



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

La façade double-peau

Préface

Chapitre 1 Introduction

Chapitre 2 Typologie

Chapitre 3 Principe de fonctionnement

Chapitre 4 Propriétés et considérations pratiques

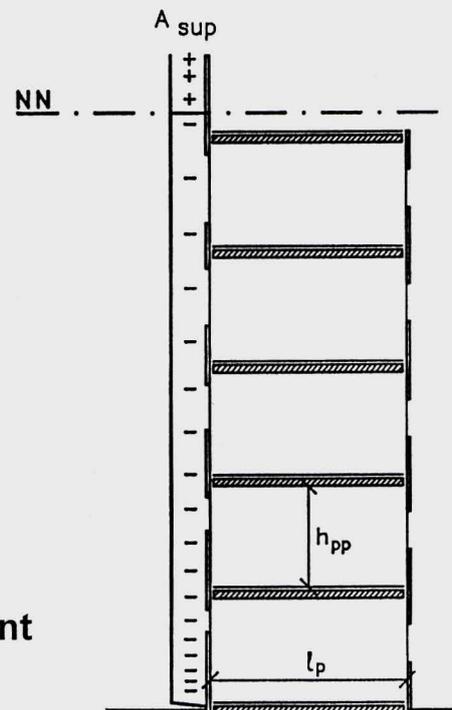


Table des matières

Préface	1
1. Introduction	3
2. Typologie	5
2.1 Typologie en coupe	5
2.2 Typologie en élévation	7
3. Principe de fonctionnement	11
3.1 Double-peau contre façade étanche	11
3.2 Ventilation des locaux à travers la double-peau	13
3.2.1 Double-peau assurant la ventilation des locaux	14
Façade ombragée	
Façade uniformément ensoleillée	
3.2.2 Un modèle thermodynamique de la façade double-peau	18
3.3 Bilan thermique	18
3.3.1 De nuit (absence de rayonnement solaire)	18
3.3.2 De jour	18
4. Propriétés et considérations pratiques	19
4.1 Double-peau contre façade étanche	20
4.2 Recommandations : Double-peau contre façade étanche	24
4.3 Double-peau assurant la ventilation des locaux	29
4.4 Recommandations : Double-peau assurant la ventilation des locaux	31
4.5 Bibliographie	41
4.5.1 Compte-rendus de conférences	41
4.5.2 Revues	41
4.5.3 Etudes et rapports	42
4.5.4 Livres	42

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

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_{jin}
A_H	Ouverture géométrique supérieure du canal	m^2/m_{jin}
A_B	Ouverture géométrique inférieure du canal	m^2/m_{jin}
A_{sup}	Ouverture effective supérieure du canal	m^2/m_{jin}
A_{inf}	Ouverture effective inférieure du canal	m^2/m_{jin}
$C_{d,H}$	Coefficient de décharge de l'ouverture supérieure	-
$C_{d,B}$	Coefficient de décharge de l'ouverture inférieure	-
D_G	Débit d'air	$m^3/h.m_{jin}$
g	Accélérateur de la pesanteur	m/s^2
G	Intensité solaire incidente sur la façade	$W/m.m_{jin}$
G_{air}	Intensité transmise à l'air	$W/m.m_{jin}$
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

Préface

Le présent rapport 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.

Finalement des rapports concernant les aspects relatifs à la lumière naturelle et à l'acoustique ont été établis sous la responsabilité des Professeurs J.-L. Scartezzini (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.

1. Introduction

De nombreuses façades double-peau sont actuellement construites ou projetées tant sur des bâtiments neufs que sur des bâtiments existants. Bien conçue, la façade double-peau ("double-skin façade" en anglais ou Doppelwand-Fassade en allemand) peut présenter un ensemble de qualités intéressantes : isolation thermique, protection estivale, confort thermique et visuel, isolation phonique. Sa conception demande toutefois la maîtrise architecturale et constructive d'un très grand nombre d'éléments et de facteurs dont les nombreuses interactions ne sont pas aisément dominées (Tableau 1.1).

Le présent projet¹ entend étudier l'influence des divers paramètres architecturaux et constructifs et mettre en évidence leurs interactions, afin de dégager un certain nombre de règles propres à guider le concepteur vers des ensembles de solutions optimales du point de vue technique et compatibles avec les exigences de nature architecturale.

Élément ou facteur d'influence	Bilan énergétique		Confort thermique		Lumière naturelle Confort visuel	Bruit Confort acoustique	Ventilation naturelle des locaux
	Saison froide	Saison chaude	Saison froide	Saison chaude			
Nature de l'écran vitré (peau extérieure)	-	-	-	-	X X	X	-
Nature des vitrages de façade (peau intérieure)	X X	X X	X X	X X	X X	X	-
Distance écran-façade	X	X X	X	X X	X	X	X
Hauteur du canal	X	X X	X	X X	-	-	X X
Taux de vitrage de la façade (peau intérieure)	X	X X	X	X X	XX	X	-
Protections solaires	X	X X	X	X X	X X	-	-
Ventilation de la double-peau	X	X X	X	X X	-	X	X X

Tableau 1.1 : Influence de divers éléments et facteurs sur les performances d'une façade double-peau. On notera que les influences sont en général plus fréquentes et marquées en saison chaude qu'en saison froide.

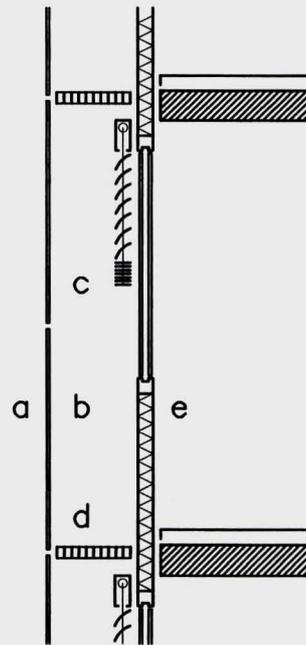
¹ Les travaux de M. J. Holmes [2], [3] et [4] sont à l'origine du présent travail.

2. Typologie

Une façade double-peau se compose de l'extérieur vers l'intérieur (Fig. 2.1).

- d'un écran vitré (extérieur)
- d'un espace formant le canal
- de la façade (intérieure).

Figure 2.1 : Façade double-peau
a Ecran
b Canal
c Protection solaire
d Caillebotis
e Façade intérieure



L'*écran* est généralement constitué d'une lame de verre simple, montée sans cadre.

Le *canal* possède une largeur comprise entre 50 et 600 mm. Sa hauteur est au minimum d'un étage, mais plus généralement de 3 étages ou davantage. Des ouvertures réglables sont disposées en haut et/ou en bas du canal.

Les *protections solaires* sont généralement placées dans le canal, côté écran ou côté façade. Lorsque le canal est de profondeur suffisante, un caillebotis permet le nettoyage et l'entretien des éléments fixes et mobiles.

La *façade intérieure* est fortement vitrée, elle peut être munie d'un contre-cœur opaque.

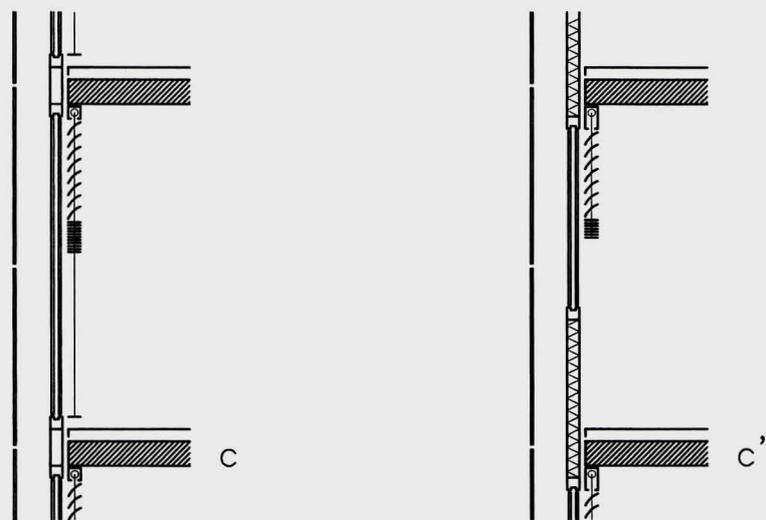
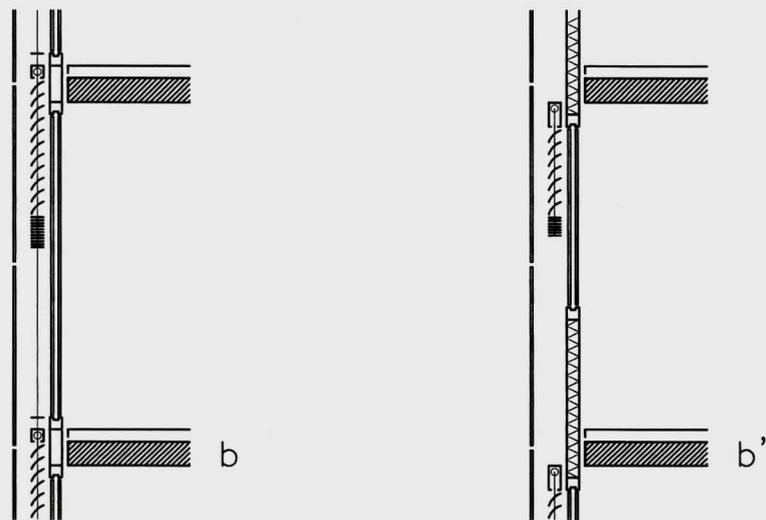
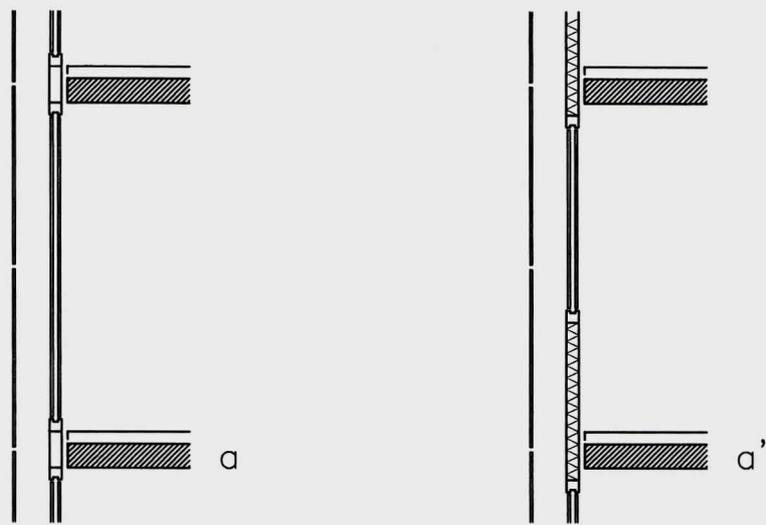
Un recensement des façades double-peau construites et projetées permet de dégager les typologies suivantes.

2.1 Typologie en coupe

Les variantes concernent d'une part la composition de la façade (protection solaire, contre-cœur, Fig. 2.2) et d'autre part le principe de ventilation du canal de la double-peau et des locaux attenants (Fig. 2.3). Le plus souvent, la protection solaire se situe dans le canal de la double-peau et la façade intérieure ne comporte pas de contre-cœur [5].

Lorsque la double-peau est fractionnée par la dalle d'étage, la ventilation se fait à travers la double-peau, étage par étage [6].

(Figure 2.3, variante a). Lorsque le canal s'étend sur plusieurs étages, la ventilation des locaux peut se concevoir par la double-peau (entrée et sortie de l'air, variante b) ou traversante (entrée par le bâtiment, sortie par le canal, variante c).



sans

avec contre-cœur opaque

Figure 2.2 : Façades double-peau – Typologie en coupe verticale
 a, a' sans protection solaire (très défavorable)
 b, b' protection solaire dans le canal de la double-peau
 c, c' protection solaire à l'intérieur des locaux (préjudiciable au confort en saison chaude).

