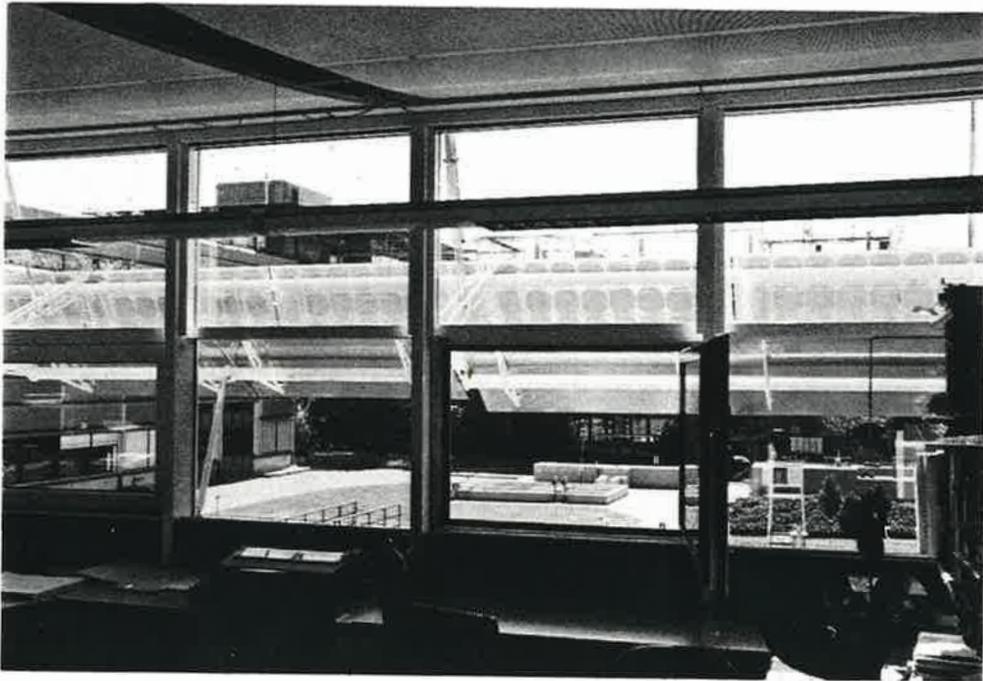




ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

DENKRAUM



RAPPORT FINAL

Subside
OFEN 2736

DENKRAUM

Rapport final

Responsable du projet :	Prof. A. Faist
Chef de projet :	Dr J.-B. Gay
Collaborateurs EPFL :	Dr J.-P. Eggimann A. Bauen P. Eckerström V. Scarani
Collaborateurs extérieurs à l'EPFL :	R. P. Miloni, architecte, Baden G. Sweitzer, Tokyo University
Auteurs du rapport :	Dr J.-P. Eggimann A. Bauen

Période : 1993 - 1995

Résumé

Sous le nom de « Denkaum », l'architecte Reto Miloni, associé à des industriels du secteur du bâtiment, a proposé un nouveau concept de bureau. Ce concept vise un confort thermique élevé, un éclairage naturel et artificiel optimal et de faibles besoins en énergie.

Afin de juger de l'efficacité du concept, deux locaux tests ont été installés sur le LESO en automne 1993.

L'analyse des mesures conduit aux conclusions suivantes:

1. Avec un k_{moyen} de $1,23 \text{ W/m}^2\text{K}$, les performances thermiques de la façade sont satisfaisantes, mais pas excellentes.

Sur une saison de chauffage moyenne, l'indice partiel d'énergie de chauffage s'élève à 110 MJ/m^2 , soit 35 % à 40 % de plus que ce que l'on observe avec les façades HIT ou double-peau installées sur des locaux similaires du LESO.

2. Au niveau du confort thermique, on constate des surchauffes importantes à l'entre-saison et en été.

Celles-ci résultent d'une part de la diminution de l'inertie thermique des locaux due à l'adjonction du faux-plafond et des éléments légers sur les parois latérales et d'autre part de l'insuffisance des protections solaires intérieures et l'absence de possibilité de réglage des protections solaires extérieures. Ces dernières ne sont réglables que depuis juillet 1995!

3. Avec un facteur de lumière du jour de 1,6 % à 4 m de la façade, l'éclairage naturel des locaux est faible, mais supérieur et plus uniforme que celui correspondant à des locaux conventionnels.

Vu la complexité du système installé, on pouvait toutefois espérer des performances nettement supérieures. Là encore, la mise en fonction du système à été très laborieuse.

4. Le confort visuel intérieur est bon, à l'exception d'éclairements trop élevés à quelques occasions.

Les stores réfléchissants intérieurs offrent donc une protection suffisante du point de vue de l'éblouissement mais insuffisante du point de vue de la protection thermique.

En conclusion, les performances globales des deux bureaux « Denkraum » installés au LESO ne sont pas supérieures à celles de bons bureaux actuels.

Table des matières

1.	Introduction.....	5
2.	Le système.....	6
	2.1 <i>Description et caractéristiques</i>	6
	2.2 <i>Principe de fonctionnement</i>	7
	2.3 <i>Mesures.....</i>	10
3.	Calorimétrie.....	12
	3.1 <i>Pertes par l'enveloppe.....</i>	12
	3.2 <i>Pertes par renouvellement d'air</i>	14
	3.3 <i>Gains solaires nets</i>	16
	3.4 <i>Gains internes nets.....</i>	16
4.	Performances thermiques.....	17
	4.1 <i>Besoins thermiques mesurés</i>	17
	4.2 <i>Diagramme H-m</i>	17
5.	Inertie thermique	19
6.	Confort thermique.....	21
	6.1 <i>PMV et PPD.....</i>	21
	6.2 <i>Confort hivernal.....</i>	22
	6.3 <i>Confort estival.....</i>	23
7.	Confort visuel et éclairage naturel.....	25
	7.1 <i>Appréciation subjective</i>	25
	7.2 <i>Confort visuel (hiver)</i>	26
	7.3 <i>Éclairage naturel</i>	28
8.	Conclusion	30
9.	Références.....	31
	Annexe 1: Appareils électriques des locaux Denkraum.....	33
	Annexe 2: Questionnaire pour l'estimation du confort ressenti par les occupants.....	34
	Annexe 3: Bilans énergétiques mesurés pour les mois de février et mars 1994	36



1. Introduction

Les objectifs du projet Denkraum sont de concevoir une façade industrielle et un aménagement intérieur pour des immeubles de bureaux visant des faibles besoins en énergie, un apport optimal en éclairage naturel et des excellentes conditions de confort thermique et visuel.

Ces bureaux, conçus par l'architecte Reto Miloni, se caractérisent par:

- une façade extérieure (Félix Constructions SA),
- un mobilier particulier (Combicom AG, Wilkhahn AG),
- des couleurs intérieures claires,
- un éclairage, direct et indirect, variable (Zumtobel AG),
- des stores intérieurs motorisés « SS-Rollo » (Agero AG),
- une protection intérieure contre l'éblouissement (Silent-Gliss AG),
- un brise-soleil / réflecteur extérieur mobile (Colt International AG),
- des panneaux photovoltaïques (Solution AG) motorisés (Colt International AG),
- une régulation automatique (Zumtobel AG) commandant simultanément l'éclairage, les stores et les panneaux photovoltaïques.

Deux locaux en vraie grandeur ont été aménagés dans le bâtiment LESO pour l'étude et l'optimisation de la deuxième version de ce concept (Denkraum II).

La présente recherche faite par le LESO-PB a pour but d'effectuer des mesures détaillées pour déterminer les performances énergétiques et le confort de ces locaux.

La pose de la façade et l'aménagement intérieur ont été terminés à fin 1993. Les mesures thermiques hivernales ont donc pu être faites pendant les mois de février et mars 1994.

Les éléments extérieurs, brise-soleil et panneaux photovoltaïques, n'ont été installés qu'en juin 1994. Pour des raisons indépendantes de notre volonté, ils n'ont été mis en service qu'en juillet 1995. Quant à la régulation automatique devant régler l'éclairage naturel et artificiel, en fonction de la mesure du niveau d'éclairement fournie par un luxmètre posé sur le toit du bâtiment LESO, sa mise en service n'est pas encore faite.

2. Le système

2.1 Description et caractéristiques

Le prototype de façade Denkraum, orienté sud, occupe la partie centrale du premier étage du LESO (figure 1) et constitue la paroi extérieure des locaux 103, aussi appelé « Denkraum-est »(DE) et 104, « Denkraum-ouest » (DW).

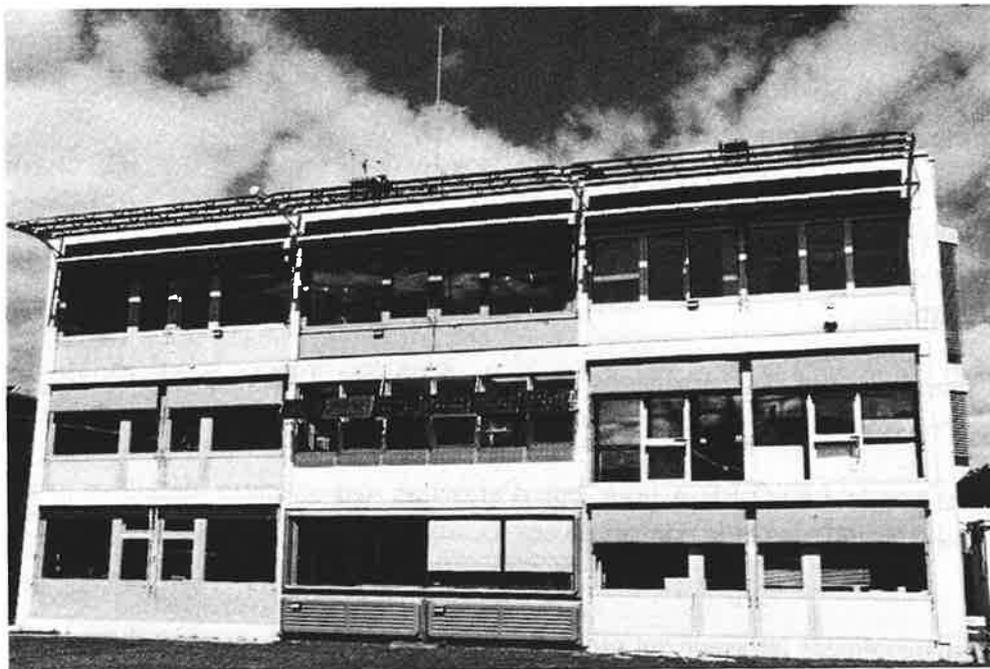


Figure 1: façade sud du bâtiment LESO avec, au centre, le prototype Denkraum.

Ces deux locaux (figure 2) ont respectivement des surfaces de plancher de $10,7 \text{ m}^2$ et $21,5 \text{ m}^2$ et des volumes de $30,0 \text{ m}^3$ et de $60,2 \text{ m}^3$.

Le mobilier assez dense couvre environ 40% de la surface et occupe environ 15% du volume. Des panneaux sandwich de 8,5 cm d'épaisseur séparent les deux locaux. Des fausses-parois métalliques recouvrent pour les 2/3 la paroi est du local 103 et la paroi ouest du local 104. Un faux-plafond convexe en bois vise une distribution optimale de l'éclairage naturel. L'éclairage artificiel est fourni par des tubes fluorescents "chaud" et "froid" et par des lampes à basse consommation pour une puissance totale de 426 W ($13,2 \text{ W/m}^2$). Le chauffage est assuré, pour chaque local, par un corps de chauffe électrique de 1 kW, monté sur la façade.

La façade, d'une surface totale de $19,8 \text{ m}^2$ se compose des éléments suivants :

- Une surface vitrée de $9,61 \text{ m}^2$ (soit 48,5 % de la surface totale de la façade ou environ 30 % de la surface de plancher), subdivisée en 12 éléments dont 3 ouvrables (surface vitrée ouvrable: $1,62 \text{ m}^2$). Tous les vitrages sont isolants doubles sélectifs (4/12/4 mm) et possèdent un coefficient de transmission énergétique $g = 0,62$.

