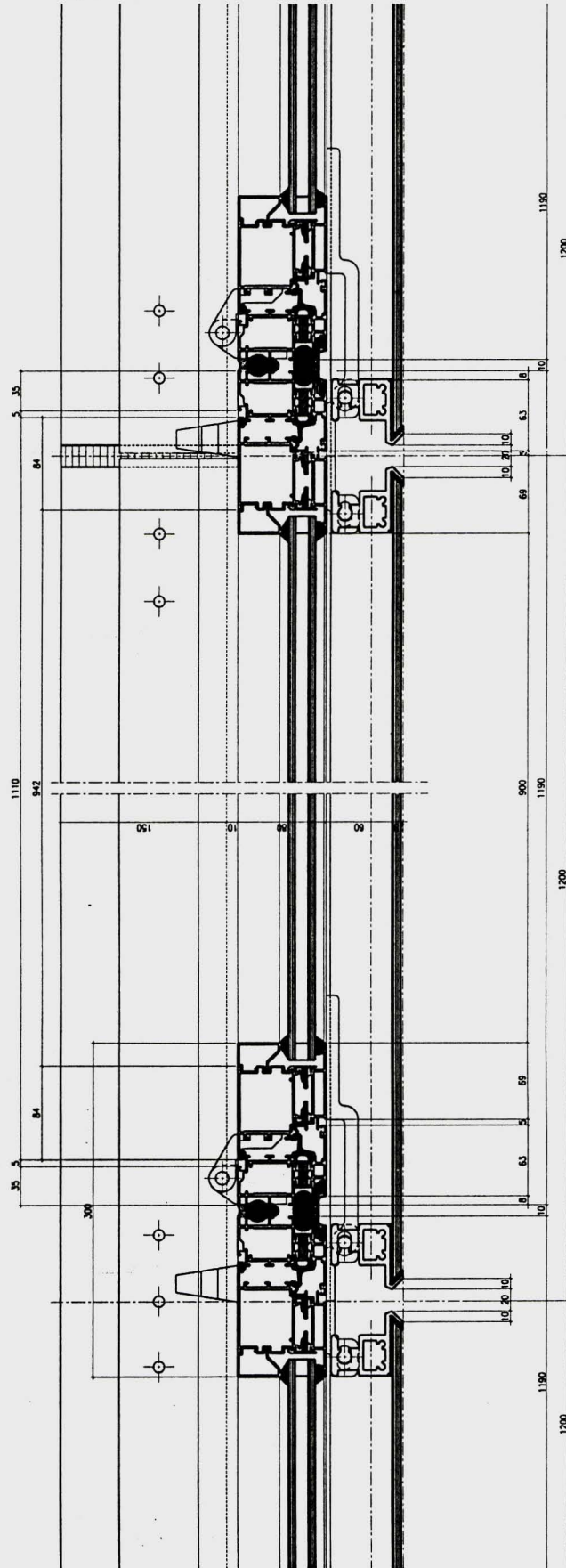
Le canal d'une hauteur totale de 23,2 m est fractionné par des joints ouverts (30 mm en coupe verticale, 20 mm en coupe horizontale) ménagés entre les panneaux de verre (1259 x 1160 mm² et 1481 x 1160 mm²) qui forment l'écran.

Les pièces de fixation verticales réduisent fortement la section de passage de l'air (cf. coupe horizontale) alors que les fentes horizontales laissent passer l'air librement.

La profondeur du canal à la hauteur du vitrage intérieur est de 60 mm.