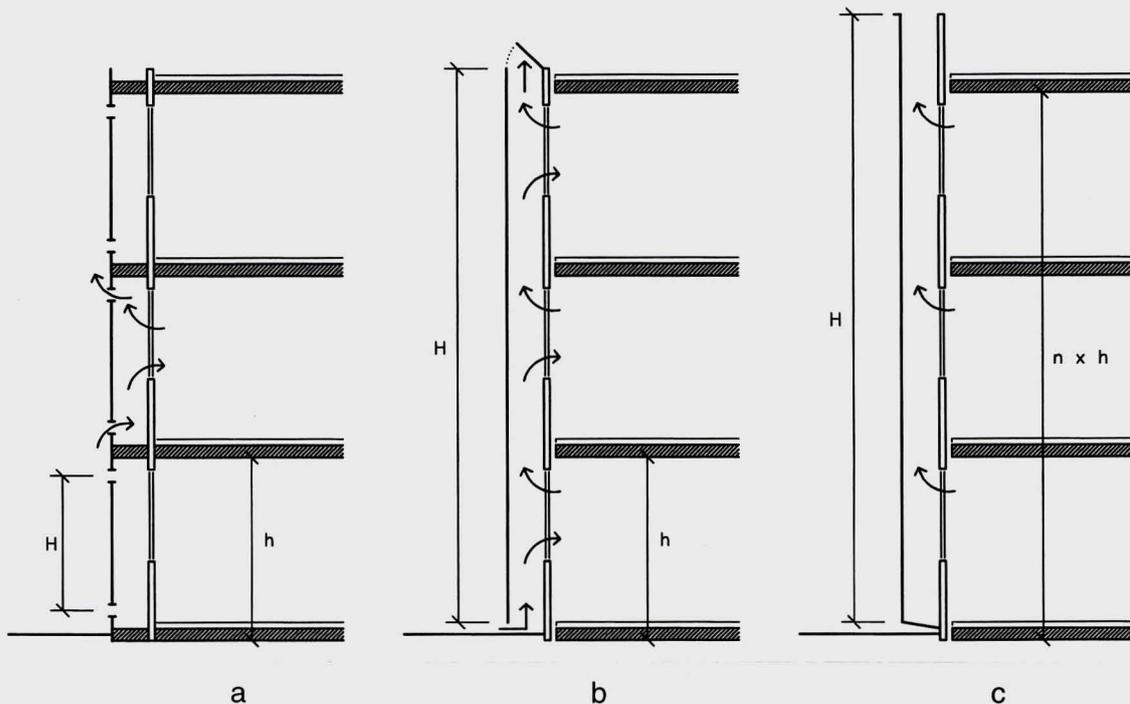


Figure 2.3 : Canal de la double-peau – Typologie en coupe verticale
 a) $H < h$ Le canal est fractionné par les dalles d'étage
 b) $H > h$ Le canal s'étend sur plusieurs étages
 c) $H > n \cdot h$ Le canal dépasse le dernier étage

2.2 Typologie en élévation

Le choix d'une typologie en élévation concerne plus spécialement le mode de ventilation du canal de la double-peau et des locaux adjacents.

Lorsque la hauteur de tirage est limitée à la hauteur d'un étage, il y a toujours le risque de voir l'air chaud qui sort d'un étage entrer par la bouche "d'air frais" de l'étage suivant. On limite ce danger soit en séparant verticalement les entrées et sorties (Fig. 2.4 a) soit en optant pour une ventilation *en diagonale* par décalage des entrées et sorties (Fig. 2.4 b). Dans les deux cas, la ventilation des locaux peut se faire en ouvrant les fenêtres donnant dans la double-peau.

La ventilation du canal de la double-peau est fortement augmentée lorsque le canal court librement sur plusieurs niveaux. Dans l'exécution la plus simple (Fig. 2.5 a), un clapet en position supérieure permet de fermer le canal en saison froide. En présence de soleil, l'air s'échauffe graduellement et les conditions de ventilation des locaux par le canal varient fortement d'étage en étage. Afin d'éviter ce défaut, tout en profitant pour chaque étage de la hauteur totale de tirage (Fig. 2.5 b), on peut différencier l'entrée d'air frais de la sortie d'air vicié par une ventilation en diagonale à chaque étage. En planifiant une ventilation traversante des locaux et en surélevant le canal de la double-peau (fermé à sa base), il est également possible d'assurer des conditions de confort équivalentes à tous les étages (Fig. 2.5 c).

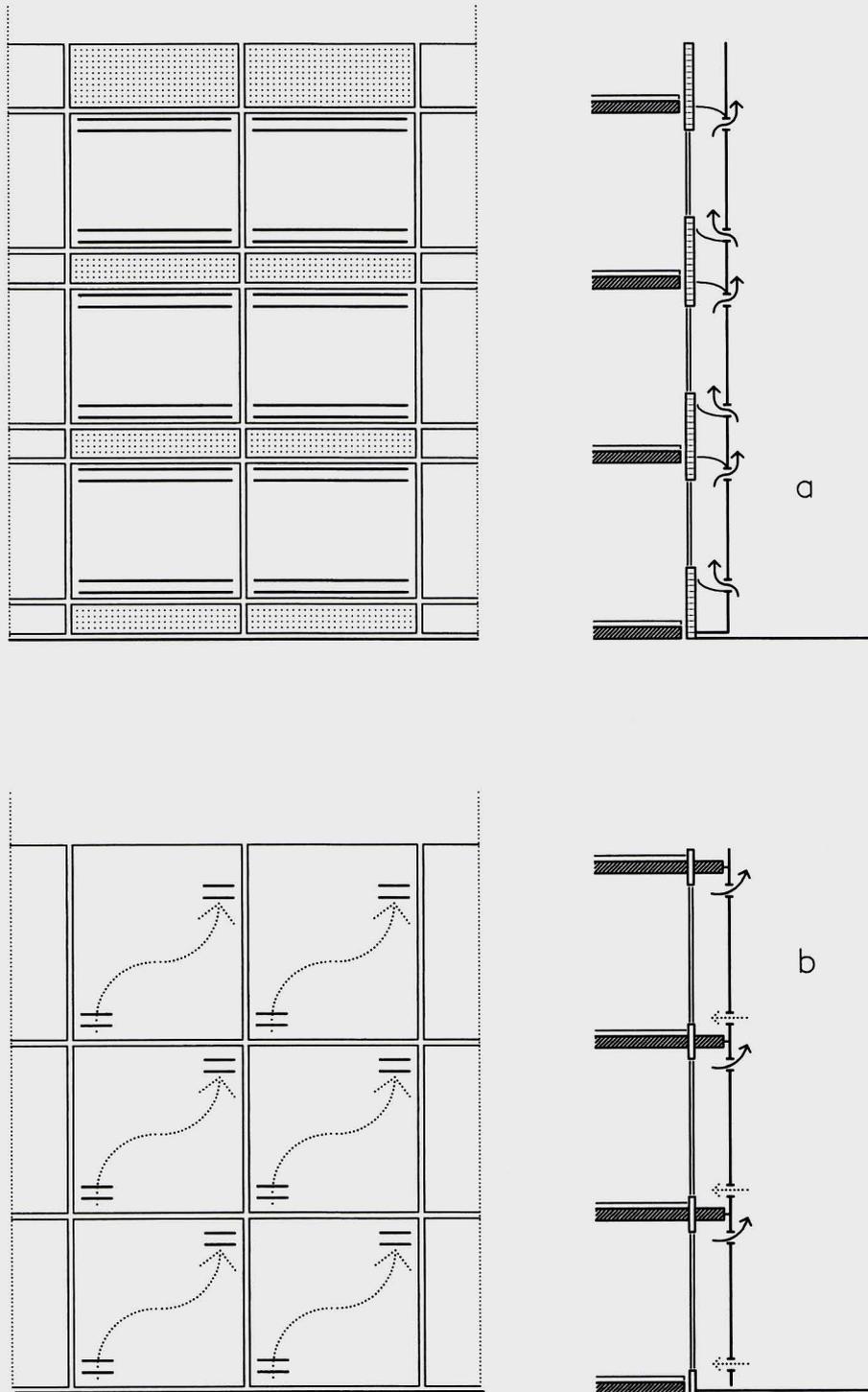


Figure 2.4 : Typologie en élévation

Ventilation de la double-peau étage par étage

- a) Lorsque l'entrée d'air à un étage est suffisamment séparée de la sortie de l'air à l'étage précédent, entrées et sorties peuvent être superposées.
- b) En décalant entrées et sorties d'air en diagonale, on évite le "court-circuit" entre entrée et sortie de l'air.

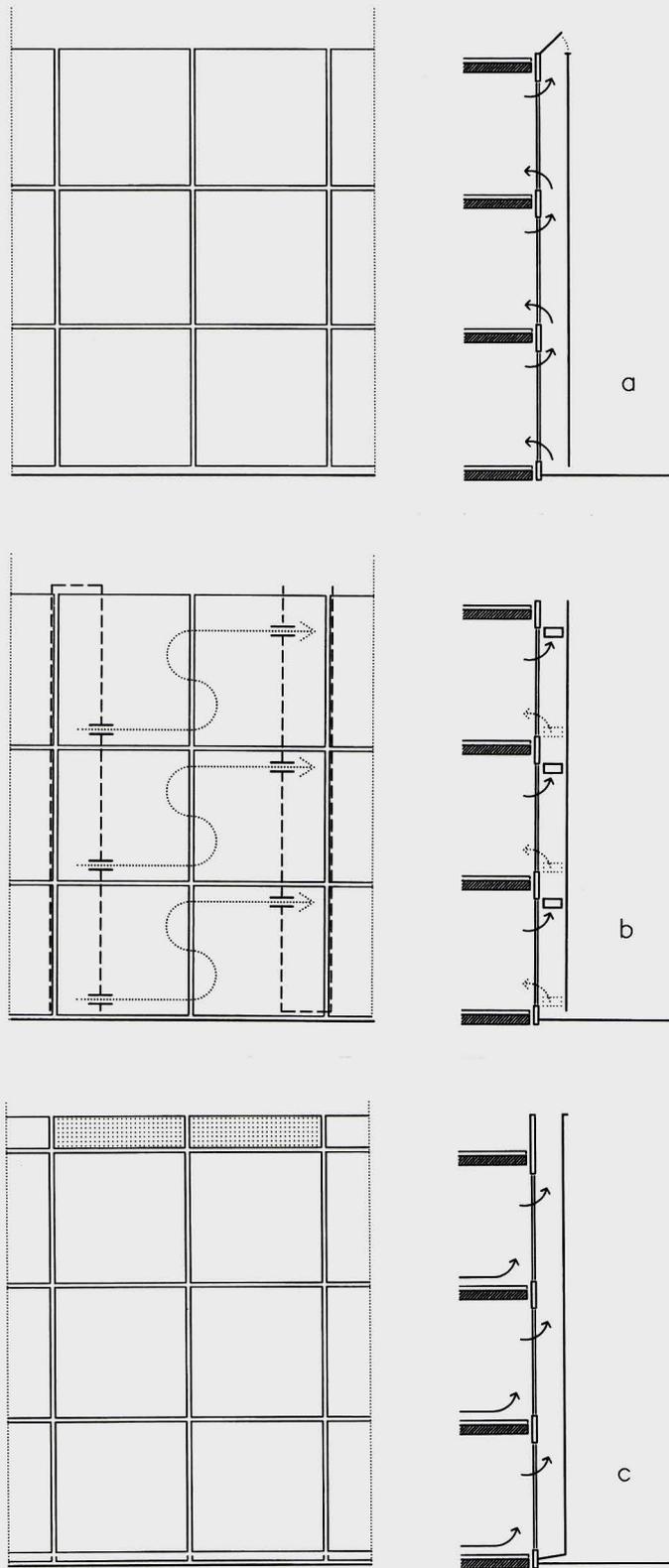


Figure 2.5 : Typologie en élévation. Ventilation de la double-peau sur plusieurs étages.

- Dans la disposition la plus simple, un clapet permet de fermer le canal à son sommet. La température de l'air dans le canal augmente d'étage en étage.
- Afin d'offrir des conditions de température semblables aux étages successifs, l'air frais vient du canal de gauche (ouvert à sa base) et l'air vicié s'échappe par le canal de droite (fermé à sa base).
- La ventilation des locaux est traversante, le tirage du canal de la double-peau est assuré principalement par l'échauffement de l'air dans sa partie supérieure qui dépasse l'ouverture du dernier étage.

3. Principe de fonctionnement

Quel que soit le type de double-peau étudié, son fonctionnement repose toujours sur le même principe : l'effet de cheminée. Une colonne d'air chaud (de faible densité) est entourée d'air plus froid (donc de plus forte densité). Il en résulte une poussée (dite d'Archimède) qui met l'air en mouvement. Considérons tout d'abord le cas le plus simple : toutes les fenêtres qui donnent dans le canal de la double-peau restent fermées [3].

3.1 Double-peau contre façade étanche

La façade double-peau délimite un canal de profondeur d , de hauteur H et de sections d'entrée A_{inf} et de sortie A_{sup} généralement exprimées en m^2 par mètre linéaire de façade. L'air pénètre à la base du canal à la température T_B et sort après réchauffement (par la façade elle-même ou par l'action du soleil) à la température T_H .