- Un contrecœur léger formé de panneaux sandwich d'épaisseur 8 cm pour une surface totale de 5,33 m².
- Des montants et des cadres métalliques isolés supportant respectivement la structure de la façade et les vitrages, et représentant 24,5 % de la surface de la façade.
- Une aile photovoltaïque/brise-soleil accrochée à la façade et servant à la génération d'électricité et à la réflexion de la lumière naturelle vers le faux plafond.
La puissance électrique maximale théorique générée par l'installation photovoltaïque est de 295 W pour un rayonnement global incident de 1000 W/m² et une température de 25° C. Le rendement rapporté à la surface de l'aile est de 7,6 %.

La figure 3 montre une coupe du local Denkraum et du système photovoltaïque / brise-soleil.

2.2 Principe de fonctionnement

La façade "Denkraum" est une façade à gains directs. Le rayonnement pénétrant dans les locaux directement ou après réflexion sur le brise-soleil contribue partiellement à compenser les déperditions thermiques instantanées et partiellement à augmenter la température des parties massives (murs, dalles, mobilier).

Le contrecœur léger et l'ensemble de fausses-parois et faux-plafond laissent supposer une inertie thermique très faible pour les deux locaux ce qui implique des gains solaires différés minimes.

Les douze éléments vitrés de la façade sont disposés sur deux rangées. Chaque élément de la rangée supérieure possède une protection solaire motorisée à l'intérieur. Les éléments de la rangée inférieure sont munis d'une protection intérieure contre l'éblouissement. Une protection extérieure contre le rayonnement solaire direct est fournie par le brise-soleil qui n'a malheureusement été posé qu'en juin 1994.

Chaque local dispose d'une régulation du chauffage avec une sonde qui mesure la température de l'air à l'intérieur de chaque bureau.

Les protections solaires et l'éclairage artificiel sont commandés à l'aide d'interrupteurs situés à l'entrée des bureaux.

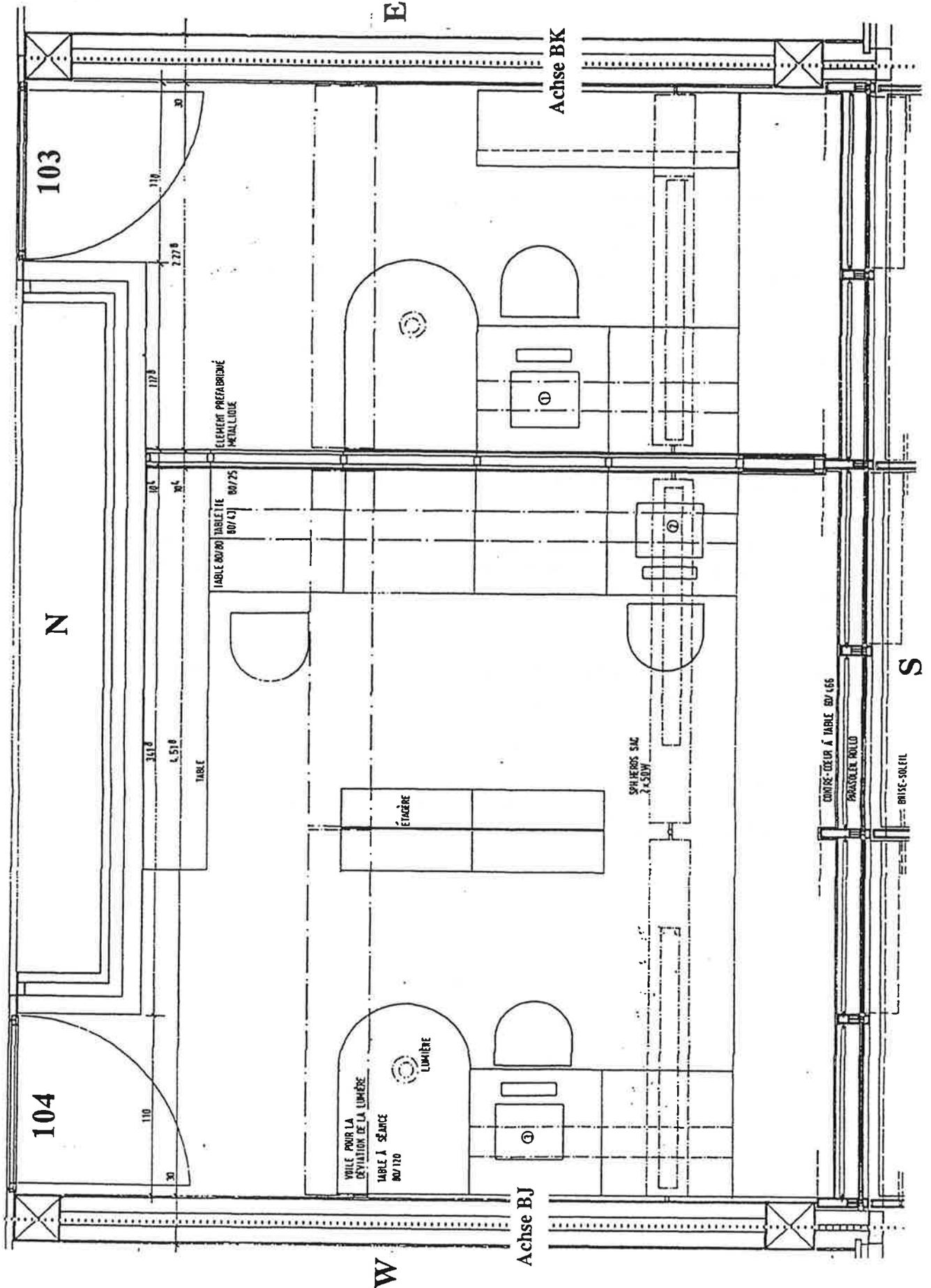


Figure 2: plans des bureaux Denkraum (locaux 103 et 104)

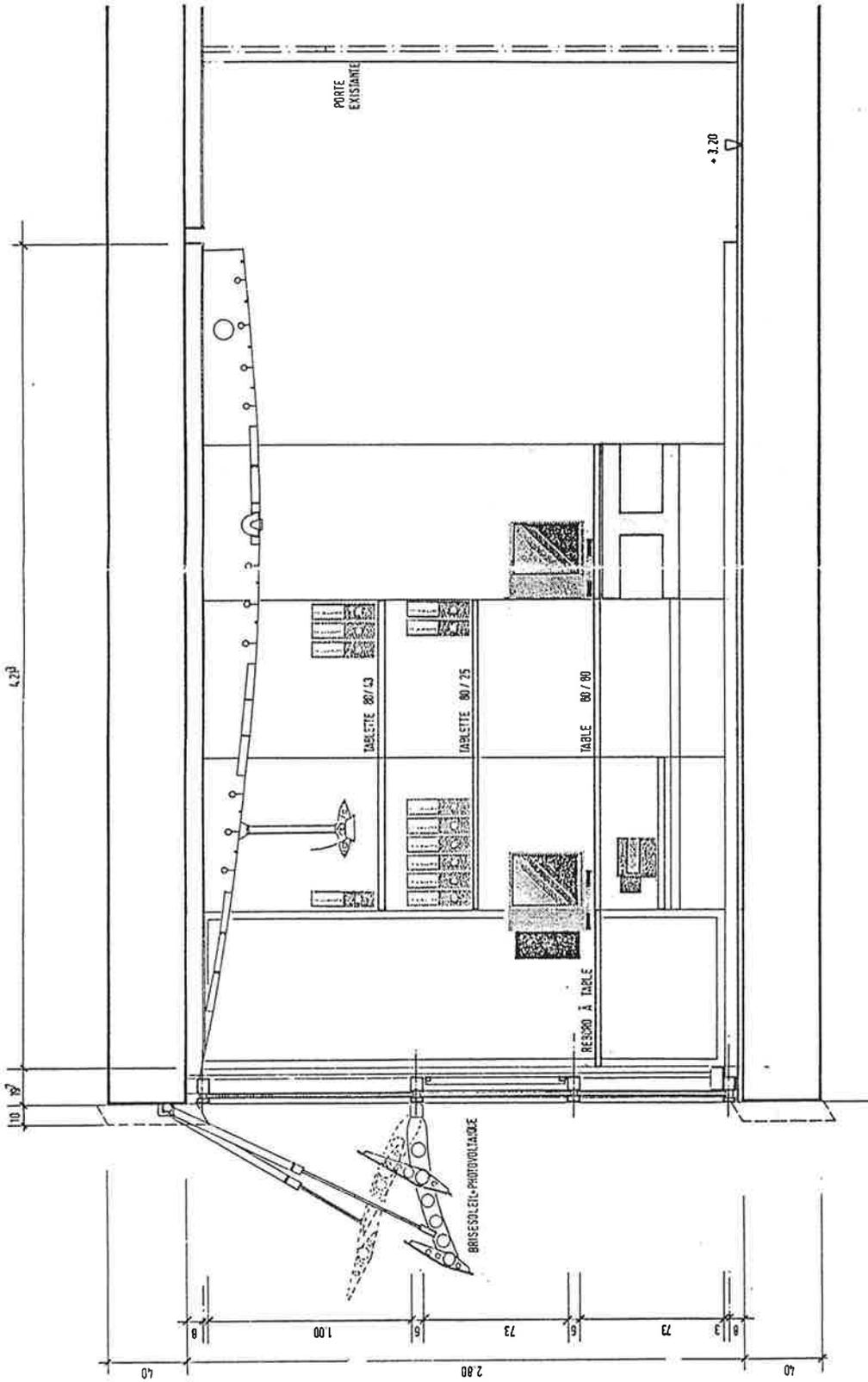


Figure 3: coupe des locaux Denkraum

2.3 Mesures

L'établissement du bilan énergétique et du niveau de confort requiert la connaissance de grandeurs physiques mesurables et d'une évaluation de la part des occupants.

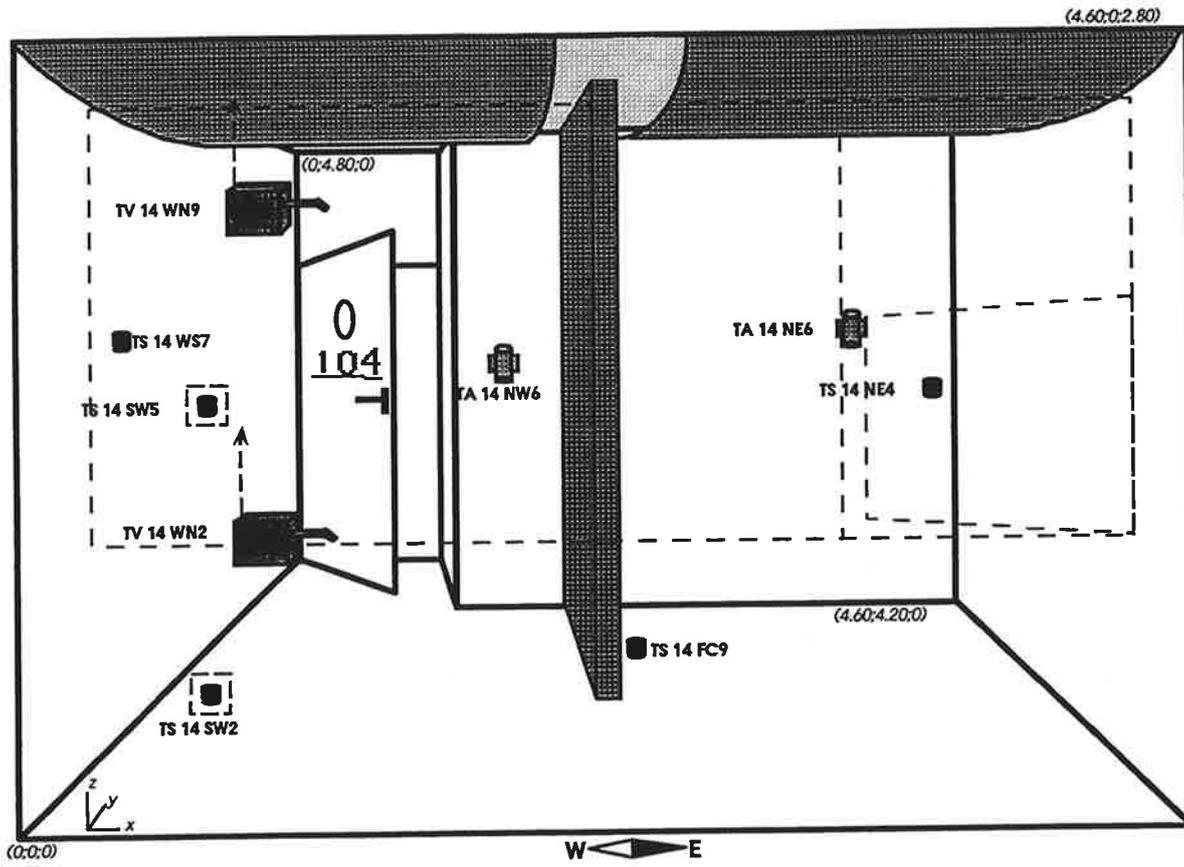
Les grandeurs mesurées sont: la température de l'air ventilé, la température de l'air, la température de surface, le temps d'ouverture des portes et fenêtres, le taux d'occupation, la puissance destinée à l'éclairage et celle destinée au chauffage et aux différents appareils présents dans les bureaux.