Bâtiment FELIMOB. Coupe verticale



Bâtiment FELIMOB. Coupe horizontale

Table des matières

Préface

1. Introduction
2. Typologie
 - 2.1 Typologie en coupe
 - 2.2 Typologie en élévation
3. Principe de fonctionnement
 - 3.1 Double-peau
 - 3.2 Ventilation des locaux à travers la double-peau
 - 3.2.1 Double-peau assurant la ventilation des locaux
 - Façade ombragée
 - Façade uniformément ensoleillée
 - 3.2.2 Un modèle thermodynamique de la façade double-peau
 - 3.3 Bilan thermique
 - 3.3.1 De nuit (absence de rayonnement solaire)
 - 3.3.2 De jour
4. Propriétés et considérations pratiques
 - 4.1 Double-peau contre façade étanche
 - 4.2 Recommandations : Double-peau contre façade étanche
 - 4.3 Double-peau assurant la ventilation des locaux
 - 4.4 Recommandations : Double-peau assurant la ventilation des locaux
 - 4.5 Bibliographie
 - 4.5.1 Compte-rendus de conférences
 - 4.5.2 Revues
 - 4.5.3 Etudes et rapports
 - 4.5.4 Livres
5. Mesures in-situ et en laboratoire
 - 5.1 Exploitation de mesures existantes
 - 5.1.1 Calage du modèle TQV sur les mesures
 - 5.2 Mesures en laboratoire
 - 5.2.3 Résultats : profondeur du canal $d = 0,6$ m
 - 5.2.4 Profondeur du canal $d = 0,15$ m
 - 5.3 Mesures in-situ
 - 5.3.3 Bâtiment des Telecom-PTT
 - 5.3.4 Bâtiment Felimob
 - 5.4 Annexes
 - 5.4.1 Centre industriel et artisanal "Marcinhès" Meyrin (GE)
 - 5.4.2 Modèle de laboratoire
 - 5.4.5 Bâtiment des Telecom-PTT
 - 5.4.6 Bâtiment Felimob
6. Principes physiques
 - 6.1 Mise sur pied d'un modèle simplifié
 - 6.1.1 Modèle élémentaire : effet de cheminée
 - 6.1.2 Echauffement global par des plans parallèles
 - 6.1.3 Echauffement local le long de plans parallèles
 - 6.2 Description du système
 - 6.2.1 Ecran
 - 6.2.2 Caillebotis, éléments de liaison
 - 6.2.3 Canal
 - 6.2.4 Paroi

- 6.3 Principe de fonctionnement du programme TQV
- 6.4 Algorithmes de calcul
 - 6.4.1 Transfert de chaleur écran-paroi
 - 6.4.2 Températures hors rayonnement
 - 6.4.3 Intensités réfléchies, absorbées et transmises
 - 6.4.4 Augmentation de la température de l'air
 - 6.4.5 Intensité thermique transmise à l'air
 - 6.4.6 Echauffement des vitrages, store et contre-cœur
 - 6.4.7 Intensités cédées à l'air
 - 6.4.8 Vitesses de contrôle
- 7. Etablissement des considérations pratiques
 - 7.1 Façade double-peau étanche par rapport aux locaux
 - 7.1.1 Niveau neutre
 - 7.1.2 Débit du canal
 - 7.1.3 Echauffement de l'air
 - 7.1.4 Conclusions pratiques
 - 7.2 Ventilation de locaux par le canal de la double-peau
 - 7.2.1 Façade ombragée
 - 7.2.2 Façade uniformément éclairée
 - 7.2.3 Conclusions pratiques
 - 7.3 Déperditions thermiques hivernales
 - 7.3.1 Rayonnement en direction du ciel
 - 7.3.2 Estimation de l'effet sur les déperditions
 - 7.3.3 Conclusions pratiques
 - 7.3.4 Annexe : calcul des pertes vers l'air extérieur et le ciel
- 8. Etudes paramétriques
 - 8.1 Buts et moyens
 - 8.2 Critères de choix
 - 8.2.1 Vitrage de l'écran
 - 8.2.2 Vitrage de la paroi intérieure
 - 8.2.3 Store
 - 8.2.4 Résultats et conclusions
 - 8.3 Coefficient de transfert de chaleur apparent du canal
 - 8.4 Annexe : définition des données de base
 - 8.4.1 Façade et local type
 - 8.4.2 Cadres de fenêtres et vitrages
 - 8.4.3 Contre-cœur (allège)
 - 8.4.4 Stores
 - 8.4.5 Energie
 - 8.4.6 Canal de la double-peau
 - 8.4.7 Ecran
 - 8.4.8 Coefficients de transfert surfacique de chaleur
 - 8.4.9 Conditions météorologiques
- 9. Conclusions
- 10. Dossiers
 - Typologie et réalisations
 - Bâtiment Telecom-PTT
 - Bâtiment Felimob
 - Lumière naturelle
 - Aspects acoustiques

Remerciements

Ce travail de recherche a été rendu possible grâce au soutien des organismes et personnes suivantes :

- l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN), qui a assuré le financement des ressources humaines du projet,
- l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), qui a mis son infrastructure à disposition,
- M. R. Hastings (OFEN), qui a assuré le rôle de parrain,

ainsi que tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à ce travail,

...qu'ils soient ici tous sincèrement remerciés.

Tirage : 100 exemplaires
Lausanne, juin 1998
Réimpression : 30 ex. oct. 1999 et 30 ex. fév. 2001

Tirage : 100 exemplaires
Lausanne, juin 1998