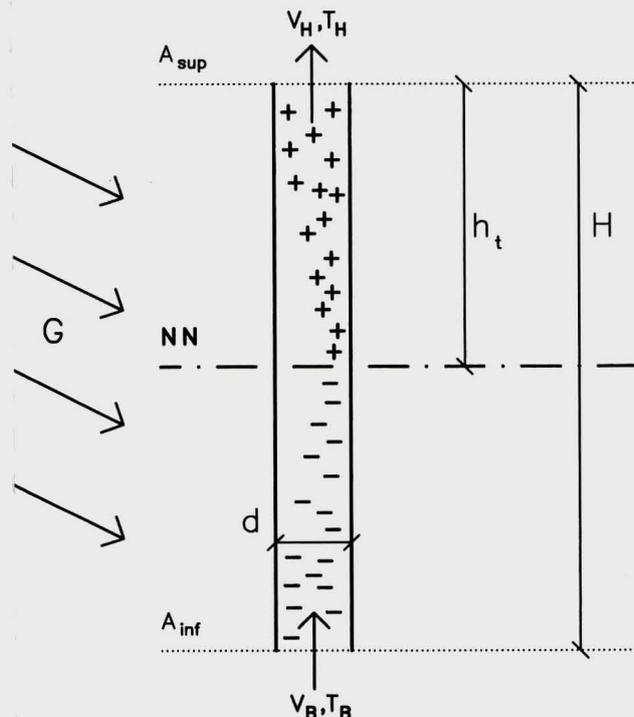


Figure 3.1.1 : Principe de la double-peau
 - - - zone de dépression
 + + + zone de surpression
 NN niveau neutre

On observe une dépression à la base du canal et une surpression en partie supérieure (Fig. 3.1.1). Il existe par conséquent à la hauteur h_t du sommet une zone dite "niveau neutre" pour laquelle la pression dans le canal est exactement égale à la pression extérieure [7]. En appliquant au mouvement de l'air dans le canal de la double-peau la loi de la conservation de l'énergie (Loi de Bernoulli) et en tenant compte de la conservation du flux d'air à travers les ouvertures A_B et A_H , on peut obtenir la position du niveau neutre par rapport à l'ouverture supérieure du canal [8].

On trouvera la justification détaillée des équations 1 à 12 au chapitre 6 Principes physiques.

$$h_t = \frac{H}{1 + (T_B / T_H) \left(\frac{A_{\text{sup}}}{A_{\text{inf}}} \right)^2} \quad (1)$$

T_B température (absolue) à la base du canal
 T_H température (absolue) au sommet du canal

$A_{\text{sup}} = C_{d, H} \cdot A_H$; $A_{\text{inf}} = C_{d, B} \cdot A_B$

où A_H et A_B sont les ouvertures géométriques et $C_{d, H}$ et $C_{d, B}$ les coefficients de décharge respectifs.

h_t position du niveau neutre par rapport à l'ouverture supérieure du canal.

Alors que la partie supérieure du canal est en surpression, toute la partie située en dessous du niveau neutre est en dépression. En choisissant $A_{\text{sup}} < A_{\text{inf}}$, le niveau neutre descend créant une zone de surpression importante, alors qu'en choisissant $A_{\text{sup}} > A_{\text{inf}}$ le niveau neutre monte au profit de la zone de dépression.

Le débit d'air qui traverse le canal de la double-peau évacue la chaleur transmise à l'air dont l'élévation de température est donnée par la relation

$$\Delta T^3 = \left(\frac{G_{\text{air}} \cdot H}{\rho c_p} \right)^2 \frac{T_B}{g \cdot H} \frac{1}{A^2} \quad (2)$$

$G_{\text{air}} \cdot H$ puissance totale transmise à l'air ($P_{\text{air}} = G_{\text{air}} \cdot H$) [W/m_{lin}]
 (par mètre courant de façade)

$\rho \cdot c_p$ capacité thermique volumique de l'air ~1200 [J/m³K]

g accélération de la pesanteur 9.81 [m/s²]

H hauteur du canal [m]

A section effective totale telle que [m²]

$$\frac{1}{A^2} = \frac{1}{A_{\text{sup}}^2} + \frac{1}{A_{\text{inf}}^2}$$

Cette relation montre que l'augmentation de la température de l'air dans le canal de la double-peau ne dépend que faiblement de la puissance transmise à l'air (cf tableau 3.1.2, ΔT prop. à $(P_{\text{air}})^{2/3}$).

Le débit D à travers les ouvertures se calcule par la relation

$$D = \frac{3600}{\rho c_p} \frac{G_{\text{air}} H}{\Delta T} \cong 3 \frac{G_{\text{air}} H}{\Delta T} = 3 \frac{P_{\text{air}}}{\Delta T} \quad [\text{m}^3/\text{hm}_{\text{lin}}] \quad (3)$$

La vitesse débitante de l'air s'obtient simplement en divisant le débit par la section correspondante

$$v_H = D/A_H \quad ; \quad v_B = D/A_B \quad (4)$$

L'exemple ci-après montre que lorsque la puissance fournie à l'air est multipliée par huit, l'échauffement de l'air n'est que multiplié par quatre et la vitesse par deux.

G_{air} [W/m . m _{lin}]	P_{air} [W/m . m _{lin}]	ΔT [K]	D [m ³ /h . m _{lin}]	V_{Base} [m/s]	$\Delta T / P_{air}$ [K/kW]
50	500	2,2	682	0,76	4,4
100	1000	3,5	857	0,95	3,5
200	2000	5,5	1091	1,2	2,8
400	4000	8,8	1364	1,5	2,2

Tableau 3.1.2 : Double-peau contre façade étanche.
Débit, vitesse et échauffement de l'air en fonction de la puissance transmise à l'air ($H = 10$ m, $T_B = 300$ K, $A_H/A_B = 0,5/0,25$ m²/m_{lin}).

3.2 Ventilation des locaux à travers la double-peau

Nous avons vu précédemment (équation 1) que la position du niveau neutre dépend essentiellement des dimensions relatives des ouvertures inférieure et supérieure du canal. Si ces dernières sont égales, le niveau neutre est à mi-hauteur. Par une petite ouverture pratiquée dans la façade en dessous du niveau neutre, l'air va passer du bâtiment au canal (air extrait du bâtiment) alors que l'inverse se produit au-dessus du niveau neutre. La mise en surpression (ou en dépression) du bâtiment par rapport à l'extérieur changerait cette situation dans un sens ou dans l'autre.

En se référant aux typologies illustrées en figure 2.5, on voit que dans les configurations 2.5a) et 2.5b) les locaux doivent être étanches par rapport au reste du bâtiment (portes fermées) : sauf à la hauteur du niveau neutre, il y a toujours dépression (étages inférieurs) ou surpression (étages supérieurs) par rapport à la pression extérieure. L'ouverture des portes sur le couloir perturberait par conséquent la circulation de l'air dans le local et éventuellement dans le canal de la double-peau.

A condition d'être correctement réalisée, la configuration 2.5c) peut quant à elle fonctionner de manière satisfaisante et offrir un confort équivalent aux différents étages.

3.2.1 Double-peau assurant la ventilation des locaux

Lorsqu'on désire utiliser l'effet de cheminée de la double-peau pour assurer la ventilation des locaux (en mode d'extraction), plusieurs conditions sont à respecter [9]

- il faut, pour que l'ensemble des étages se trouve dans la zone de dépression du canal que le niveau neutre se situe au-dessus de l'ouverture (en façade) de l'étage supérieur,
- il faut que l'ouverture supérieure du canal de la double-peau ($A_{sup} = A_H \cdot c_d$) soit à même d'évacuer tout l'air extrait des différents étages,
- finalement, il faut, afin d'assurer un renouvellement d'air égal des étages, équilibrer le circuit aéraulique entre ceux-ci et minimiser les interactions entre étages en ce qui concerne les mouvements d'air.

Considérons une construction de N étages dont une des faces est en contact avec l'extérieur alors que l'autre face donne sur le canal d'une double-peau. On désire ventiler les locaux avec un taux de renouvellement d'air n en utilisant l'effet de cheminée de la double-peau comme "moteur" de cette ventilation naturelle.

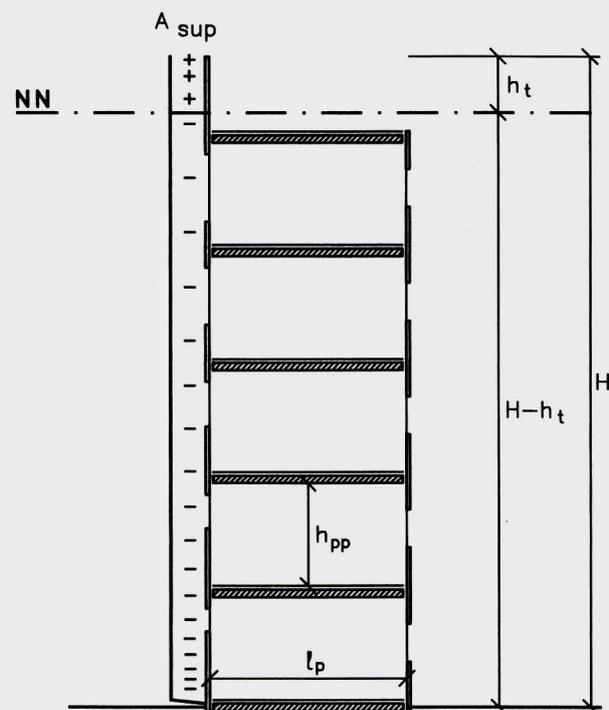


Figure 3.2.1 : Double-peau assurant la ventilation des locaux

Les caractéristiques dimensionnelles sont les suivantes :

H	Hauteur totale de la double-peau	[m]
h_t	Distance séparant le niveau neutre NN du sommet du canal	[m]
N	Nombre d'étages	
h_{pp}	Distance plancher-plafond	[m]
l_p	Profondeur des locaux	[m]
n	Taux de renouvellement d'air frais	[1/h]
A_H	Ouverture géométrique du sommet du canal (par mètre courant de façade)	[m ² /m _{lin}]
D	Débit d'air (par mètre courant de façade)	[m ³ /s . m _{lin}]
\bar{V}_H	Vitesse moyenne de l'air dans l'ouverture supérieure	[m/s]

Façade ombragée

En site urbain, il se peut que seule la partie supérieure (de hauteur h_t) soit ensoleillée. Dans ces conditions, le "moteur" de la ventilation est la puissance transmise à l'air sur la hauteur h_t :

$$P_{\text{air}} = G_{\text{air}} \cdot h_t \quad [\text{W/m}_{\text{lin}}] \quad (5)$$

Pour ventiler l'ensemble des locaux avec un taux de renouvellement d'air (frais) n , il faut un débit D

$$D = \frac{n}{3600} (N \cdot l_p \cdot h_{pp}) \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (6)$$

Pour que ce débit soit évacué par le canal de la double-peau, l'ouverture supérieure A_{sup} doit être de section suffisante, c'est-à-dire

$$A_{\text{sup}} \geq D^{3/2} \frac{1}{h_t} \sqrt{\frac{\rho c_p \cdot T_{\text{entrée}}}{g \cdot G_{\text{air}}}} \quad [\text{m}^2/\text{m}_{\text{lin}}] \quad (7)$$

$$(\text{ avec } A_{\text{sup}} = A_H \cdot c_d \text{ et } g = 9,81 \text{ m/s}^2)$$

$T_{\text{entrée}}$ est la température (absolue) de l'air en provenance des locaux.

Si au contraire, la section du canal de la double-peau est imposée, alors le nombre d'étages N qu'il est possible de ventiler est donné par la relation

$$N \leq \frac{3600}{n \cdot l_p \cdot h_{pp}} (A_{\text{sup}} \cdot h_t)^{2/3} \left(\frac{g \cdot G_{\text{air}}}{\rho c_p \cdot T_{\text{entrée}}} \right)^{1/3} \quad (8)$$

Les expressions (7) et (8) sont avantageusement transcrites graphiquement sur une abaque (Abaques 4.4.1 ou 4.4.2). L'échauffement de l'air (dans la partie supérieure du canal) se calcule comme suit

$$\Delta T = \frac{P_{\text{air}}}{\rho c_p \cdot D}$$

$$\Delta T \cong 3 \frac{P_{\text{air}}}{n (N \cdot l_p \cdot h_{pp})} \quad [\text{K}] \quad (9)$$

L'abaque 4.4.5 permet d'évaluer ΔT graphiquement.

Le tableau 3.2.2 illustre le cas d'un immeuble ombragé ventilé par la double-peau et pour lequel un taux de renouvellement d'air de 6 est requis (situation estivale).

G_{air} [W/m ² m _{lin}]	$N \leq$	N_{max}	H [m]	$\Delta T \geq$ [K]	P_{air} [W/m _{lin}]	$P/\Delta T$ [W/K . m _{lin}]
100	3.76	3	11.9	1.5	200	133
200	4.74	4	15.2	2.3	400	178
300	5.42	5	18.5	2.7	600	222
400	5.97	6	21.8	3.0	800	267

Tableau 3.2.2 : Immeuble ombragé ventilé au travers du canal d'une double-peau
 Hauteur ensoleillée $h_t = 2$ m, Taux de renouvellement d'air $n = 6$ h⁻¹
 Hauteur d'étage $h_{pp} = 2,8$, profondeur $l_p = 8$ m
 Ouverture supérieure effective $A_{sup} = 0,6 \cdot 0,84 = 0,5$ m²/m_{lin}
 Le tableau ci-dessus donne le nombre maximum d'étages, la hauteur totale du canal double-peau ainsi que l'échauffement de l'air. On constate (dernière colonne) que la puissance thermique évacuée rapportée à l'échauffement correspondant de l'air augmente avec la puissance transmise à l'air.