Un formulaire contenant des questions sur l'activité et le niveau de confort thermique et visuel a été distribué aux occupants. Un exemple du questionnaire est donné dans l'annexe 2.

Les mesures de la puissance électrique consommée se font à l'aide d'un compteur lumière et d'un compteur force (annexe 1).

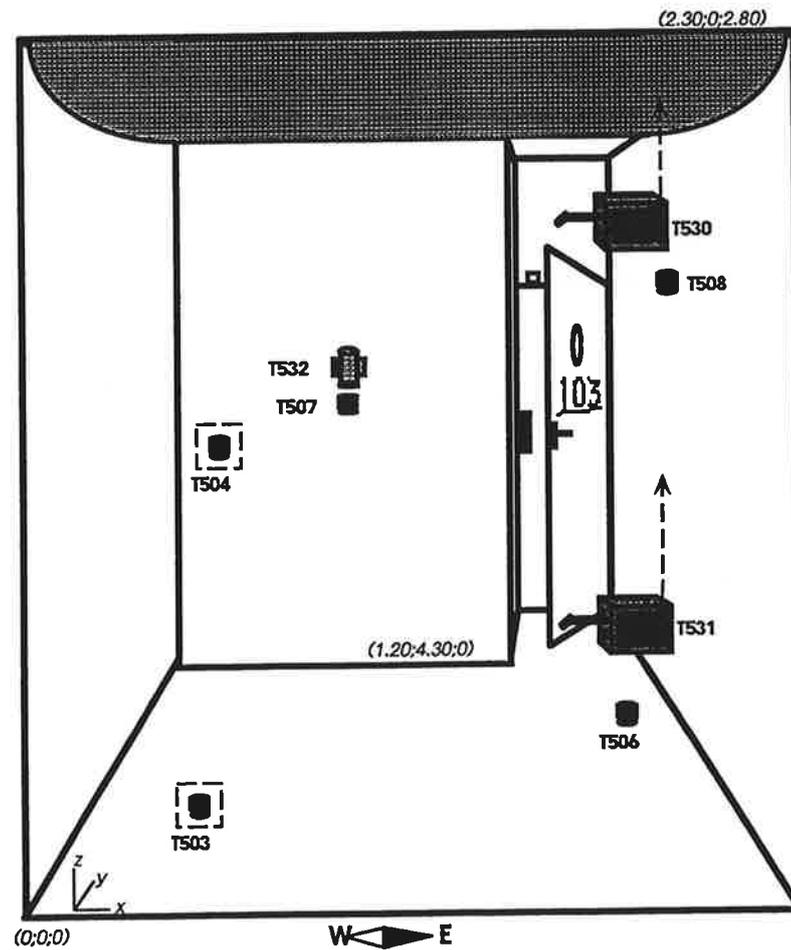
Les autres mesures de grandeurs physiques dans les locaux se font à l'aide des sondes placées selon les schémas illustrés par la figure 4. La détermination du bilan énergétique requiert également la connaissance des températures des zones adjacentes aux locaux "Denkraum".

Toute sonde de température, de type Pt100, a été préalablement calibrée à l'aide d'un thermocouple de référence Keithley. La valeur finale de la température tient également compte d'une correction au niveau de la chaîne d'acquisition. Le fonctionnement correct de toutes les sondes a été vérifié à l'aide d'un fichier de mesures instantanées de la chaîne d'acquisition.



(0;0;0)

W ← E



(0;0;0)

W ← E

-  temp. de l'air ventilé
-  temp. de surface
-  temp. de l'air
-  CRS
-  ouverture porte/fenêtre

Figure 4: appareils de mesure (CRS= compteur de personnes)

3. Calorimétrie

L'équation du bilan énergétique pour une période définie est la suivante :

$$E_{ch} = P_c + P_v - F (G_s + G_{int})$$

où	E_{ch}	énergie électrique destinée au chauffage [MJ]
	P_c	pertes de chaleur au travers de l'enveloppe des bureaux [MJ]
	P_v	pertes de chaleur par renouvellement d'air [MJ]
	F	facteur d'utilisation des gains
	G_s	gains solaires [MJ]
	G_{int}	gains internes [MJ]

Ce chapitre présente le calcul ou la mesure des différents termes du bilan énergétique, tandis que le chapitre suivant présente les résultats des mesures.

La présence de 2 compteurs électriques (« lumière » et « force ») nous permet de séparer la part de consommation électrique destinée à l'éclairage de celle employée pour le chauffage et l'alimentation des appareils de bureau.

3.1 Pertes par l'enveloppe

Les pertes par l'enveloppe séparant deux zones sont données par l'expression suivante:

$$P_c = H_o \Delta\theta \Delta t$$

où	H_o	pertes spécifiques à travers l'enveloppe
	$\Delta\theta$	différence de température entre les deux zones
	Δt	intervalle de temps

Les paragraphes qui suivent nous donnent les pertes spécifiques à travers chaque élément composant l'enveloppe.

3.1.1 Pertes spécifiques à travers la façade

Surfaces opaques:

- Montants
 $P_{sp} = 2 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 2,24 \text{ m}^2 = 4,48 \text{ W/K}$
- Cadres
 $P_{sp} = 2,2 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 1,03 \text{ m}^2 = 2,27 \text{ W/K}$
- Tablette + gaine technique au sol
 $P_{sp} = 0,22 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 0,7 \text{ m}^2 = 0,15 \text{ W/K}$
- Tablette + gaine technique au plafond
 $P_{sp} = 2,2 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 0,84 \text{ m}^2 = 1,85 \text{ W/K}$

- Contrecoeur

$$P_{sp} = 0,60 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 5,33 \text{ m}^2 = 3,20 \text{ W/K}$$

Surface vitrée:

$$P_{sp} = 1,3 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 9,61 \text{ m}^2 = 12,49 \text{ W/K}$$

Pertes spécifiques totales à travers la façade:

$$P_{sp. \text{ tot.}} = 24,44 \text{ W/K}$$

Celles-ci correspondent à un coefficient de transfert thermique moyen pour la façade:

$$k_{moy} = 1,23 \text{ W/m}^2\text{K}.$$

Les coefficients de transfert thermique d'une partie des éléments composant la façade ont été fournis par les constructeurs. Les autres ont été calculés en connaissant les matériaux composant les éléments et leur épaisseur. Des images de la façade prises avec la caméra à infrarouge (figure 5) ont permis de mettre en évidence les régions avec les pertes spécifiques plus élevées (ponts thermiques) qui sont dans notre cas les cadres, les montants et la tablette au plafond. La géométrie de certains de ces éléments et leur nature métallique ont rendu difficiles les vérifications des coefficients à l'aide de fluxmètres.

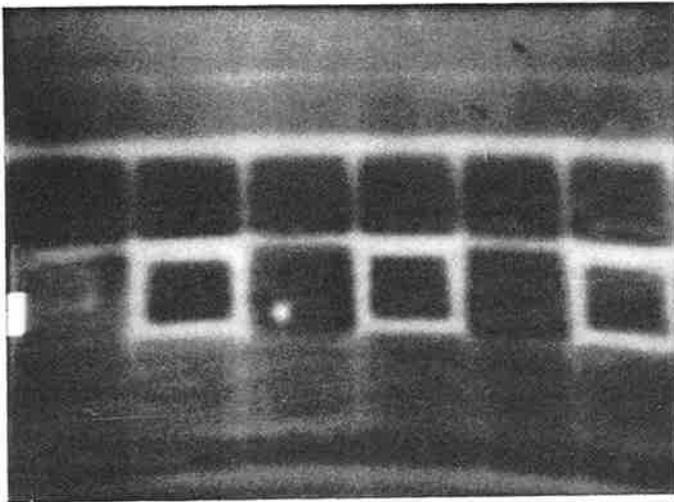


Figure 5: Photo infrarouge de la façade Denkraum (avant la pose du brise-soleil et des panneaux photovoltaïques) prise depuis l'extérieur par temps froid et couvert. Les zones claires correspondent à une température de surface élevée et donc à des ponts thermiques. On distingue nettement les cadres des 3 ouvrants ainsi que la partie supérieure de la façade.

3.1.2 Pertes spécifiques au travers des parois intérieures

Sol
 $P_{sp} = 20 \text{ W/K}$ ($k_{moy} = 0,62 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Plafond
 $P_{sp} = 20 \text{ W/K}$ ($k_{moy} = 0,62 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Mur ouest
 $P_{sp} = 7,9 \text{ W/K}$ ($k_{moy} = 0,58 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Mur est
 $P_{sp} = 7,9 \text{ W/K}$ ($k_{moy} = 0,58 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Mur nord
 $P_{sp} = 18,8 \text{ W/K}$ ($k_{moy} = 0,97 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Les données précédentes sont tirées du "Dossier systèmes" [1].

3.2 Pertes par renouvellement d'air

Les pertes par renouvellement d'air s'expriment par:

$$P_v = \rho \cdot c \cdot V \cdot n \cdot \Delta\theta \cdot \Delta t$$

où :

ρ	densité de l'air [kg/m^3]
c	chaleur spécifique de l'air [Wh/kg K]
V	volume du local [m^3]
n	taux de renouvellement d'air [1/h]
$\Delta\theta$	différence de température entre les deux zones où se fait l'échange d'air [K]
Δt	intervalle de temps [s]

Le taux de renouvellement d'air n des locaux étudiés dépend de leur étanchéité mais également des conditions météorologiques (températures, vitesse du vent) et du comportement des occupants (ouverture des fenêtres et portes). Nous avons déterminé des valeurs moyennes de n pour les locaux "Denkraum" à l'aide de la méthode des gaz traceurs [2] qui consiste à suivre la trace des mouvements de l'air dans un lieu donné après y avoir introduit un élément volatil aisément identifiable.

La provenance des différentes infiltrations d'air est fondamentale vue les différences de température qui existent entre les différentes zones limitrophes aux locaux Denkraum. L'emploi de 3 gaz traceurs (F_{13} , SF_6 , N_2O) nous a permis de connaître séparément les infiltrations d'air provenant de l'extérieur, des locaux adjacents (102 et 105) et du corridor.

Les mesures prises sur une semaine (4/2/94 - 10/2/94) nous ont donc permis d'obtenir un taux de renouvellement d'air moyen en fonction du comportement des occupants pour une période typiquement hivernale ($T_{\min} = -4,3^\circ\text{C}$; $T_{\max} = 12,0^\circ\text{C}$).

Les données du dimanche 6/2/94 en absence d'occupants nous donnent une idée de l'étanchéité des locaux "Denkraum". Des mesures ont également été prises avec les portes ou fenêtres ouvertes pour observer les influences de ces dernières sur le taux de renouvellement d'air.

La figure 6 et le tableau 1 présentent les résultats des mesures, le tableau 2 les valeurs hebdomadaires moyennes.

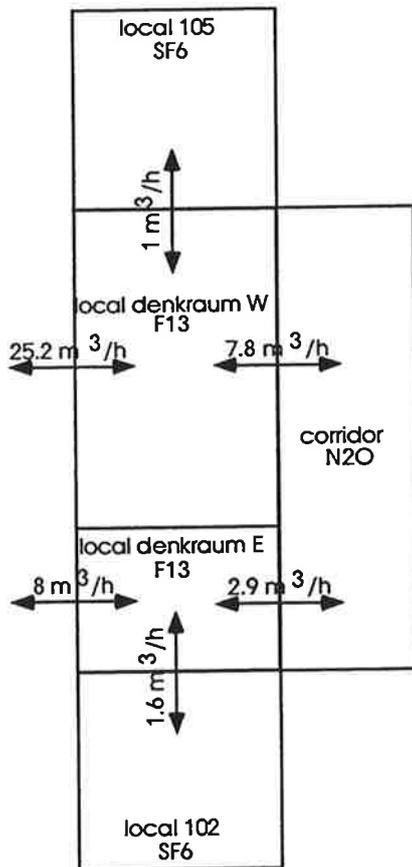


Figure 6: débits d'air échangés entre les locaux Denkraum et les zones voisines dans des conditions normales d'exploitation. (F₁₃, SF₆ et N₂O sont les 3 gaz traceurs utilisés).