Façade uniformément ensoleillée

En site découvert, il se peut que toute la façade double-peau soit ensoleillée et qu'une intensité G_{air} soit transmise à l'air uniformément sur toute la hauteur du canal double-peau. Les expressions établies précédemment restent valables à condition de tenir compte du fait que

$$P_{air} = G_{air} (h_t + N \cdot h_{étage}) = G_{air} \cdot H \quad (10)$$

Le nombre d'étages que l'on peut ventiler est maintenant donné par

$$N \leq \left(\frac{3600}{n \cdot l_p \cdot h_{pp}} \right)^{3/2} (A_{sup} \cdot h_t) \sqrt{\frac{G_{air} \cdot g \cdot h_{étage}}{\rho c_p \cdot T_{en} \cdot h_t} + \frac{1}{2} \frac{h_t}{h_{étage}}} \quad (11)$$

et l'échauffement de l'air du canal

$$\Delta T \geq 3 \frac{G_{air} \cdot H}{n (N \cdot l_p \cdot h_{pp})} \quad (12)$$

En reprenant l'exemple de l'immeuble du paragraphe précédent (Tableau 3.2.2) mais situé cette fois en plein soleil (Tableaux 3.2.3 et 3.2.4), on remarquera l'important accroissement du nombre d'étages qu'il est théoriquement possible de ventiler par la double-peau selon que l'immeuble est ombragé ou non. L'élévation de la température de l'air limite toutefois rapidement les possibilités réelles.

G_{air} [W/m ²]	$N \leq$	N_{max}	H [m]	$\Delta T \geq$ [K]	P_{air} [W/m _{lin}]	$P/\Delta T$ [W/K . m _{lin}]
100	7,25	7	25,1	8	2510	310
200	10,1	10	35	17	7000	419
300	12,3	12	41,6	23	12480	533
400	14,2	14	48,2	31	19280	622

Tableau 3.2.3 : Immeuble ventilé au travers du canal double-peau. Pas d'ombrage
Hauteur d'étage : 3,3 m. Autres données cf. immeuble ombragé.
Le nombre d'étages qu'il est possible de ventiler par la double-peau est fortement limité par l'échauffement de l'air. La puissance thermique transmise à l'air est de l'ordre du quart à la moitié de la puissance solaire incidente.

G_{air} [W/m ²]	$N \leq$	N_{max}	H [m]	$\Delta T \geq$ [K]	P_{air} [W/m _{lin}]	$P/\Delta T$ [W/K . m _{lin}]
100	12,0	12	42,9	8	4290	536
200	16,7	16	56,1	16	11220	719
300	20,4	20	69,3	23	20790	896
400	23,4	23	79,2	31	31680	1029

Tableau 3.2.4 : Immeuble ventilé au travers du canal double-peau. Pas d'ombrage.
Mêmes données que celles relatives au tableau précédent sauf $h_t = 3,3$ m.
On notera l'amélioration des performances du système qui découle de l'augmentation de la distance h_t qui sépare le niveau neutre du sommet du canal.

3.2.2 Un modèle thermodynamique de la façade double-peau

La façade double-peau est un moteur thermique qui fonctionne entre les températures intérieure et extérieure du canal. En réécrivant l'équation (8) sous la forme suivante

$$(8) \quad \frac{n \cdot N \cdot I_p \cdot h_{pp}}{3600} \leq (A_{\text{sup}} \cdot h_t)^{2/3} \left(\frac{g \cdot G_{\text{air}}}{\rho c_p \cdot T_{\text{entrée}}} \right)^{1/3}$$

on trouve dans le membre de gauche le débit d'air que la double-peau est capable d'extraire du bâtiment, alors que dans le membre de droite, le produit ($A_{\text{sup}} \cdot h_t$) qui représente le volume d'air chauffé par le soleil est multiplié par le terme ($g \cdot G_{\text{air}} / \rho c_p \cdot T_{\text{entrée}}$) qui contient l'intensité G_{air} transmise à l'air. La signification de (8) est donc la suivante

$$\left(\begin{array}{c} \text{capacité de ventilation} \\ \text{de la double-peau} \end{array} \right) \sim \left(\begin{array}{c} \text{volume d'air} \\ \text{chauffé} \end{array} \right) * \left(\begin{array}{c} \text{puissance de} \\ \text{chauffage} \end{array} \right)$$

ou pour se rattacher à un modèle familier

$$\text{Travail mécanique} \sim (\text{cylindrée}) * (\text{pédale des gaz})$$

3.3 Bilan thermique

On distinguera la situation nocturne (absence de rayonnement solaire) de la situation diurne.

3.3.1 De nuit (absence de rayonnement solaire)

La façade intérieure (en principe plus chaude que l'air extérieur) perd de l'énergie par rayonnement ainsi que par conduction et convection.

La peau intérieure vitrée diminue le rayonnement vers le ciel clair (cf. 4.1 ou 4.3). Les pertes par convection concernent principalement les échanges avec l'air du canal de la double-peau qui "lèche" la façade intérieure dans son mouvement ascendant et emporte un peu moins de la moitié de l'énergie. L'effet de protection de la peau intérieure est d'autant meilleur que l'isolation de la peau intérieure est plus poussée.

3.3.2 De jour

Le rayonnement solaire (direct ou diffus) est partiellement absorbé par les vitrages (peau extérieure et façade intérieure), par les structures ainsi que par les stores situés dans le canal de la double-peau (lorsque ceux-ci sont baissés). Il en résulte d'une part un *effet de serre* qui tend à élever la température des locaux et d'autre part un *échauffement de l'air* du canal de la double-peau, échauffement qui est le moteur de l'effet de cheminée. Ces effets sont bénéfiques en saison froide. Ils peuvent devenir très gênants en saison chaude, spécialement en orientation Ouest.

4. Propriétés et considérations pratiques

Le chapitre 3 était consacré à une courte présentation des principes qui régissent le fonctionnement de la façade double-peau dont la justification théorique se trouve résumée dans les deux articles sous référence [4] et [5] et présentée en détail au Chapitre 6.

Le présent chapitre est consacré à la présentation des propriétés particulières aux différents types de double-peau et aux considérations d'ordre pratique qui en découlent. Les conclusions présentées se basent d'une part sur des observations expérimentales qui font l'objet du Chapitre 5 et d'autre part sur une série de simulations effectuées à l'aide du modèle mathématique TQV présenté au Chapitre 6, simulations dont la présentation fait l'objet du Chapitre 8 Etudes paramétriques.

Par soucis de clarté et de facilité de lecture, les deux types de façade envisagés (Double-peau contre façade étanche et Double-peau assurant la ventilation des locaux) sont présentés de façon totalement indépendante et ceci au prix d'un certain nombre de répétitions. Les différences essentielles entre ceux deux types sont les suivantes :

Double-peau contre façade étanche

- Le choix de la profondeur du canal n'est pas critique
- Le canal est ouvert en sa partie inférieure, il peut être fermé (par un clapet mobile) au sommet.
- Les fenêtres sont en principe fermées. Leur ouverture ne procure pas forcément une bonne ventilation du local.
- La protection acoustique offerte par la double-peau est faible, voire inexistante.
- En raison de l'échauffement de l'air du canal (en présence de rayonnement) la hauteur est limitée à 3 ou 4 niveaux.

Double-peau assurant la ventilation des locaux

- Le choix de la profondeur du canal fait l'objet d'un dimensionnement précis.
- Le canal dépasse le niveau du dernier étage. Il est fermé à sa base.
- L'ouverture de clapets (dimensionnés étage par étage) assure la ventilation traversante des étages.
- La double-peau peut améliorer la protection acoustique.
- La hauteur admissible dépend du dimensionnement du canal. Une borne supérieure est toutefois imposée par l'échauffement de l'air du canal (10 à 15 niveaux selon le cas).

4.1 Double-peau contre façade étanche

Bien que ce type de façade ne présente pas les performances les plus intéressantes, il est souvent réalisé en raison de sa relative simplicité.

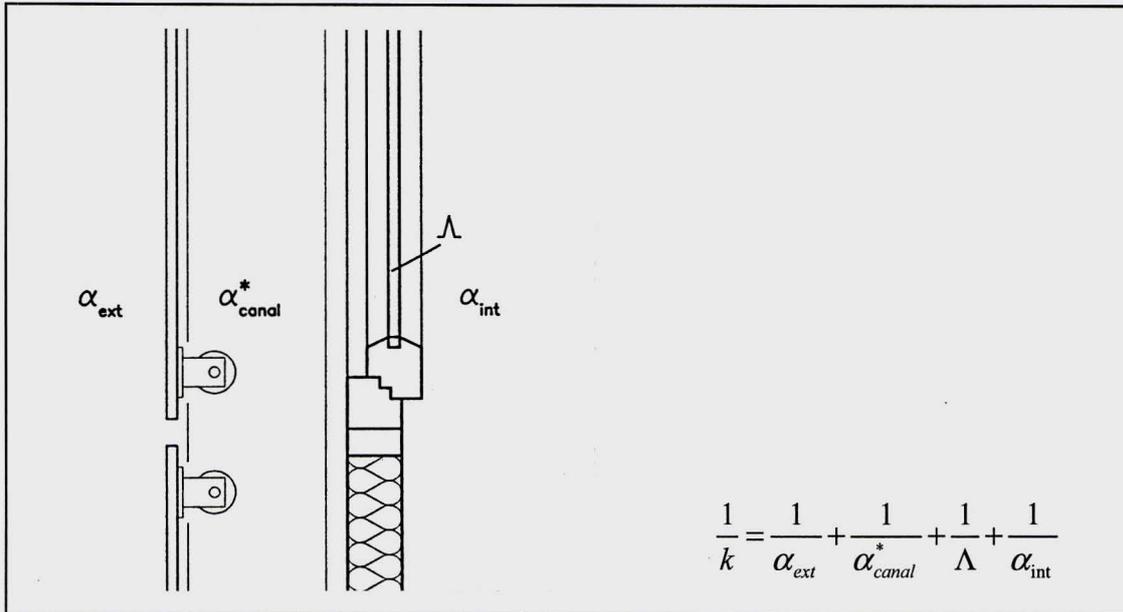
- **Isolation thermique nocturne – Calcul de la valeur k**

L'isolation thermique de la façade intérieure est renforcée par la présence de l'écran. La circulation de l'air dans le canal de la double-peau limite toutefois le gain attendu et ceci même si le mouvement de l'air est freiné par la fermeture de clapets obstruant l'ouverture supérieure. Afin de tenir compte du manque d'étanchéité de ceux-ci, deux cas ont été considérés :

$$A_{\text{sup}} / A_{\text{inf}} = 1$$

$$A_{\text{sup}} / A_{\text{inf}} = 1/10$$

La valeur k de la façade double-peau peut se calculer de manière conventionnelle à condition de prendre pour coefficient de transfert thermique du canal de la double-peau les valeurs données sur le tableau 4.1.1. Ces dernières ne dépendent que faiblement de la hauteur du canal ou du coefficient de décharge c_d .



Type de vitrage	A_{sup} / A_{inf}	Profondeur	
		0,6 m	0,2 m
V ₁	1/1	15	13
	1/10	10	8
V ₃	1/1	13	12
	1/10	9	7

Valeurs prises par α_{canal}^* [W/m²K] en fonction du type de vitrage de la paroi et du rapport des ouvertures du canal.

V₁ Vitrage isolant 4/12/4 $\Lambda_1 = 2,1$ [W/m²K]

V₃ Vitrage triple avec couches K : 4K/12/4 K/12/4 $\Lambda_3 = 1,2$ [W/m²K]

En fonction de la hauteur du canal et du coefficient de décharge, les valeurs de α_{canal}^* données par le tableau ci-dessus sont à ajuster comme suit :

Hauteur < 10 m augmenter α_{canal}^* de 1 W/m²K

> 30 m diminuer de 1 W/m²K

Coefficient de décharge $c_d \leq 0,25$ diminuer de 1 W/m²K

$c_d \geq 0,35$ augmenter de 1 W/m²K

Tableau 4.1.1 : Coefficient de transfert thermique équivalent α_{canal}^* du canal de la double-peau.

- **Rayonnement vers le ciel clair**

Comme l'a montré Th. Franck [10], les déperditions d'une construction vers le ciel clair se traduisent par une perte supplémentaire dont l'intensité ne dépend ni de la température extérieure, ni de celle du bâtiment.

Les règles pratiques sont les suivantes (cf 7 Etablissement des considérations pratiques).

Calcul de la valeur k

- Le coefficient surfacique de transmission thermique k (U value) se calcule selon l'usage et représente la transmission thermique (surfacique) de l'intérieur vers l'environnement et l'air extérieur (cf § précédent).

Pertes supplémentaires vers le ciel

- Le rayonnement d'une surface verticale vers le ciel se solde par un supplément de pertes thermiques ΔR de l'ordre de 25 [W/m²] par ciel partiellement couvert. Par rapport à cette valeur moyenne, de forts écarts sont observés allant de 0 (forte couverture moyenne) à 60 [W/m²] (ciel clair, air sec)
Ces valeurs sont proches du double pour une surface horizontale.
- Le supplément de pertes vers le ciel se reporte partiellement sur les déperditions thermiques de l'élément de façade et partiellement sur le flux de chaleur extérieur à la façade (échange avec l'air extérieur).
- L'augmentation *relative* des pertes thermiques de la façade (augmentation relative de la valeur k) ne dépend que de la différence de température $\Delta T = T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}$. Elle est de 8% pour une différence de température de 20 [K] et ceci indépendamment de la valeur k de la façade.
- L'augmentation *absolue* des pertes thermiques de la façade [W/m²K] est quant à elle proportionnelle à la valeur k ainsi qu'à ΔR . Pour $k = 1$ [W/m²K] et $\Delta R = 25$ [W/m²K], cette augmentation vaut 1,64 [W/m²] et ceci quelle que soit la différence de température existant entre l'intérieur et l'extérieur.

- **Comportement en saison froide – Confort thermique**

L'isolation globale d'une façade double-peau tient avant tout à la qualité d'isolation de la *façade intérieure*. De ce fait, il y a avantage à équiper cette dernière de vitrages performants montés sur des cadres et un éventuel contre-cœur à haute isolation. C'est à cette seule condition que la façade double-peau aura des performances supérieures à celles d'une façade simple équivalente (c'est-à-dire dont les vitrages comportent le *même nombre total* de surfaces vitrées équipées des mêmes couches sélectives).

En l'absence de contre-cœur, les gains solaires sont très importants. Additionnés aux gains internes (occupants, machines et éclairage), ils suffisent à compenser les pertes (par conduction à travers la façade ainsi que par la ventilation) dès que la variable météorologique m (Tableau 4.1.2) est supérieure à 3,5 [W/m²K] (avec éclairage artificiel) ou 5 [W/m²K] (sans éclairage artificiel). Pour des valeurs plus grandes de m, des protections solaires deviennent indispensables (Tableau 4.1.3). La justification détaillée de ces données est présentée au Chapitre 8, Etudes paramétriques.

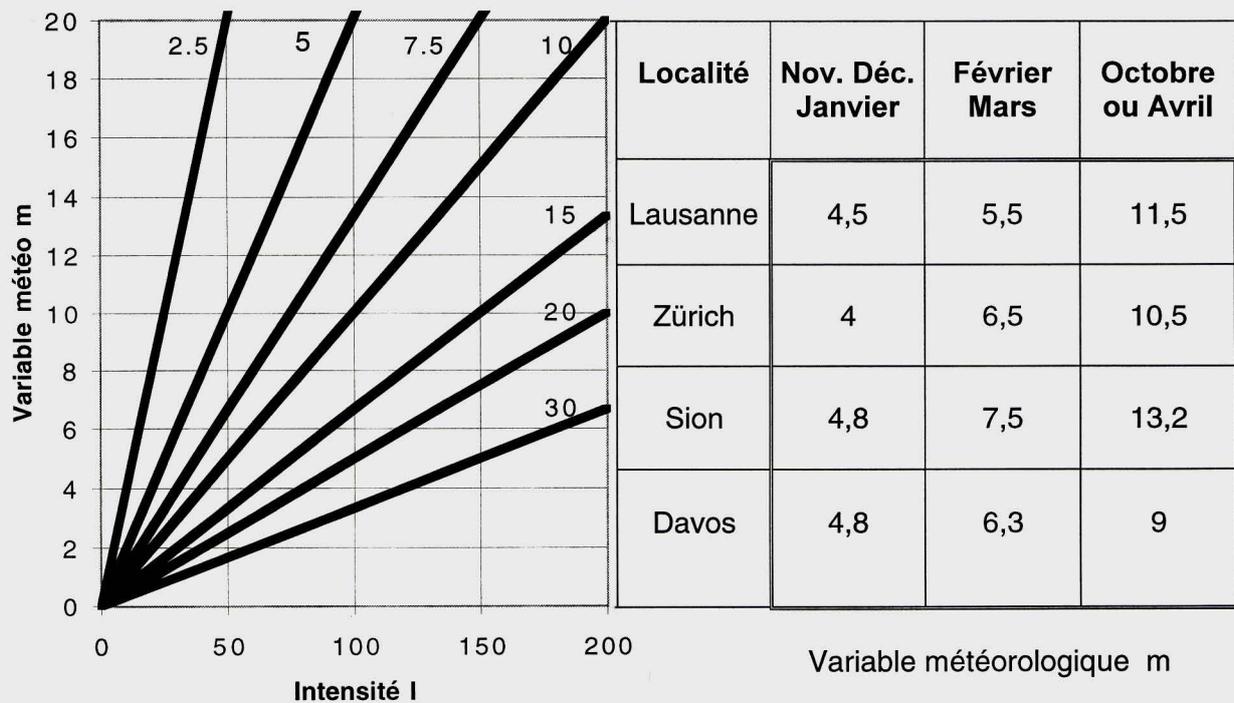


Tableau 4.1.2 : La variable météorologique $m = I / \Delta T$ [$W/m^2 K$]

Le bilan énergétique d'un système qui comporte des gains solaires dépend de la variable météorologique m (graphique de gauche). Le tableau de droite donne quelques valeurs mensuelles moyennes :

saison froide $4 < m < 6$; entre-saison $\cong 10$; été > 10 [$W/m^2 K$]

$$\Delta T = T_{\text{intérieur}} - T_{\text{extérieur}} \text{ [K]}$$

m [$W/m^2 K$]	Bilan global de la façade
< 2	Gains solaires négligeables.
3,5	Saison froide, soleil bas. Gains solaires et gains internes (occupants, machines et éclairage artificiel) compensent éventuellement les pertes.
5	Saison froide, soleil clair. Gains solaires et gains internes (occupants et machines) compensent les pertes.
> 6	Protections solaires indispensables.

Tableau 4.1.3 : Comportement d'une façade double-peau en saison froide.

- **Protection solaire estivale – Confort d'été**

Comparée à une façade simple, la façade double-peau est davantage exposée aux surchauffes et doit par conséquent être équipée de protections solaires efficaces disposées entre les deux peaux et correctement ventilées (par l'air qui circule dans le canal de la double-peau). Il n'y a aucun avantage à utiliser l'écran comme protection solaire fixe : qu'il soit réfléchissant ou absorbant, il n'atténue qu'imparfaitement les gains solaires indésirables et limite par contre l'apport de lumière naturelle, ce qui réduit l'autonomie en éclairage naturel.

Un store (toile ou à lamelles) réduit l'apport de chaleur d'un facteur 3 à 5 selon les conditions extérieures de température et de rayonnement : il est plus efficace lorsque la température extérieure est inférieure à la température du local et pour des faibles valeurs de rayonnement.

Pour toute valeur du rayonnement supérieure à 100 W/m^2 , la température de surface de la vitre intérieure est plus élevée que la température intérieure du local. Le store a pour effet d'abaisser cette différence de 1 à 2°C .

Le comportement dynamique du local – et par conséquent le confort offert par beau temps chaud – dépend du mode de ventilation des locaux et de l'inertie thermique de ceux-ci. Il y a clairement avantage à modérer les apports solaires en réduisant la fraction vitrée et à retarder les gains à travers les éléments opaques en augmentant le déphasage thermique du contre-cœur.

- **Ventilation des locaux**

En présence d'un fort rayonnement solaire, la ventilation en direction de la double-peau devient problématique : les étages supérieurs reçoivent l'air chaud rejeté par les étages inférieurs.

Lorsque la double-peau court sur plusieurs étages, une ventilation traversante est possible aux étages situés sous le niveau neutre.

- **Risques de condensation**

Une façade intérieure bien isolée et munie de vitrages et de cadres performants ne présente aucun risque de condensation intérieure.

Il peut par contre y avoir un risque de condensation sur la face extérieure de la façade intérieure ou sur l'écran, par temps froid et ciel nocturne clair. Ce désagrément propre aux enveloppes à haute isolation disparaît généralement en cours de matinée.

4.2 Recommandations : Double-peau contre façade étanche

Ecran

L'écran est à réaliser en glace claire, sans cadre (ou avec un cadre minimal). Les glaces réfléchissantes ou teintées n'offrent pas une protection solaire suffisante et limitent l'autonomie en éclairage naturel. Elles sont à proscrire (cf. Lumière naturelle).

La prolongation de l'écran au-dessus du dernier étage permet l'allongement du canal (voir ci-après, canal de la double-peau). Des ouvertures mobiles dans le plan de l'écran détériorent le tirage du canal et n'améliorent pas la ventilation des locaux.

Seul un écran étanche à l'air (ni ouverture ni fente) offre une protection acoustique significative (cf. Aspects acoustiques).

Façade intérieure

Des vitrages à haute résistance thermique ($k < 1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$) et à forte transparence (lumière visible) sont avantageux hiver comme été. Ils seront montés sur des cadres étanches à l'air et présentant une résistance thermique accordée à celle des vitrages.

Le confort thermique est amélioré par un choix judicieux de la fraction vitrée, choix dicté prioritairement par les besoins en lumière naturelle (cf. Lumière naturelle).

Le contre-cœur présentera une haute résistance ($k < 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$) et un déphasage thermique de l'ordre de 8 heures.

Selon l'exécution de l'écran et du canal de la double-peau, la peau intérieure devra à elle seule présenter l'isolation acoustique requise (cf. Aspects acoustiques).

Canal de la double-peau

Le choix de la profondeur du canal dépend du mode d'exploitation de la double-peau et du système de nettoyage des vitrages. Entre 20 et 60 cm, cette profondeur est sans influence sur les mouvements d'air.

Les éventuels caillebotis, fixations et obstacles situés entre les deux peaux freinent l'air et diminuent l'ouverture équivalente de passage de l'air. Cette dernière peut se calculer par la relation

$$\frac{1}{A_{tot}^2} = \frac{1}{A_{sup}^2} + \frac{1}{A_{inf}^2} + \sum_j \frac{1}{A_j^2}$$

où les A_j se réfèrent aux divers obstacles situés dans le canal de la double-peau.

La présence d'un caillebotis influence l'apport en lumière naturelle (cf. Lumière naturelle).

Dans le type d'exécution envisagé ici, la hauteur de la double-peau est limitée à 3 ou 4 étages (afin de limiter la différence de température entre le haut et le bas du canal).

Des clapets placés en haut du canal permettent de limiter les mouvements d'air en saison froide.

En prolongeant le canal au-dessus du dernier étage et en choisissant correctement le rapport A_{sup}/A_{inf} , il est possible d'offrir des conditions de ventilation équivalentes à tous les étages (voir sous 4.3).

La protection acoustique offerte par l'écran peut être fortement réduite par l'ouverture située à sa base (cf. Aspects acoustiques).

Protections solaires

Des protections solaires efficaces (toile ou à lamelles) sont indispensables. Pour des raisons pratiques (et esthétiques) elles sont placées dans le canal de la double-peau.

□ Aspects acoustiques

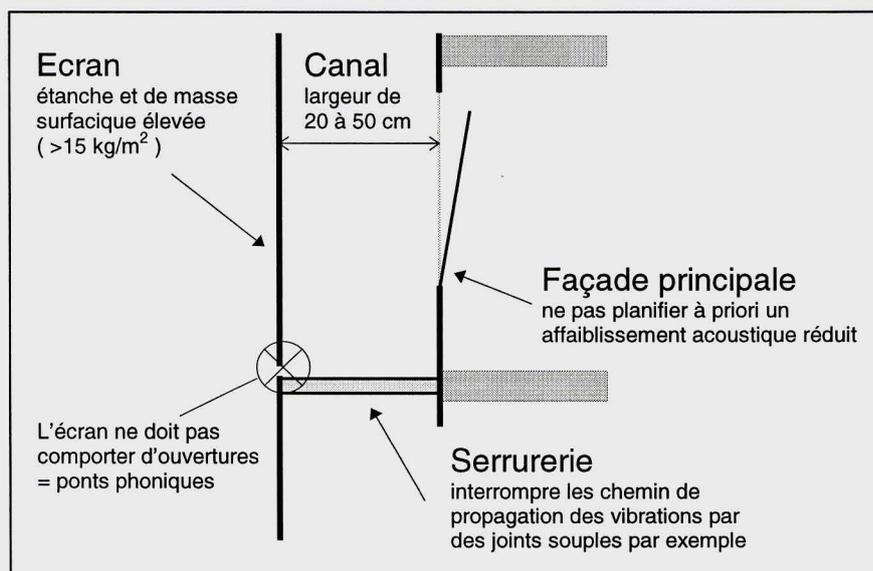
Une façade double-peau correctement réalisée permet d'obtenir une amélioration de protection contre les bruits extérieurs. Elle peut aussi maintenir une protection appréciable lorsque les fenêtres sont ouvertes. Cependant, selon sa mise en oeuvre, l'écran extérieur de la façade double-peau peut très bien n'apporter aucune protection supplémentaire contre les bruits extérieurs.