	DÉBITS D'AIR [m ³ /h]					
	EXT. <-> DE	CORR. <-> DE	102 <-> DE	EXT. <-> DW	CORR. <-> DW	105 <-> DW
En absence d'occupants	10,2 ±2,3	1,2 ±0,5	0,8 ±0,6	23,6 ±4,1	2,8 ±2,0	(0,7)
Conditions normales	8,0 ±2,1	2,9 ±2,3	1,6 ±1,6	25,2 ±4,8	7,8 ±4,6	(1,0)

Tableau 1: débits d'air échangés entre les locaux « Denkraum » et les zones voisines calculés à l'aide du programme AUBE3[2]. Pour les débits plus faibles les valeurs sont données entre parenthèses puisque l'erreur calculée est supérieure à la valeur du flux.

	global	avec l'extérieur
local Denkraum est (DE)	0,42 h ⁻¹	0,27 h ⁻¹
local Denkraum ouest (DW)	0,56 h ⁻¹	0,42 h ⁻¹

Tableau 2: valeurs hebdomadaires moyennes du taux de renouvellement d'air

3.3 Gains solaires nets

Les gains solaires nets G_{Snet} [MJ] sont donnés par la formule suivante :

$$G_{Snet} = F I_{VS} S g \Delta t$$

où	F	facteur d'utilisation des gains [-]
	I_{VS}	intensité moy. du rayonnement global vertical sud [W/m ²]
	S	surface vitrée [m ²]
	g	coefficient de transmission énergétique du vitrage [-]
	Δt	intervalle de temps considéré [Ms]

Le rayonnement global vertical sud est mesuré à l'aide d'un solarimètre Keppley situé à une hauteur de deux mètres du sol.

Le facteur d'utilisation n'est déterminé qu'après comparaison des gains avec les pertes thermiques. Il donne une indication de l'importance des apports solaires passifs au sein du bilan énergétique.

Le produit $S g$ donne la surface équivalente de captage $S_{eq} = 5,96 \text{ m}^2$.

3.4 Gains internes nets

Nous considérons comme gains internes G_{int} [MJ] la chaleur dégagée par les occupants, par les appareils de bureau et par l'éclairage. Ils sont quantifiés comme suit :

$$G_{int} = F (P_{occ} N h + P_f + P_{lum}) \Delta t$$

où	F	facteur d'utilisation des gains [-]
	P_{occ}	puissance thermique dégagée par un occupant (100W/occ)
	N	nombre d'occupant [occ]
	h	taux d'occupation des locaux [-]
	P_f	puissance électrique destinée à l'alimentation des appareils de bureau [W]
	P_{lum}	puissance électrique destinée à l'éclairage [W]
	Δt	intervalle de temps [Ms]

Il est difficile de séparer les dépenses énergétiques destinées au chauffage de celles destinées à l'alimentation des appareils de bureau. Nous avons donc estimé les dernières en fonction des appareils présents dans les bureaux et de leur taux d'utilisation.

4. Performances thermiques

Pour l'évaluation des locaux "Denkraum" du point de vue énergétique nous nous sommes basés sur les mesures effectuées durant les mois de février et de mars.

4.1 Besoins thermiques mesurés

Nous avons établi une fiche type contenant les conditions météorologiques, les pertes thermiques associées à chaque élément, les différents gains et les dépenses énergétiques, hebdomadaires et mensuels, caractéristiques de la période considérée.

L'annexe 3 contient les bilans énergétiques mensuels pour les mois de février et mars.

4.2 Diagramme H-m

La méthode H/m [3] permet de caractériser les performances thermiques et de la façade Denkraum et de la comparer à d'autres façades déjà mesurées, ceci indépendamment du climat effectif pendant les mesures.

La quantité d'énergie destinée au chauffage (E_{ch}), la densité moyenne de rayonnement solaire incident sur la façade (I_{vs}) et les températures moyennes intérieure (θ_{int}) et extérieure (θ_{ext}) sur une période donnée permettent l'établissement de la droite H/m:

$$H = H_s - S_{\acute{e}q} m$$

où :	H	=	$E_{ch} / (\Delta\theta \Delta t)$	coeff. de pertes thermiques effectives sur la période considérée [W/K]
	H_s	=		coeff. de pertes thermiques en absence de rayonnement solaire [W/K]
	$S_{\acute{e}q}$	=		surface équivalente de captage [m ²]
	m	=	$I_{vs} / \Delta t$	variable météorologique [W/m ² K]
	$\Delta\theta$	=	$\theta_{int} - \theta_{ext}$	différence de température intérieur - extérieur [K]

La figure 7 montre la droite H/m obtenue à partir des mesures effectuées sur l'ensemble des locaux "Denkraum". Sur la même figure nous avons superposé les droites H/m expérimentales pour les façades HIT et double-peau testées précédemment au LESO.

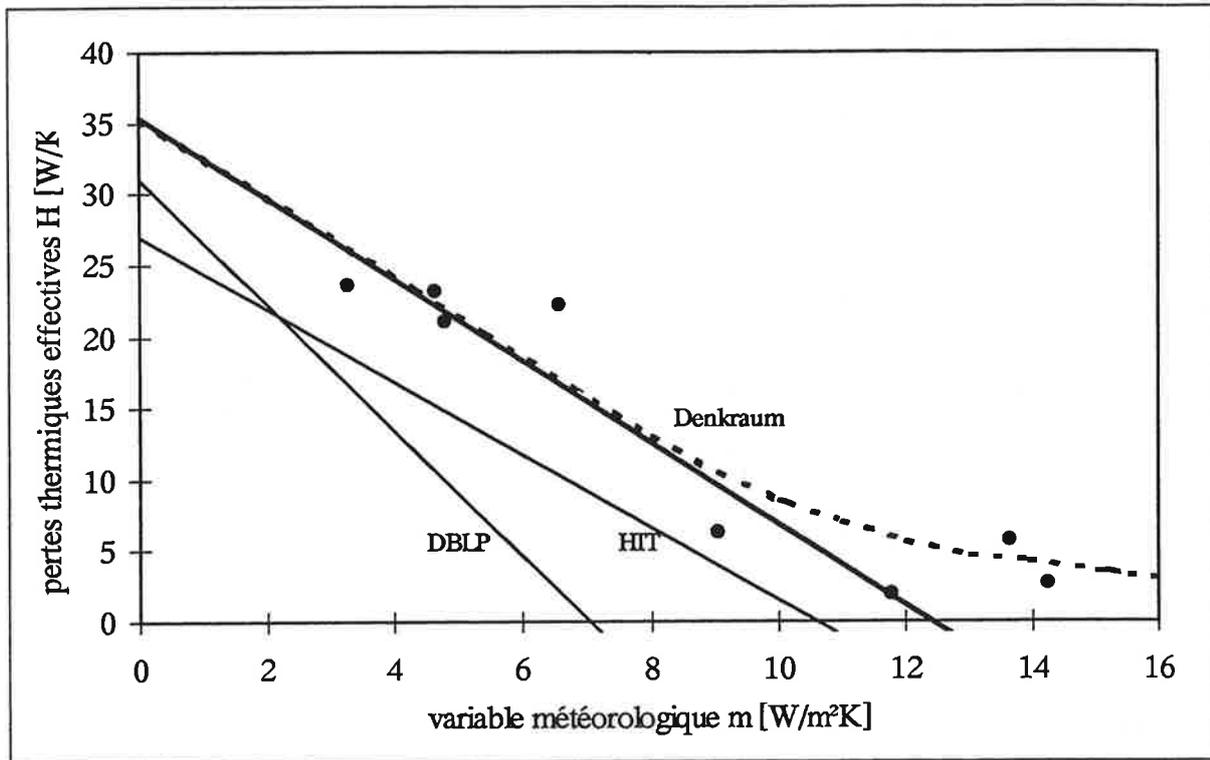


Figure 7: droites H/m mesurée pour la façade Denkraum, avec les points de mesures (moyennes hebdomadaires), et, pour comparaison, pour les façades HIT et double-peau (DBLP) du LESO. La courbe en pointillé montre le comportement des locaux Denkraum lors d'ensoleillement important par rapport aux pertes thermiques. Malgré les besoins, les gains solaires et internes ne sont pas entièrement utilisés. Ceci est compensé par une consommation d'énergie de chauffage.

En comparant la droite H/m mesurée pour la façade Denkraum avec les droites obtenues pour les façades HIT et double-peau nous remarquons que:

- par très faible ensoleillement et temps très froid (m petit), la façade Denkraum a des pertes thermiques plus élevées que celles des 2 autres façades. Ceci est dû aux défauts d'isolation (ponts thermiques, voir §3.1.1).
- la pente de la droite Denkraum se situe entre celle des façades HIT et double-peau. Cela signifie que la façade Denkraum profite mieux du soleil (surface équivalente de captage plus élevée) que la façade HIT et moins bien que la façade double-peau.
- lorsque l'ensoleillement est important et les pertes thermiques relativement faibles, la consommation d'énergie de chauffage des locaux Denkraum (courbe en pointillés) est très supérieure à celles des autres locaux. On peut expliquer cela par une très mauvaise exploitation des gains solaires de la part des locaux Denkraum due au manque de protections solaires extérieures (aile photovoltaïque / brise-soleil) sur la période de mesure et à la faible inertie thermique des locaux.

En tout temps, la consommation de chauffage est plus élevée que celles des autres locaux. Dans des conditions climatiques standard, les locaux Denkraum auraient un indice de dépense d'énergie de chauffage de 110 MJ/m². Pour les locaux HIT et double-peau, cette valeur est inférieure à 80 MJ/m².

5. Inertie thermique

Comme mentionné auparavant, l'introduction dans les locaux de faux-plafonds et de fausses-parois laisse supposer une baisse dans l'inertie thermique du système.

Cette baisse a pu être vérifiée en comparant, à l'aide du programme LESOPULS [4], les locaux Denkraum à des locaux identiques mais démunis des faux-plafonds et des fausses-parois.

LESOPULS calcul d'abord le paramètre d'inertie thermique pour les locaux à partir des caractéristiques de chaque parois. Ensuite il détermine l'évolution des températures de l'air et de surface lorsque le local est soumis à une impulsion de chaleur de durée fixe.

Nous avons généré, sur la période allant du 17 au 19 juin, des impulsions de chaleur dans les deux locaux Denkraum et nous avons relevé les températures de l'air et des surfaces. Nous allons discuter les résultats obtenus pour le local est. La figure 8 montre les températures mesurées pour les différentes surfaces et la température de surface simulée à l'aide de LESOPULS. La température simulée correspond à une moyenne des températures mesurées des parois. Cette vérification nous permet de comparer les résultats de la simulation pour le local Denkraum avec les résultats obtenus en simulant un local « lourd » tout à fait semblable mais privé de la fausse-parois et du faux-plafond.

La figure 9 compare la température moyenne des murs de ces 2 locaux. La différence nette entre les deux températures prouve l'importance de la différence en inertie thermique entre les deux types de locaux.

La comparaison du paramètre d'inertie thermique fournis par la simulation montre que le local lourd possède un coefficient d'accumulation de chaleur qui est presque le double de celui du local Denkraum. Une telle différence influence de manière très importante le confort thermique des locaux.