La prévision de l'affaiblissement acoustique d'une façade double-peau est complexe car intégrant de nombreux paramètres. Il est erroné de croire que l'affaiblissement acoustique de la façade double-peau est la somme de ceux de la façade principale et de l'écran.

Pour ces raisons, il est risqué de planifier des performances d'affaiblissement réduites pour la façade principale sans consulter un acousticien.

Les directives générales pour qu'une façade double-peau améliore la protection contre les bruits extérieurs sont :

- prévoir un écran étanche, c'est-à-dire qu'il ne doit y avoir aucun chemin direct de propagation du son entre l'extérieur et le canal : ouvertures dans l'écran, fentes entre éléments etc., lesquels constitueraient autant de ponts phoniques,
- adopter, pour l'écran, un matériau assez lourd et/ou épais afin d'obtenir une masse surfacique la plus élevée possible - typiquement supérieure à 15 kg/m^2 ; cependant, si l'épaisseur dépasse 5 mm, une structure stratifiée est préférable,
- fixer la largeur du canal entre l'écran étanche et la façade principale entre 20 et 50 cm,
- prévoir, dans la serrurerie, des joints souples afin que celle-ci ne propage pas les vibrations de l'écran à la façade principale.



Comme toute médaille a son revers, la façade double-peau peut favoriser la propagation des bruits d'une unité du bâtiment à une autre lorsque leurs fenêtres sont ouvertes. Pour éviter ce phénomène, il convient de cloisonner le canal aux limites des unités, horizontalement et verticalement.

Pour de plus amples renseignements, consulter le Dossier "Aspects acoustiques".

□ **Lumière naturelle**

Une façade double-peau ne se distingue pas de façon significative d'une façade conventionnelle, en ce qui concerne ses performances en éclairage naturel, celles-ci étant exprimées à partir de :

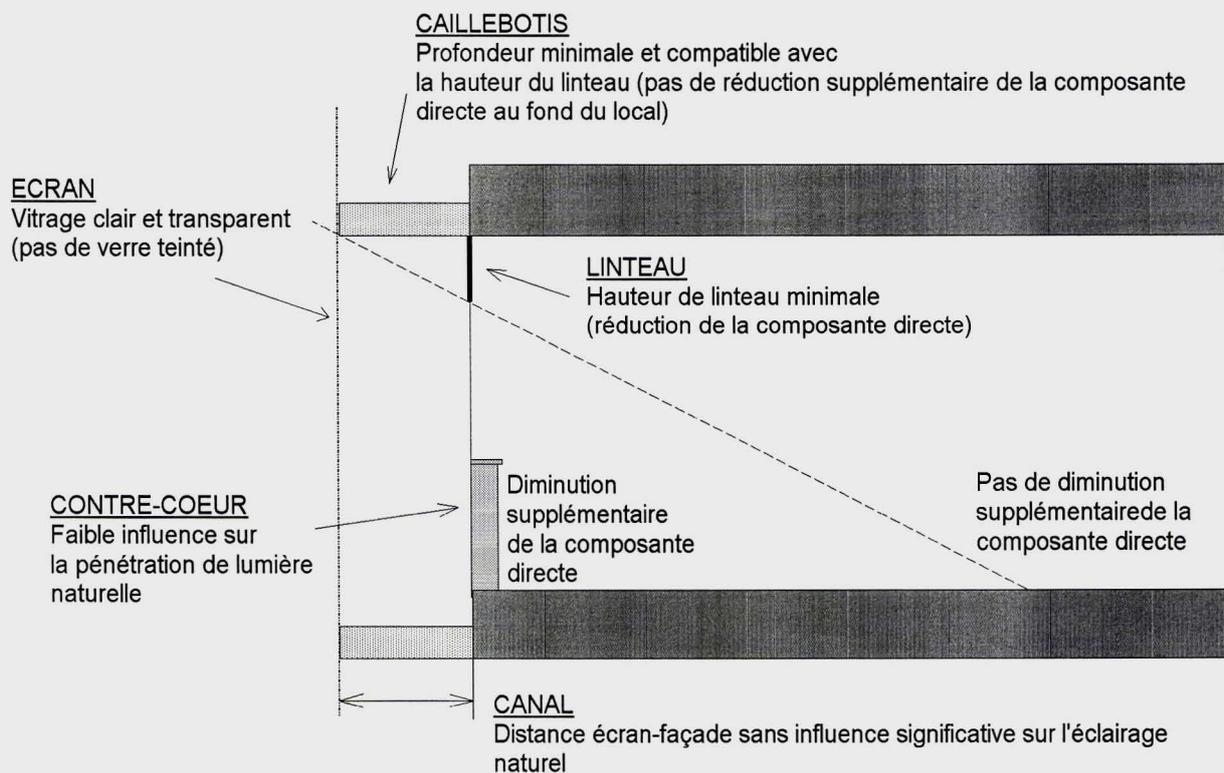
- la répartition du facteur de lumière du jour,
- la fraction annuelle d'autonomie en éclairage naturel,
- l'ambiance visuelle perçue dans le local.

Elle ne peut, de fait, pas être assimilée à un dispositif de lumière naturelle, susceptible d'améliorer la pénétration de la lumière du jour dans un local.

Les principales règles de conception, qui s'appliquent à une façade conventionnelle en matière d'éclairage naturel, peuvent ainsi être directement transposées à la façade double-peau. L'étude des performances en éclairage naturel de la façade double-peau, menée à bien par simulations numériques, a permis de confirmer ce fait.

Les principales précautions à prendre, pour éviter qu'une façade double-peau ne pénalise la pénétration de la lumière naturelle dans un local, sont les suivantes :

- utiliser des vitrages clairs (plus de 80% de transmission lumineuse), aussi bien au niveau de la façade qu'au niveau de la peau extérieure (éviter à tout prix le verre teinté);
- réduire autant que possible la surface relative des cadres de fenêtre, au niveau de la façade et de la peau extérieure;
- accorder une attention particulière au linteau supérieur du vitrage de la façade (influence importante sur la pénétration de la lumière du jour dans le local), en réduisant la hauteur de ce dernier au minimum;
- choisir un caillebotis de profondeur compatible avec la hauteur du linteau (18 cm de profondeur pour un linteau de 25 cm de hauteur par ex.), de façon à ce qu'il ne diminue pas la composante diffuse de la lumière du jour, provenant directement de la voûte céleste, en plus du linteau.



La distance de l'écran à la façade n'a aucune influence significative sur la pénétration de la lumière naturelle dans le local. La présence d'un contre-cœur ne réduit que faiblement cette dernière, du fait de sa position en partie basse de la façade.

La façade double-peau ne constituant pas un système d'éclairage naturel à proprement dit, l'autonomie en lumière naturelle du local est donc comparable à celle offerte par une façade conventionnelle, munie d'un contre-cœur et d'un double vitrage. L'autonomie du local reste donc très limitée : seule la première moitié de ce dernier bénéficie d'une autonomie non nulle dans le cas de vitrages clairs. Moins d'un tiers en bénéficie dans le cas de l'utilisation d'un verre teinté au niveau de la peau extérieure, d'où la nécessité d'éviter ce type de vitrage.

Pour de plus amples renseignements, consulter le Dossier "Lumière naturelle".

4.3 Double-peau assurant la ventilation des locaux

Lorsque les locaux sont ventilés grâce au tirage du canal de la double-peau, les propriétés générales (répétées ci-après) sont semblables à celles énoncées aux paragraphes précédents. S'y ajoutent les précautions à prendre afin d'assurer un fonctionnement correct du système.

- **Isolation thermique nocturne – Calcul de la valeur k**

L'isolation thermique de la façade intérieure est renforcée par la présence de l'écran. La circulation de l'air dans le canal de la double-peau limite toutefois le gain attendu et ceci même si le mouvement de l'air est freiné par la fermeture de clapets obstruant l'ouverture supérieure.

La valeur k de la façade double-peau peut se calculer de manière conventionnelle à condition de prendre pour coefficient de transfert thermique du canal de la double-peau les valeurs données sur le tableau 4.1.1. Ces dernières ne dépendent que faiblement de la hauteur du canal ou du coefficient de décharge c_d .

- **Rayonnement vers le ciel clair**

Comme l'a montré Th. Frank [10], les déperditions d'une construction vers le ciel clair se traduisent par une perte supplémentaire dont l'intensité ne dépend ni de la température extérieure, ni de celle du bâtiment.

Les règles pratiques sont les suivantes (cf Chapitre 7 Etablissement des considérations pratiques).

Calcul de la valeur k

- Le coefficient surfacique de transmission thermique k (U value) se calcule selon l'usage et représente la transmission thermique (surfacique) de l'intérieur vers l'environnement et l'air extérieur (cf § précédent).

Pertes supplémentaires vers le ciel

- Le rayonnement d'une surface verticale vers le ciel se solde par un supplément de pertes thermiques ΔR de l'ordre de 25 [W/m²] par ciel partiellement couvert. Par rapport à cette valeur moyenne, de forts écarts sont observés allant de 0 (forte couverture moyenne) à 60 [W/m²] (ciel clair, air sec).
Ces valeurs sont proches du double pour une surface horizontale.
- Le supplément de pertes vers le ciel se reporte partiellement sur les déperditions thermiques de l'élément de façade et partiellement sur le flux de chaleur extérieur à la façade (échange avec l'air extérieur).
- L'augmentation *relative* des pertes thermiques de la façade (augmentation relative de la valeur k) ne dépend que de la différence de température $\Delta T = T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}$. Elle est de 8% pour une différence de température de 20 [K] et ceci indépendamment de la valeur k de la façade.
- L'augmentation *absolue* des pertes thermiques de la façade [W/m²K] est quant à elle proportionnelle à la valeur k ainsi qu'à ΔR . Pour $k = 1$ [W/m²K] et $\Delta R = 25$ [W/m²K], cette augmentation vaut 1,64 [W/m²] et ceci quelle que soit la différence de température existant entre l'intérieur et l'extérieur.

- **Comportement en saison froide – Confort thermique**

L'isolation globale d'une façade double-peau tient avant tout à la qualité d'isolation de la *façade intérieure*. De ce fait, il y a avantage à équiper cette dernière de vitrages performants montés sur des cadres et un éventuel contre-cœur à haute isolation. C'est à cette seule condition que la façade double-peau aura des performances supérieures à celles d'une façade simple équivalente (c'est-à-dire dont les vitrages comportent le *même nombre total* de surfaces vitrées équipées des mêmes couches sélectives).

En l'absence de contre-cœur, les gains solaires sont très importants. Additionnés aux gains internes (occupants, machines et éclairage), ils suffisent à compenser les pertes (par conduction à travers la façade ainsi que par la ventilation) dès que la variable météorologique (Tableau 4.1.2) est supérieure à 3,5 [W/m²K] (avec éclairage artificiel) ou 5 [W/m²K] (sans éclairage artificiel). Pour des valeurs plus grandes de *m*, des protections solaires deviennent indispensables (Tableau 4.1.3). La justification détaillée de ces données est présentée au Chapitre 8, Etudes paramétriques.

- **Protection solaire estivale – Confort d'été**

Comparée à une façade simple, la façade double-peau est davantage exposée aux surchauffes et doit par conséquent être équipée de protections solaires efficaces disposées entre les deux peaux et correctement ventilées (par l'air qui circule dans le canal de la double-peau). Il n'y a aucun avantage à utiliser l'écran comme protection solaire fixe : qu'il soit réfléchissant ou absorbant, il n'atténue qu'imparfaitement les gains solaires indésirables et limite par contre l'apport de lumière naturelle, ce qui réduit l'autonomie en éclairage (naturel).

Un store (toile ou à lamelles) réduit l'apport de chaleur d'un facteur 3 à 5 selon les conditions extérieures de température et de rayonnement : il est plus efficace lorsque la température extérieure est inférieure à la température du local et pour des faibles valeurs de rayonnement.

Pour toute valeur du rayonnement supérieure à 100 [W/m²], la température de surface de la vitre intérieure est plus élevée que la température intérieure du local. Le store a pour effet d'abaisser cette différence de 1 à 2°C.

Le comportement dynamique du local – et par conséquent le confort offert par beau temps chaud – dépend du mode de ventilation des locaux et de l'inertie thermique de ceux-ci. Il y a clairement avantage à modérer les apports solaires en réduisant la fraction vitrée et à retarder les gains à travers les éléments opaques en augmentant le déphasage thermique du contre-cœur.

- **Ventilation des locaux**

L'extraction d'air en direction du canal de la double-peau ne se fait pas par ouverture des fenêtres, mais par des clapets dimensionnés étage par étage et positionnés au-dessus de celles-ci.

Le canal de la double-peau est le moteur de la ventilation des locaux. Correctement dimensionné, il assure une ventilation traversante : l'air frais vient du couloir et l'air vicié est aspiré dans le canal au travers des clapets d'étage. Le taux de renouvellement d'air s'adapte automatiquement à l'intensité du rayonnement solaire.

Le dimensionnement du canal est exposé sous 4.4.

- **Risques de condensation**

Une façade intérieure bien isolée et munie de vitrages et de cadres performants ne présente aucun risque de condensation intérieure.

Il peut par contre y avoir un risque de condensation sur la face extérieure de la façade intérieure ou sur l'écran, par temps froid et ciel nocturne clair. Ce désagrément propre aux enveloppes à haute isolation disparaît généralement en cours de matinée.

4.4 Recommandations : Double-peau assurant la ventilation des locaux

Ecran

L'écran est à réaliser en glace claire sans cadres ou avec un cadre minimal. Il est étanche à l'air et se prolonge de 2 à 3 m au-dessus du niveau du dernier étage à ventiler.

Façade intérieure

Des vitrages à haute résistance thermique ($k < 1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$) et à forte transparence (lumière visible) sont avantageux hiver comme été. Ils seront montés sur des cadres étanches à l'air et présentant une résistance thermique accordée à celle des vitrages.

Le confort thermique est amélioré par un choix judicieux de la fraction vitrée, choix dicté prioritairement par les besoins en lumière naturelle (cf. Lumière naturelle).

Le contre-cœur présentera une haute résistance ($k < 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$) et un déphasage thermique de l'ordre de 8 heures.

Des clapets situés au-dessus des fenêtres et dimensionnés étage par étage permettront l'évacuation de l'air vicié par le canal de la double-peau. (Des entrées d'air frais seront aménagées côté couloir).

L'ouverture des clapets de ventilation permet la propagation des bruits dans le canal de la double-peau et de là dans les locaux ou étages voisins (cf. Aspects acoustiques).

Canal de la double-peau

L'ouverture supérieure du canal est dimensionnée en fonction des données suivantes :

- hauteur h_t du canal au-dessus du clapet de l'étage ventilé supérieur,
- volume ventilé par étage et par mètre courant de façade (profondeur * hauteur plafond – plancher = $l_p * h_{pp}$),
- nombre d'étages ventilés N ,
- intensité solaire transmise à l'air G_{air} .

Cette ouverture détermine la profondeur du canal.

Le "moteur" de la ventilation naturelle d'une façade ombragée est constitué par le "volume moteur" $A_{\text{sup}} \cdot h_t$ alimenté par l'intensité transmise à l'air G_{air} . Les abaques 4.4.1 ou 4.4.2 permettent le prédimensionnement du système. On notera qu'une fois les dimensions choisies, le taux de renouvellement d'air s'ajuste automatiquement à l'intensité du rayonnement solaire. La température de l'air dans le canal est égale ou légèrement supérieure à celle de l'air extrait des locaux. L'élévation de la température de l'air dans la partie supérieure ensoleillée du canal peut être évaluée en utilisant l'abaque 4.4.5.

Lorsque la façade est uniformément ensoleillée, on peut utiliser les abaques 4.4.3 et 4.4.4 pour déterminer le nombre maximum d'étages ventilables ou au contraire si ce nombre est fixé, en déduire le "volume moteur" minimal $A_{\text{sup}} \cdot \sqrt{h_1 \cdot h_{\text{étage}}}$ duquel on déduit la section minimale du canal supérieur A_{sup} .

La température de l'air dans le canal augmente à chaque étage et peut devenir le critère déterminant qui limite le nombre d'étages. L'échauffement de l'air dans le canal est calculable par la relation (9) du paragraphe 3.2.1, on peut également l'évaluer en utilisant l'abaque 4.4.5.

Le canal de la double-peau propage les sons horizontalement et verticalement ce qui peut conduire à une gêne acoustique (cf. Aspects acoustiques).

Protections solaires

Des protections solaires efficaces (toile ou à lamelles) sont placées dans le canal de la double-peau. Elles sont détachées de la façade afin de favoriser la circulation de l'air.

Aspects acoustiques

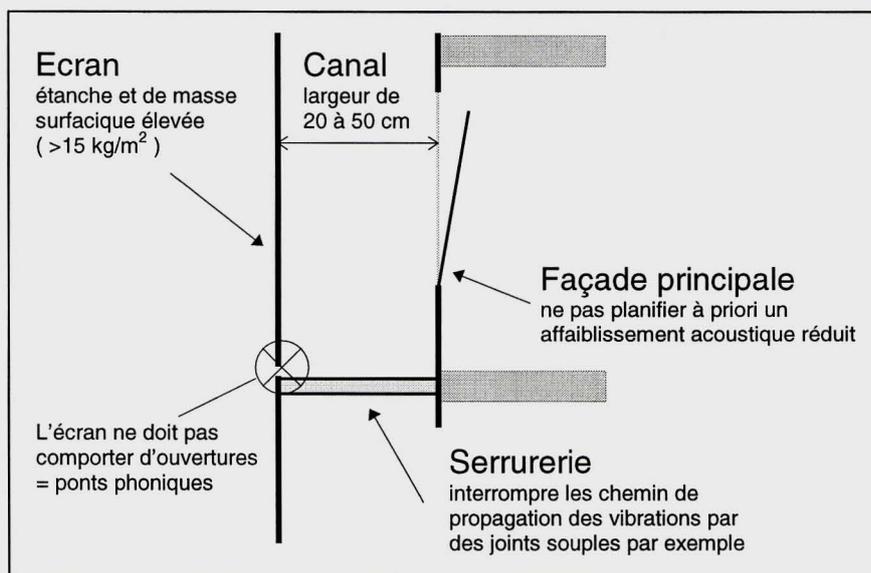
Une façade double-peau correctement réalisée permet d'obtenir une amélioration de protection contre les bruits extérieurs. Elle peut aussi maintenir une protection appréciable lorsque les fenêtres sont ouvertes. Cependant, selon sa mise en oeuvre, l'écran extérieur de la façade double-peau peut très bien n'apporter aucune protection supplémentaire contre les bruits extérieurs.

La prévision de l'affaiblissement acoustique d'une façade double-peau est complexe car intégrant de nombreux paramètres. Il est erroné de croire que l'affaiblissement acoustique de la façade double-peau est la somme de ceux de la façade principale et de l'écran.

Pour ces raisons, il est risqué de planifier des performances d'affaiblissement réduites pour la façade principale sans consulter un acousticien.

Les directives générales pour qu'une façade double-peau améliore la protection contre les bruits extérieurs sont :

- prévoir un écran étanche, c'est à dire qu'il ne doit y avoir aucun chemin direct de propagation du son entre l'extérieur et le canal : ouvertures dans l'écran, fentes entre éléments etc., lesquels constitueraient autant de ponts phoniques,
- adopter, pour l'écran, un matériau assez lourd et/ou épais afin d'obtenir une masse surfacique la plus élevée possible - typiquement supérieure à 15 kg/m²; cependant, si l'épaisseur dépasse 5 mm, une structure stratifiée est préférable,
- fixer la largeur du canal entre l'écran étanche et la façade principale entre 20 et 50 cm,
- prévoir, dans la serrurerie, des joints souples afin que celle-ci ne propage pas les vibrations de l'écran à la façade principale.



Comme toute médaille a son revers, la façade double-peau peut favoriser la propagation des bruits d'une unité du bâtiment à une autre lorsque leurs fenêtres sont ouvertes. Pour éviter ce phénomène, il convient de cloisonner le canal aux limites des unités, horizontalement et verticalement.

Pour de plus amples renseignements, consulter le Dossier "Aspects acoustiques".

Lumière naturelle

Une façade double-peau ne se distingue pas de façon significative d'une façade conventionnelle, en ce qui concerne ses performances en éclairage naturel, celles-ci étant exprimées à partir de :

- la répartition du facteur de lumière du jour,
- la fraction annuelle d'autonomie en éclairage naturel,
- l'ambiance visuelle perçue dans le local.

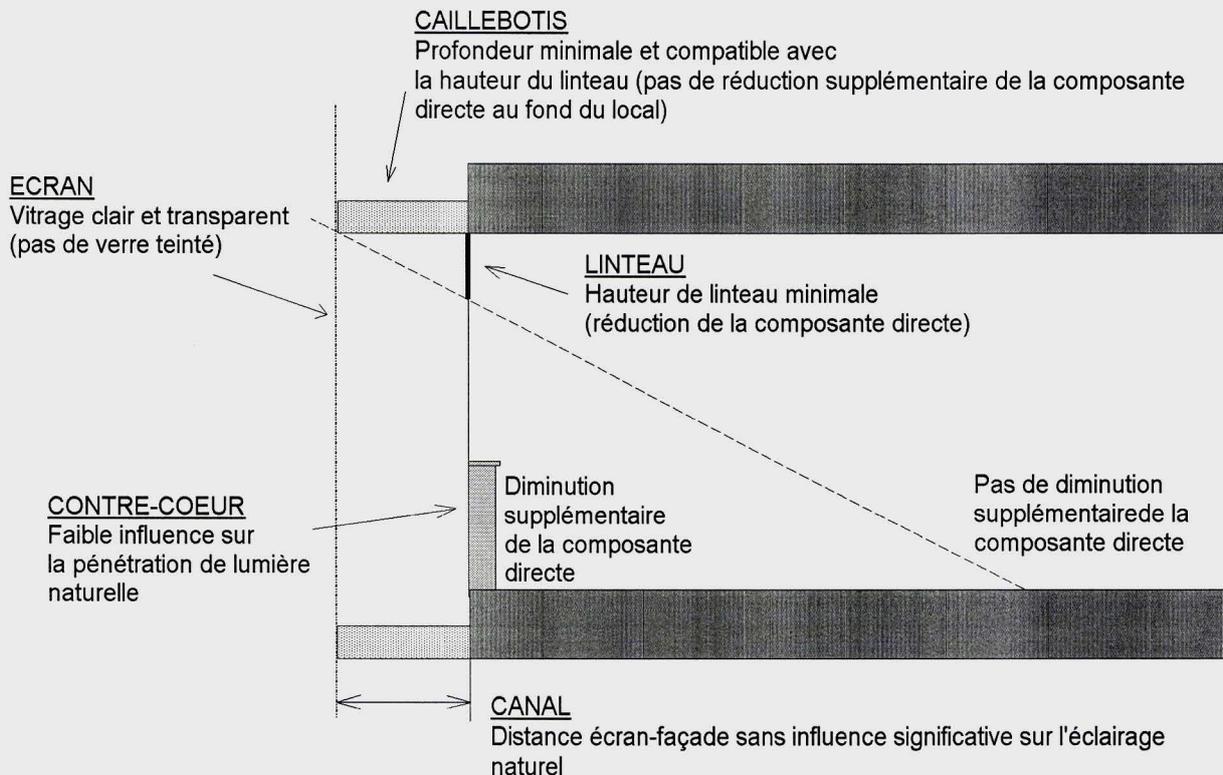
Elle ne peut, de fait, pas être assimilée à un dispositif de lumière naturelle, susceptible d'améliorer la pénétration de la lumière du jour dans un local.

Les principales règles de conception, qui s'appliquent à une façade conventionnelle en matière d'éclairage naturel, peuvent ainsi être directement transposées à la façade double-peau. L'étude des performances en éclairage naturel de la façade double-peau, menée à bien par simulations numériques, a permis de confirmer ce fait.

Les principales précautions à prendre, pour éviter qu'une façade double-peau ne pénalise la pénétration de la lumière naturelle dans un local, sont les suivantes :

- utiliser des vitrages clairs (plus de 80% de transmission lumineuse), aussi bien au niveau de la façade qu'au niveau de la peau extérieure (éviter à tout prix le verre teinté);

- réduire autant que possible la surface relative des cadres de fenêtre, au niveau de la façade et de la peau extérieure;
- accorder une attention particulière au linteau supérieur du vitrage de la façade (influence importante sur la pénétration de la lumière du jour dans le local), en réduisant la hauteur de ce dernier au minimum;
- choisir un caillebotis de profondeur compatible avec la hauteur du linteau (18 cm de profondeur pour un linteau de 25 cm de hauteur par ex.), de façon à ce qu'il ne diminue pas la composante diffuse de la lumière du jour, provenant directement de la voûte céleste, en plus du linteau.