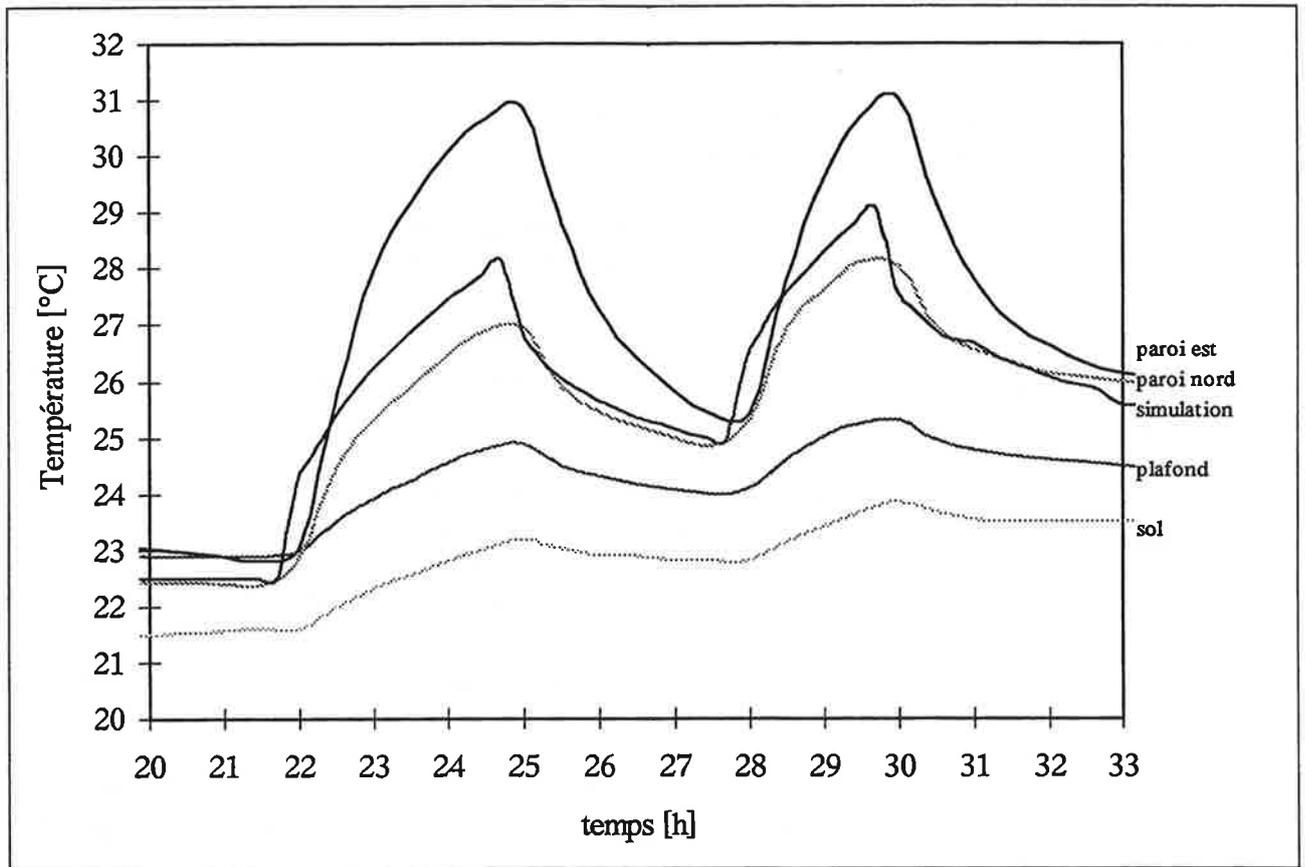


Figure 8: mesure de l'inertie thermique par impulsion de chaleur: températures mesurées et température de paroi simulée.

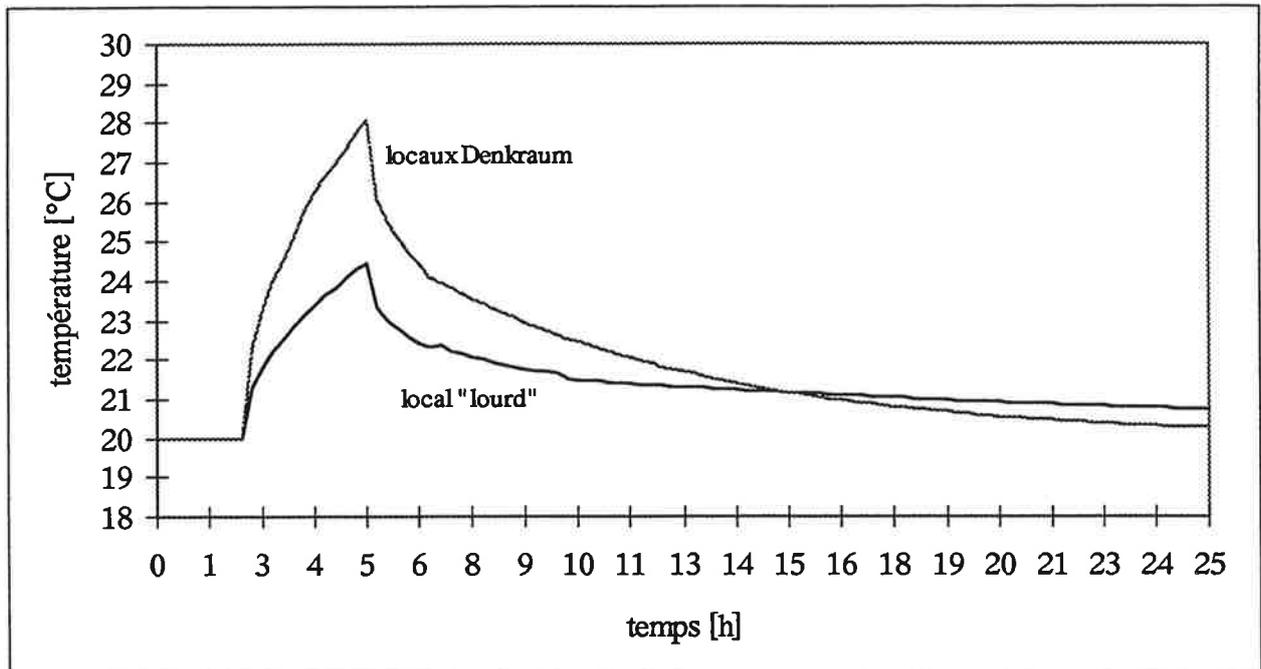


Figure 9: simulation de l'évolution de la température lors d'une impulsion de chaleur pour les locaux Denkraum et pour un local de même enveloppe mais avec une masse thermique élevée (pas de faux-plafond ni de fausses-parois)

6. Le confort thermique

6.1 *PMV et PPD*

Selon la théorie du prof. P. O. Fanger [5], deux échelles de confort permettent de caractériser le confort thermique:

- le "vote moyen prévisible" (PMV), sur une échelle de -3 (très froid) à +3 (très chaud), donne une appréciation, moyenne d'un ensemble de personnes, du confort dans un environnement donné;
- le "pourcentage prévisible d'insatisfaits" (PPD) donne la part des personnes insatisfaites du confort dans des conditions données.

Le PPD peut être obtenu à partir du PMV par la relation suivante:

$$PPD = 1 - 0,95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2)$$

Donc, un PMV nul (confort optimal) correspond tout de même à 5% d'insatisfaits.

Un environnement est dit confortable lorsque le PPD est inférieur à 10% [6; 7]; ce qui correspond à un PMV entre -0,5 et +0,5.

Un PPD supérieur à 20% (éventuellement 25%) caractérise un inconfort certain. Le PMV correspondant est soit inférieur à -1 (inconfort froid) soit supérieur à +1 (inconfort chaud).

6.2 Confort hivernal

Pour estimer le confort thermique hivernal (sur la même période que les mesures thermiques) nous avons demandé aux occupants de donner un vote (cf. annexe 2) selon l'échelle de Fanger chaque deux heures lors de l'occupation des locaux (figure 10).

On remarque au mois de mars la nette tendance à un inconfort chaud (près de 40% des votes!). Cela provient de l'insuffisance des protections solaires (uniquement intérieures) et de la trop faible inertie des locaux (cf. chapitre 5).

L'inconfort froid de février, qui se présente également en décembre et janvier, provient selon les occupants d'une sensation de froid aux jambes et aux pieds. Ceci est probablement dû à des mouvements d'air froid proche du sol.

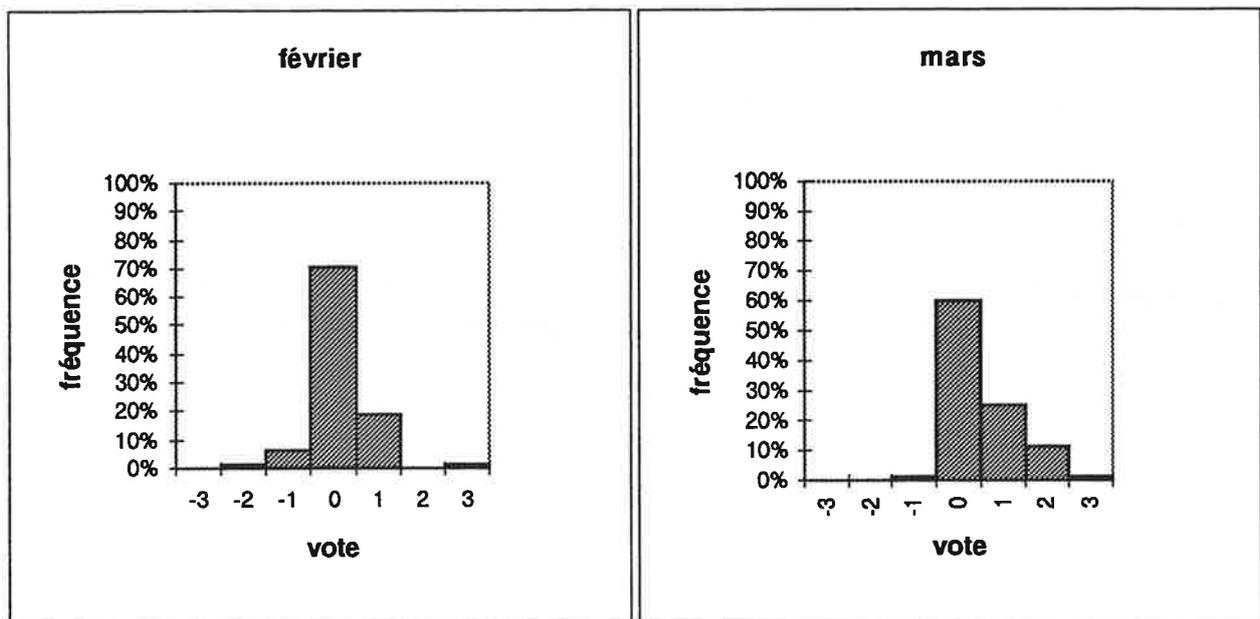


Figure 10: confort thermique (moyenne des votes des 3 occupants des bureaux Denkraum).

0 = confortable; -3, -2, -1, 1, 2, 3 = inconfortable:

- | | |
|--------------------------|--------------------------|
| -1 = un peu trop froid | +1 = un peu trop chaud |
| -2 = trop froid | +2 = trop chaud |
| -3 = beaucoup trop froid | +3 = beaucoup trop chaud |

6.3 Confort estival

Le confort thermique estival est calculé à partir des mesures de température (air et surfaces des parois) prises du 15 juin au 15 septembre 1994. Deux protections solaires extérieures fixes ont précédemment été posées:

- le brise-soleil
- les panneaux photovoltaïques.

On peut observer (figure 11) la forte variation journalière du confort: de un peu trop froid le matin à un peu trop chaud en fin d'après-midi. Cette courbe, moyennée sur la période estivale, montre la tendance journalière mais ne permet pas de juger du confort puisque les extrêmes (inconfort) sont compensés (effet de la moyenne). L'évolution d'un jour donné est très différente.

Pour chacune des 3 places de travail des bureaux Denkraum, la figure 12 montre le niveau d'inconfort au courant de la journée. On remarque que plus du tiers du temps ces locaux sont inconfortables! L'inconfort le plus fréquent provient d'une température trop froide en début de matinée. Ceci est dû à la ventilation nocturne nécessitée par la température trop élevée le jour précédent en fin d'après-midi.

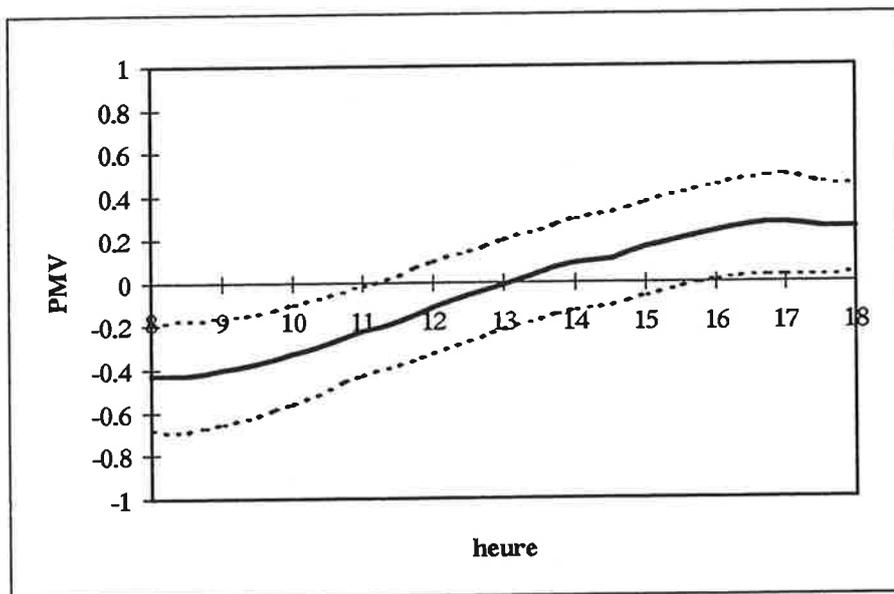


Figure 11: Évolution moyenne pendant les heures de travail (8h-18h, lundi-vendredi) des 3 mois d'été du vote moyen prévisible (PMV) pour les locaux Denkraum. Les lignes en pointillés délimitent la plage de PMV à un écart-type de la moyenne.

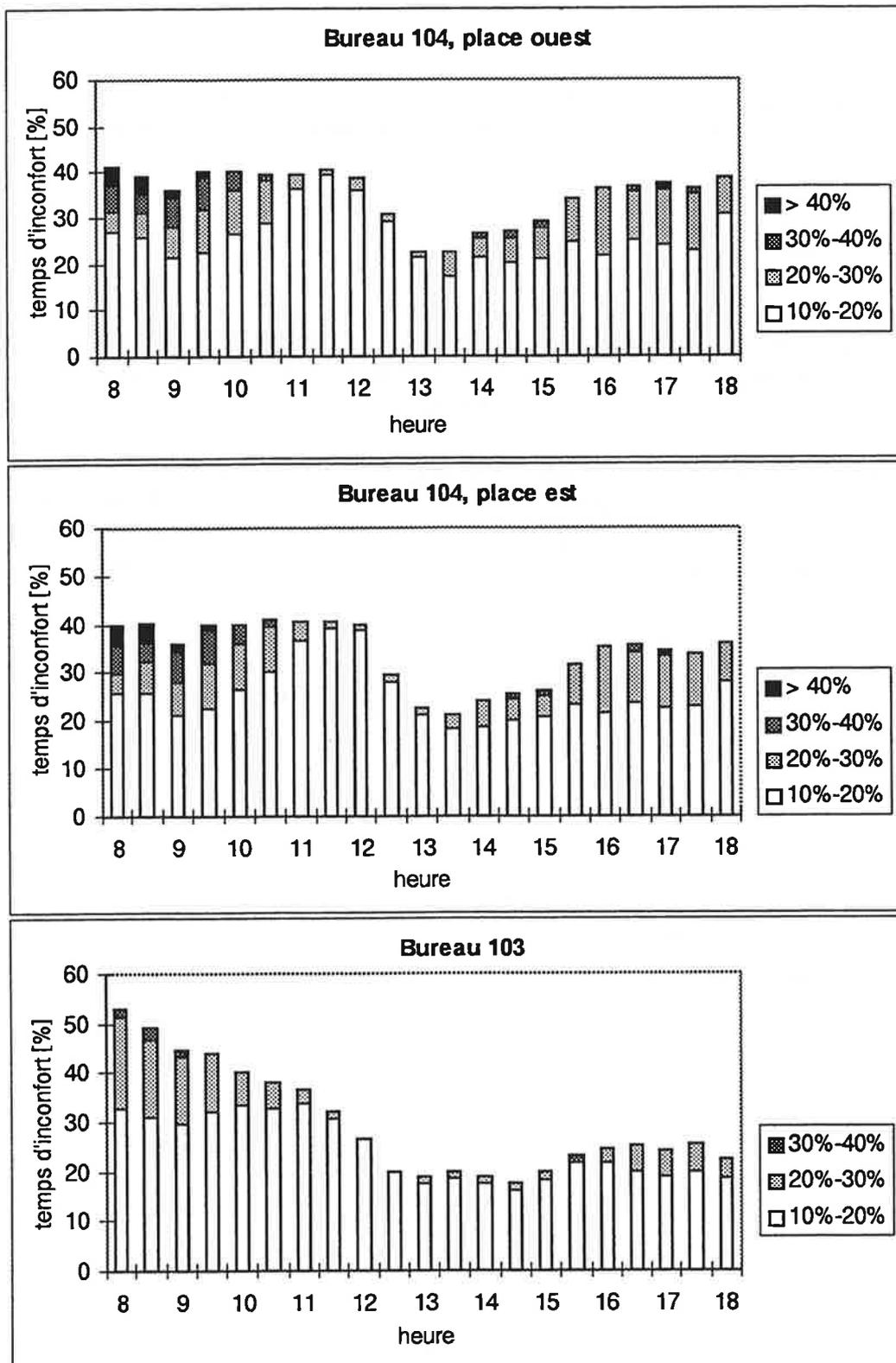


Figure 12: inconfort aux places de travail des 3 occupants des bureaux Denkraum.

En fonction de l'heure de la journée, les graphiques indiquent les pourcentages de temps d'inconfort pour les niveaux d'inconfort suivants, basé sur le PPD:

- <math>< 10\%</math>: confortable (pas sur le graphique)
- 10% à 20%: faible inconfort
- 20% à 30%: inconfort
- 30% à 40 %: fort inconfort
- > 40%: fort inconfort

7. Confort visuel et éclairage naturel

7.1 *Appréciation subjective*

Le local Denkraum-ouest est organisé pour accueillir 3 personnes (seulement 2 places sont utilisées), mais il favorise les personnes gauchères car pour 2 des 3 places la lumière naturelle provient de la droite.

Le système extérieur de lumière naturelle, à la fois brise-soleil et réflecteur (miroir) combiné avec des panneaux photovoltaïques, est extrêmement complexe. Pour garder leurs performances, les miroirs devraient être régulièrement entretenus ce qui est ici impossible sans monter un échafaudage. Après une année, ils sont largement couverts de poussière et, par endroit, de déjections d'oiseaux et de débris de nids.

La vue de l'extérieur est limitée:

- pour les personnes debout (ou entrant dans le bureau), par le cadre horizontal, partageant les fenêtres en deux parties, qui se trouve à la hauteur des yeux;
- pour les personnes assises, par le cadre inférieur des fenêtres qui est trop haut au-dessus du plan de travail et par le contrecœur sombre qui produit un contraste trop grand par rapport à la fenêtre et au plan de travail.

Les protections solaires intérieures sont peu ergonomiques:

- pour la moitié supérieure de la fenêtre, le store est abaissé à la hauteur voulue à l'aide de l'interrupteur situé à côté de la porte d'entrée du bureau,
- pour la moitié inférieure de la fenêtre, le store est élevé jusqu'à mi-hauteur de la fenêtre (seule position) à l'aide des deux mains.

Le sol, en parquet clair, donne une apparence claire et chaude et aide à la distribution de la lumière au fond des bureaux.

Les parois, en maçonnerie peinte en blanc ou recouverte de panneaux métalliques blancs, influencent le champ visuel de l'occupant:

- par réflexion de la lumière extérieure ou, par contraste,
- par l'ombre des objets affichés (poster) ou posés sur les étagères.

Le plafond, incurvé vers le bas, semble avoir été conçu pour un local plus haut et plus profond; au point le plus bas, il n'est qu'à 2,45 m au-dessus du sol. Formé de panneaux en bois rainurés, il absorbe les bruits et a ainsi une influence positive sur l'acoustique du local. Par contre il limite sérieusement les effets thermiques bénéfiques du plafond massif en béton (inertie thermique amoindrie). Son effet positif sur l'éclairage naturel est faible, il aurait été préférable qu'il soit incurvé vers le haut pour favoriser les réflexions vers l'arrière du local.

L'éclairage artificiel est composé de paires de tubes fluorescents pour l'éclairage général des bureaux et de lampes fluorescentes compactes pour l'éclairage individuel des places de travail.

Les tubes fluorescents sont posés par paire de température de couleur différente. Cette combinaison d'un tube « chaud » et d'un tube « froid » fournit une lumière agréable. Ils sont posés à 2,05 m au-dessus du sol et leur lumière est en partie directe et en partie indirecte (réflexion par le plafond). La

position de ces tubes, à moitié au-dessus des étagères, provoque des ombres et réduit sensiblement l'efficacité de l'éclairage.

Les lampes fluorescentes compactes sont montées dans le plafond. Leur lumière est légèrement concentrée et dirigée vers le plan de travail. Elles peuvent provoquer des éblouissements et des reflets indésirables. Le plan de travail qu'elles éclairent ne correspond cependant pas au place de travail des occupants.

7.2 Confort visuel (hiver)

Pour avoir une idée du confort visuel, nous avons demandé aux occupants (cf. annexe 2) de donner une appréciation du niveau général d'éclairage et de la gêne provoquée par des éblouissements physiologique ou psychologique (aussi appelés de voile ou de gêne).

Dans le domaine du confort visuel, on considère l'environnement comme confortable si 60% à 70% ou plus des individus sont satisfaits.

Selon les 3 critères pris en compte, on peut donc admettre que les locaux Denkraum sont confortables en hiver (figures 13, 14 et 15). On remarque cependant une nette variation entre les 2 mois de mesures: en mars le niveau d'éclairage est nettement plus élevé qu'en février et les éblouissements sont beaucoup plus fréquents. Les protections solaires intérieures ne sont donc pas suffisantes lorsque l'ensoleillement devient élevé, particulièrement au printemps lorsque le soleil pénètre encore profondément dans les locaux.

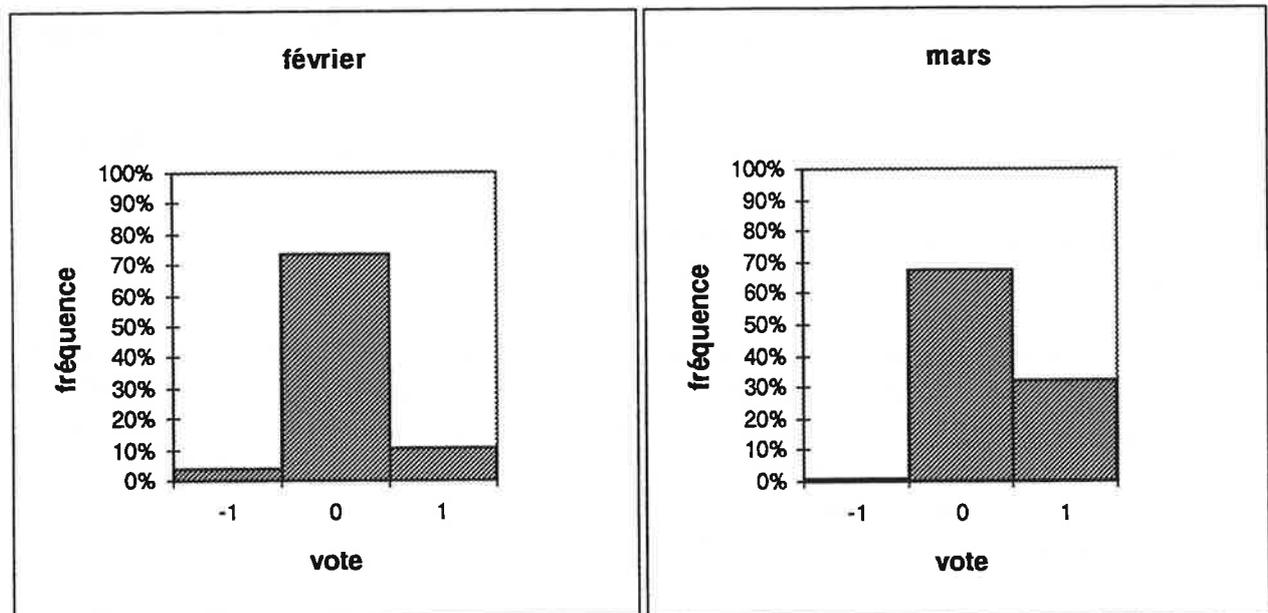


Figure 13: appréciation par les occupants du niveau général d'éclairage:

- 1 = trop faible
- 0 = bon
- +1 = trop élevé

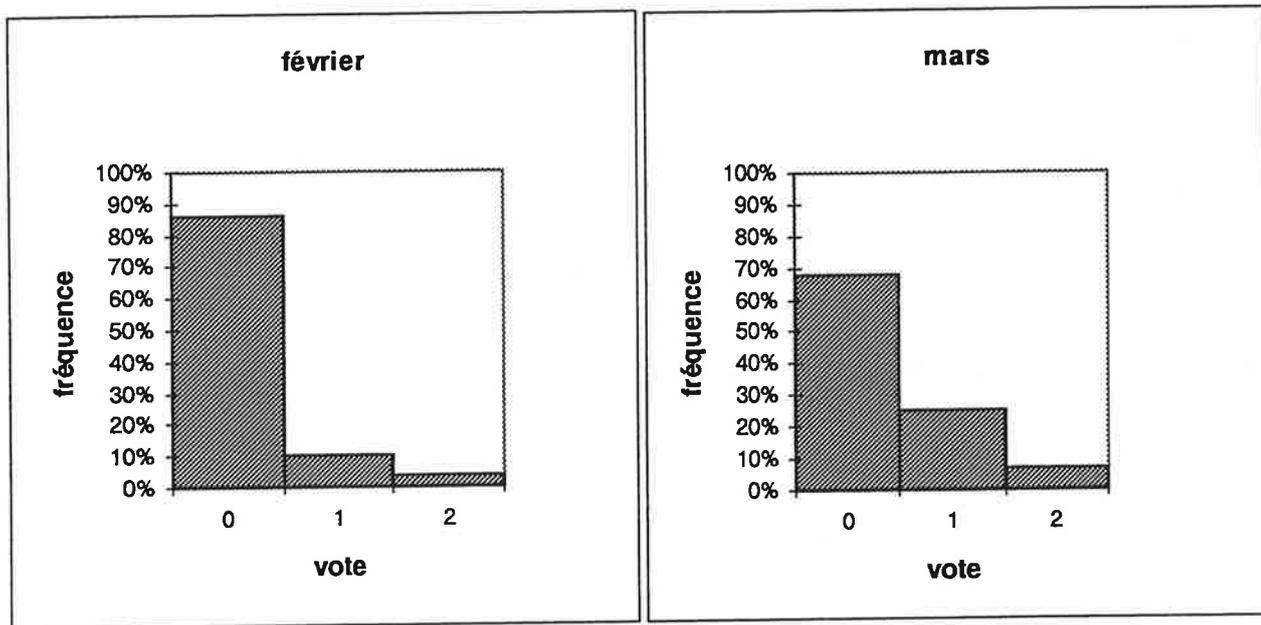


Figure 14: éblouissement physiologique (ou éblouissement de voile) ressenti par les occupants:

- 0 = aucun
- 1 = faible
- 2 = fort.

L'éblouissement physiologique correspond à des difficultés de visualisation des détails à cause de reflets trop importants dans le plan de travail

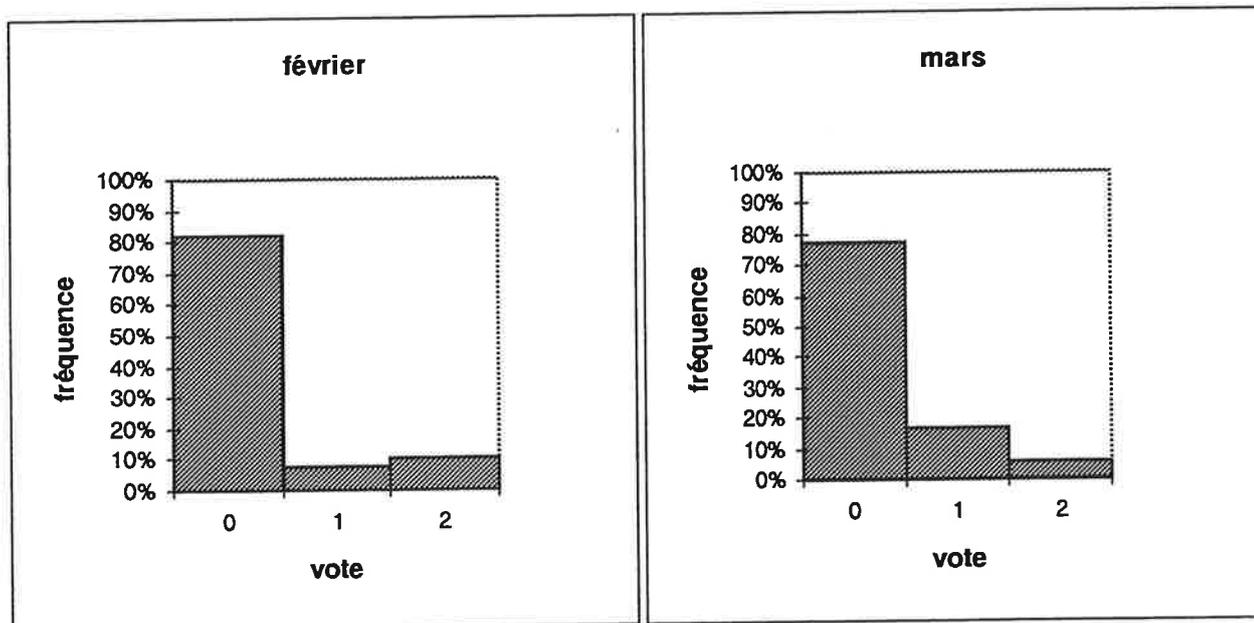


Figure 15: éblouissement psychologique (ou éblouissement de gêne) ressenti par les occupants:

- 0 = aucun
- 1 = faible
- 2 = fort.

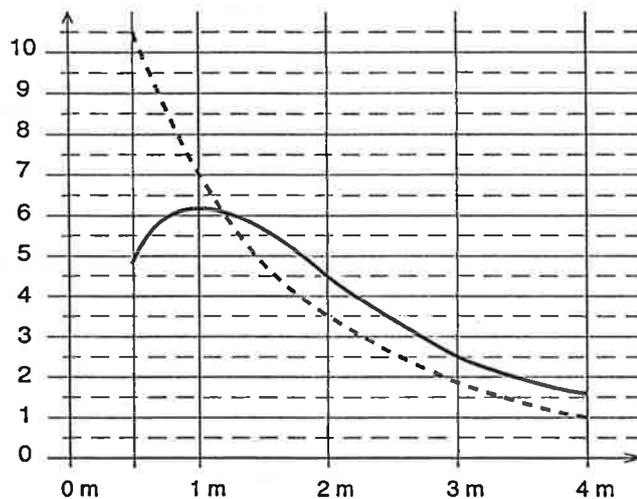
L'éblouissement psychologique correspond à des difficultés de visualisation à cause d'éclairements trop élevés dans le champ visuel entourant le plan de travail.

7.3 Éclairage naturel

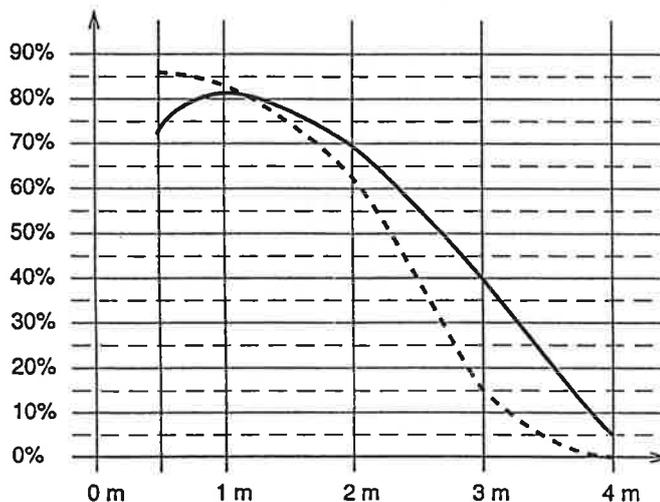
Par ciel couvert, le facteur de lumière du jour mesuré dans le local Denkraum s'élève à 1,6 % en fond de pièce (à 4 m de la façade). Cette valeur est sensiblement plus élevée que celle mesurée dans le local de référence (local EPF1). Ceci peut s'expliquer par l'effet de trois facteurs:

- l'indice de vitrage (surface de vitrage divisée par la surface du sol) passe de 26 à 32 %, ceci se traduit par un accroissement relatif du facteur de lumière du jour d'environ 23%,
- les parois du local de référence sont plus sombres,
- la hauteur du haut du vitrage du local Denkraum est de 15 cm supérieure à celle du local de référence.

Facteur de lumière du jour mesuré à 0,8 m au-dessus du sol



Autonomie en éclairage par ciel couvert pour un besoin fixé à 300 Lux sur le plan de travail



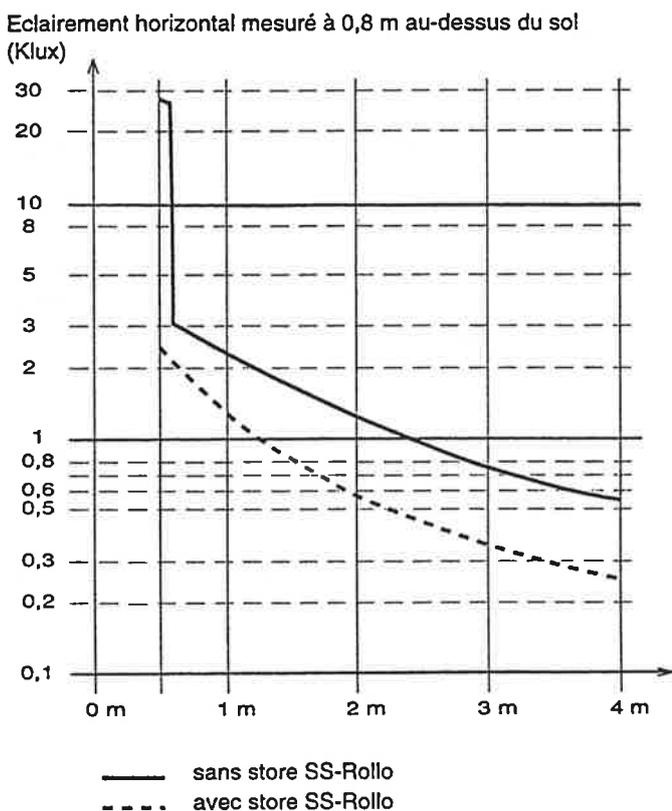
Légende : — Local DENKRAUM - - - Local de référence EPF1

Figure 16: facteur de lumière du jour [%] et autonomie en éclairage en fonction de la profondeur dans les locaux Denkraum (mesuré par ciel uniformément couvert).

Le facteur de lumière du jour est le rapport de l'éclairement horizontal mesuré à l'intérieur d'un local à celui mesuré simultanément à l'extérieur.

La fraction d'autonomie en éclairage (figure 16), qui découle du facteur de lumière du jour, est acceptable, sans plus. Un système d'éclairage naturel performant doit permettre une autonomie en éclairage de 50% sur une profondeur de local bien plus grande (jusqu'à 6 m), comme par exemple le système anidolique [8].

L'effet de la protection solaire intérieure a été mesuré par ciel serein (figure 17). La descente du store « SS-Rollo » a pour effet de diviser par environ 2 le facteur de lumière du jour dans toute la partie de la pièce non exposée directement au soleil. Ceci peut s'expliquer par le fait que les stores ne couvrent au maximum que la moitié supérieure des ouvertures. A proximité de la fenêtre, l'éclairage dû à la lumière directe est divisé par 10. On constate donc que ces stores offrent une protection solaire relativement satisfaisante en matière d'éblouissement. Les mesures de confort (chapitre 6) ainsi que d'autres mesures [9] montrent toutefois que cette protection est insuffisante sur le plan thermique.



Rmq: les stores baissés ne couvrent que la moitié des vitrages.

Figure 17: Éclairage horizontal intérieur avec et sans la protection contre l'éblouissement (Store « SS-Rollo »), mesuré par ciel serein (8.6.95, 11h40, éclairage horizontal extérieur de 80 klux).

8. Conclusion

Le but des locaux Denkraum était de créer un espace intéressant du point de vue énergétique et offrant un excellent confort thermique et visuel.

Malheureusement notre étude a été menée lorsque la façade était incomplète, à cause du retard considérable apporté dans la pose de l'aile photovoltaïque / brise-soleil.

Nous pensons que cela a certainement des conséquences importantes sur le confort thermique et visuel, mais affecte peu son comportement énergétique.

Le coefficient de transfert thermique moyen k_{moy} pour la façade est de $1,23 \text{ W/m}^2\text{K}$, qui est une valeur tout à fait courante pour les façades actuellement construites et qui ne protège donc pas davantage du climat extérieur. A titre de comparaison, nous remarquons que les deux façades du LESO les plus performantes thermiquement possèdent un k_{moy} inférieur à $1 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Le facteur d'utilisation des locaux Denkraum, déterminé expérimentalement se situe autour d'une valeur moyenne $F_u = 0,60$ ($g_{\text{faç}} = 0,18$) ce qui est faible, surtout si on le rapporte aux pertes qui se font à travers la façade.

Cette faible valeur est principalement due au fait que les locaux Denkraum possèdent une faible capacité d'accumulation de chaleur.

Un calcul de l'indice de dépense d'énergie de chauffage (IDE) montre que dans de telles conditions la consommation pour le chauffage se situerait autour de 110 MJ/m^2 . Les IDE pour les façades double-peau et HIT sont les deux inférieurs à 80 MJ/m^2 . Il faudrait un facteur d'utilisation de 0,71 pour que les locaux Denkraum aient un IDE semblable.

Le confort thermique des locaux est médiocre, essentiellement à cause des surchauffes fréquentes. Mais, il est essentiel de préciser que l'absence de protections solaires extérieures a certainement influencé très négativement le confort. De toute manière, un système à gains directs ne sera confortable durant une large fraction du temps que si la masse thermique intérieure est suffisante. Les usagers semblent par contre satisfaits en ce qui concerne le confort visuel.

Les considérations ci-dessus nous amènent à conclure que, tels qu'ils ont été exploités, les locaux Denkraum ne possèdent pas des avantages considérables par rapport à des locaux de bureaux conventionnels.

9. Références

- [1] Dossier systèmes, rapport technique
GRES - EPFL
Lausanne, 1985

- [2] Mesures d'échanges d'air entre les locaux et avec l'extérieur
R. Compagnon, J.-M. Fürbringer, M. Jakob
LESO-PB, EPFL
Lausanne, 1991

- [3] Rapport de synthèse
GRES - EPFL
Lausanne, 1985

- [4] LESOPULS Routine de calcul de la réponse thermique intérieure
J. van der Maas
Communication personnelle

- [5] Thermal Comfort
P. O. Fanger
Rober E. Krieger Publishing Company
Malabar, Florida, 1982

- [6] Norme SIA 180 « Isolation thermiques des bâtiments »
Société suisse des ingénieurs et architectes
Zurich, 1988

- [7] International Standard 7730 « Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort »
International Organization for Standardization, 1984

- [8] Projet DIANE - Modules d'éclairage naturel
J.-L. Scartezzini
Communication personnelle

- [9] Étude du confort thermique d'un bureau équipé de vitrages isolants munis de feuilles réfléchissantes AGERO
A. Faist, R. Compagnon
GRES - EPFL
Lausanne, 1987



Annexe 1: Appareils électriques des locaux DENKRAUM

Compteur force local 103

- Radiateur électrique : P = 1 kW
- Ordinateur MacIntosh Classic : P = 28 W
- Sondes de température de l'air ventilé : P = 2 x 3 W
- 2 stores OKASOLARE : P = 4 W

Compteur lumière local 103

- Néon Osram Lumilux CoolWhite : P = 2 x 58 W
- Néon Osram Lumilux WarmWhite : P = 2 x 58 W
- 2 ampoules Osram Dulux D/E : P = 2 x 13 W
- Interrupteur lumière : P = 2 W

Compteur force local 104

- Radiateur électrique : P = 1 kW
- Ordinateur MacIntosh IICx = P = 92 W
- Machine à écrire : P = 25 W
- Sondes de température de l'air ventilé : P = 2 x 3 W
- 4 stores OKASOLARE = P = 8

Compteur lumière local 104

- 2 néons Osram Lumilux CoolWrite P = 58 W
- 2 néons Osram Lumilux WarmWrite P = 58 W
- 4 ampoules Osram Dulux D/E P = 4 x 13 W
- Lampe de bureau P = 60 W
- Régulation lumière P = 80 - 110 W
(suivant si la coupole sur le toit est chauffée ou non)
- Interrupteur lumière P = 2 W

Annexe 2: Questionnaire pour l'estimation du confort ressenti par les occupants

FEUILLE DE CONFORT LE103

NOM: <i>LT7</i>	PRES.	ACTIVITE (1: travail à l'écran 2: autre)	CONFORT THERMIQUE (-3, ..., 0, ..., 3)	CONFORT OPTIQUE			Eblouissement de gêne (0, 1, 2)	STORE SUP. (0: levé, 1: abaissé)	STORE INF. (0: baissé, 1: élevé)	REMARQUES (asymétrie thermique, forme d'éclairage préférée, satisfaction, etc...)
				Niveau général d'éclairement (-1, 0, 1)	Eblouissement de voûte (0, 1, 2)	Eblouissement de gêne (0, 1, 2)				
lundi 8-10										
10-12										
12-14										
14-16										
16-18										
mardi 8-10	1	2	0	0	0	0	0	0		
10-12	1	2	0	1	1	1	1	1		
12-14	0									
14-16	0									
16-18	0									
mercredi 8-10	0									
10-12	1	2	-1	0	0	0	0	0		<i>un peu froid aux pieds</i>
12-14	1	1	0	0	0	0	0	0		
14-16	1	1	0	1	1	1	1	1		
16-18	1									
jeudi 8-10	1	2	0	0	0	0	0	0		
10-12	0									
12-14	1									
14-16	0									
16-18	1	2	0	0	0	0	0	0		
vendredi 8-10	1	2	0	0	0	0	0	0		
10-12	1	2	0	0	0	0	0	0		
12-14										
14-16										
16-18	1	2	0	0	0	0	0	0		
samedi										
dimanche										

pour définition des codes voir feuille annexe

Définition des codes pour la feuille de confort

Confort thermique

- 3 beaucoup trop froid
- 2 trop froid
- 1 un peu trop froid
- 0 bon
- 1 un peu trop chaud
- 2 trop chaud
- 3 beaucoup trop chaud

Confort optique

Niveau général d'éclairage

- 1 trop faible
- 0 bon
- 1 trop élevé

Éblouissement de voile:

(difficulté de visualisation des détails du plan de travail due aux reflets)

- 0 aucun
- 1 faible
- 2 fort

Éblouissement de gêne:

(éclairage trop élevé provenant du champ visuel entourant le plan de travail)

- 0 aucun
- 1 faible
- 2 fort



BILAN ENERGETIQUE LOCAUX DENKRAUM

DONNEES GENERALES

Période: février

Température extérieure moyenne:	3.2 °C	min.:	-4.3C	max.:	12.0 °C
Température DE moyenne:	22.2 °C	min.:	20.7C	max.:	26.5 °C
Température DW moyenne:	20.8 °C	min.:	16.7C	max.:	27.5 °C
ΔT cumulée DE:	460 DJ	ΔT cumulée DW:	430 DJ		
Rayonnement global vertical sud:	162 MJ/m2				

PERTES THERMIQUES

PERTES PAR CONDUCTION:

DE - EXTERIEUR =	295 MJ	DW - EXTERIEUR =	546 MJ
DE - 102 =	19 MJ	DW - 105 =	-6 MJ
DE - CORRIDOR =	21 MJ	DW - CORRIDOR =	9 MJ
DE - 003 =	36 MJ	DW - 003/4 =	42 MJ
DE - 203 =	21 MJ	DW - 203/4 =	-7 MJ
DE - DW =	16 MJ	DW - DE =	-16 MJ
TOTAL DE=	407 MJ	TOTAL DW =	568 MJ
TOTAL =	976 MJ		

PERTES PAR VENTILATION:

DE - EXTERIEUR =	98 MJ	DW - EXTERIEUR =	285 MJ
DE - LOCAUX ADJACENTS =	1 MJ	DW - LOCAUX ADJACENTS =	0 MJ
DE - CAGE ESCALIERS =	3 MJ	DW - CAGE ESCALIERS =	2 MJ
TOTAL =	389 MJ		

TOTAL PERTES THERMIQUES = 1365 MJ

GAINS THERMIQUES

GAINS INTERNES:

GINT DE =	33 MJ	GINT DW =	161 MJ
TOTAL =	195 MJ		

GAINS SOLAIRES BRUTS:

GSOL DE=	321 MJ	GSOL DW =	642 MJ
TOTAL =	963 MJ		

GAINS THERMIQUES BRUTS = 1158 MJ

DEPENSES ENERGETIQUES

FORCE DE =	398 MJ	FORCE DW =	404 MJ
LUMIERE DE =	11 MJ	LUMIERE DW =	116 MJ
TOTAL DE =	409 MJ	TOTAL DW=	520 MJ
TOTAL FORCE =	803		
TOTAL LUMIERE =	126		
TOTAL DEPENSES =	929 MJ		

DEPERDITIONS THERMIQUES = 1365 MJ

CHAUFFAGE = 803 MJ

FACTEUR D'UTILISATION DES GAINS = 0.44

GAINS THERMIQUES NETS = 563 MJ

BILAN ENERGETIQUE LOCAUX DENKRAUM

DONNEES GENERALES

Période: mars

Température extérieure moyenne:	9.7 °C	min.:	1.0C	max.:	21.1 °C
Température DE moyenne:	22.7 °C	min.:	19.4C	max.:	40.6 °C
Température DW moyenne:	22.3 °C	min.:	18.8C	max.:	41.0 °C
ΔT cumulée DE:	557 DJ	ΔT cumulée DW:	546 DJ		
Rayonnement global vertical sud:	330 MJ/m2				

PERTES THERMIQUES

PERTES PAR CONDUCTION:

DE - EXTERIEUR =	237 MJ	DW - EXTERIEUR =	459 MJ
DE - 102 =	26 MJ	DW - 105 =	12 MJ
DE - CORRIDOR =	14 MJ	DW - CORRIDOR =	17 MJ
DE - 003 =	41 MJ	DW - 003/4 =	64 MJ
DE - 203 =	4 MJ	DW - 203/4 =	-11 MJ
DE - DW =	6 MJ	DW - DE =	-6 MJ
TOTAL DE=	329 MJ	TOTAL DW =	535 MJ
TOTAL =	863 MJ		

PERTES PAR VENTILATION:

DE - EXTERIEUR =	79 MJ	DW - EXTERIEUR =	239 MJ
DE - LOCAUX ADJACENTS =	2 MJ	DW - LOCAUX ADJACENTS =	1 MJ
DE - CAGE ESCALIERS =	2 MJ	DW - CAGE ESCALIERS =	4 MJ
TOTAL =	327 MJ		

TOTAL PERTES THERMIQUES = 1190 MJ

GAINS THERMIQUES

GAINS INTERNES:

GINT DE =	58 MJ	GINT DW =	130 MJ
TOTAL =	188 MJ		

GAINS SOLAIRES BRUTS:

GSOL DE=	654 MJ	GSOL DW =	1308 MJ
TOTAL =	1961 MJ		

GAINS THERMIQUES BRUTS = 2149 MJ

DEPENSES ENERGETIQUES

FORCE DE =	94 MJ	FORCE DW =	37 MJ
LUMIERE DE =	13 MJ	LUMIERE DW =	82 MJ
TOTAL DE =	107 MJ	TOTAL DW=	119 MJ

TOTAL FORCE =	131		
TOTAL LUMIERE =	94		
TOTAL DEPENSES =	226 MJ		

DEPERDITIONS THERMIQUES = 1190 MJ

CHAUFFAGE = 131 MJ

FACTEUR D'UTILISATION DES GAINS = 0.47

GAINS THERMIQUES NETS = 1059 MJ