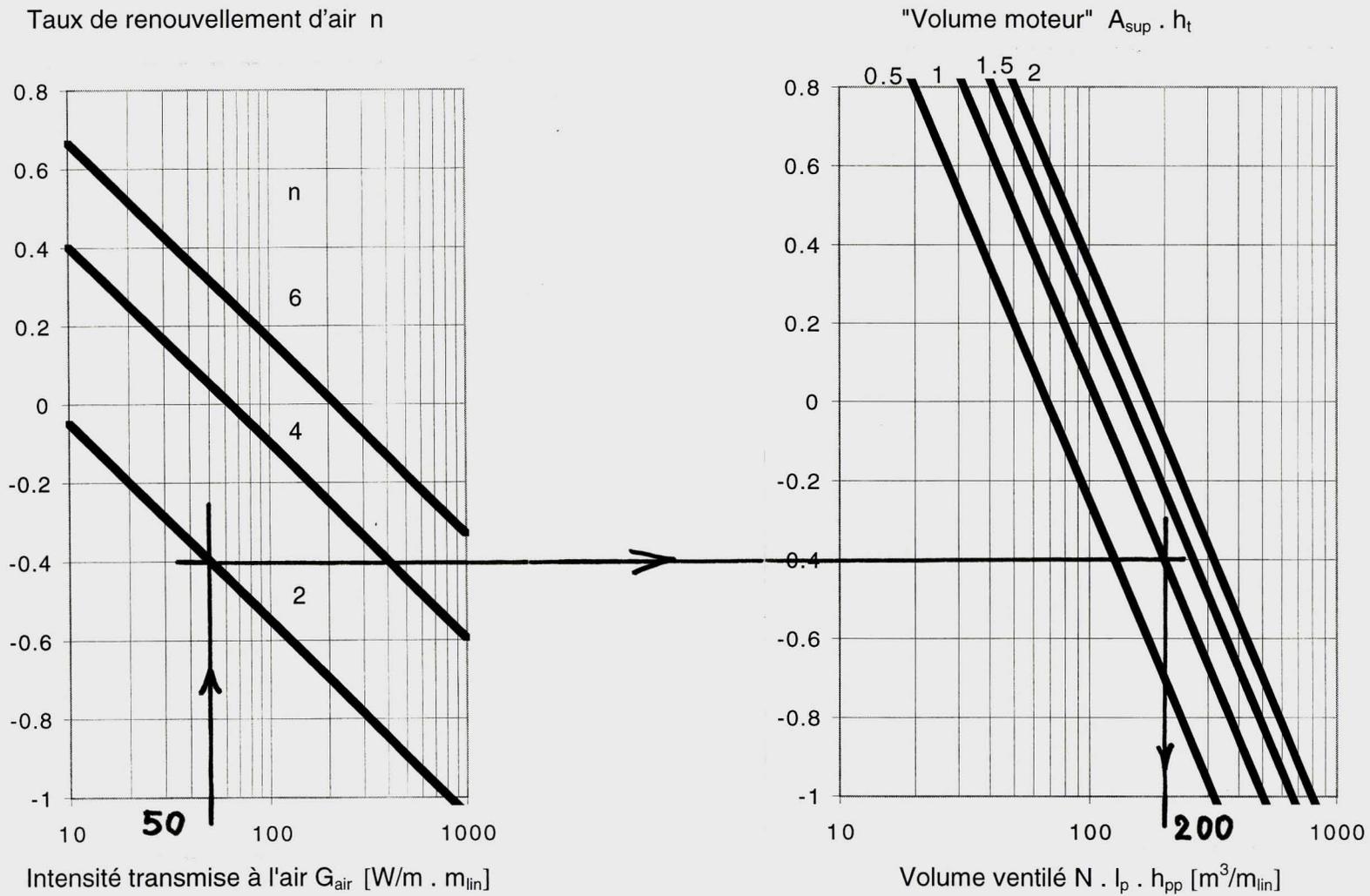
La distance de l'écran à la façade n'a aucune influence significative sur la pénétration de la lumière naturelle dans le local. La présence d'un contre-cœur ne réduit que faiblement cette dernière, du fait de sa position en partie basse de la façade.

La façade double-peau ne constituant pas un système d'éclairage naturel à proprement dit, l'autonomie en lumière naturelle du local est donc comparable à celle offerte par une façade conventionnelle, munie d'un contre-cœur et d'un double vitrage. L'autonomie du local reste donc très limitée : seule la première moitié de ce dernier bénéficie d'une autonomie non nulle dans le cas de vitrages clairs. Moins d'un tiers en bénéficie dans le cas de l'utilisation d'un verre teinté au niveau de la peau extérieure, d'où la nécessité d'éviter ce type de vitrage.

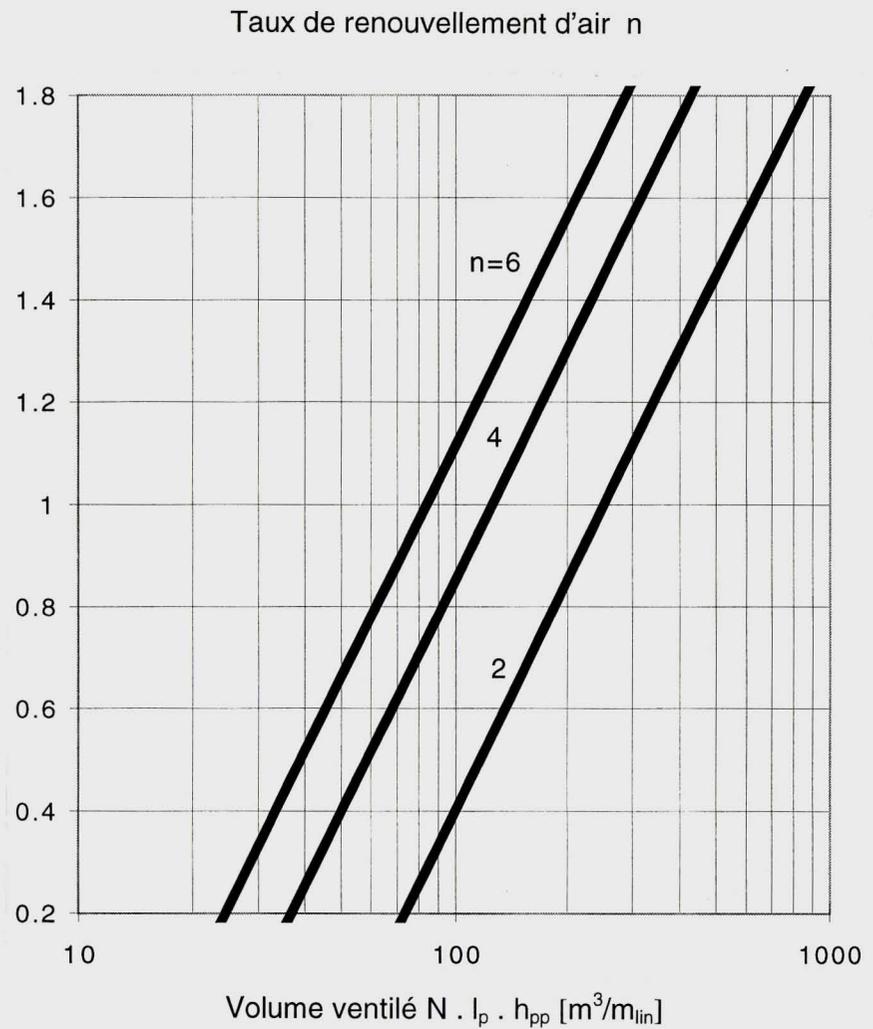
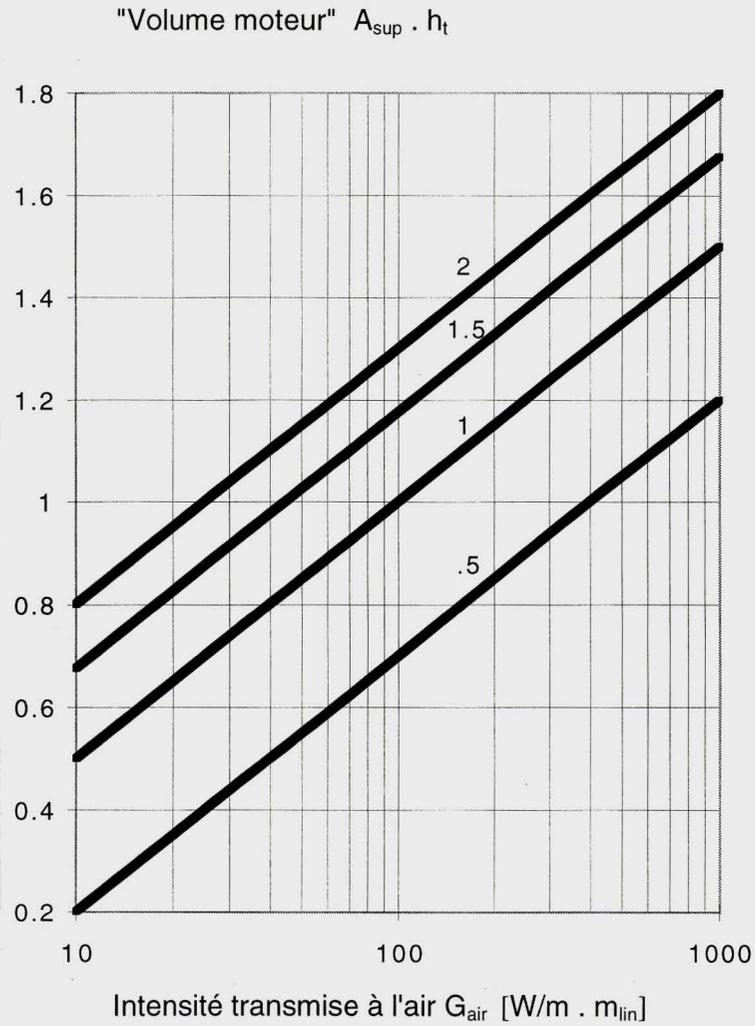
Pour de plus amples renseignements, consulter le Dossier "Lumière naturelle".

Références

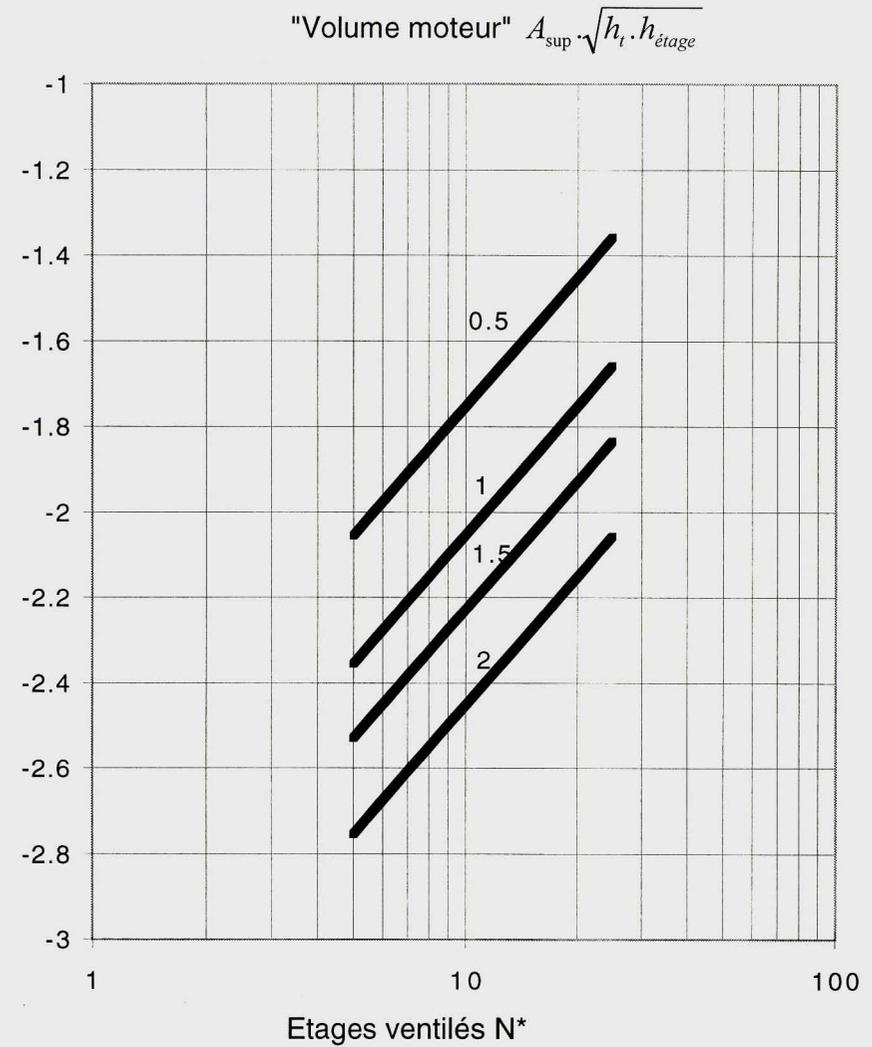
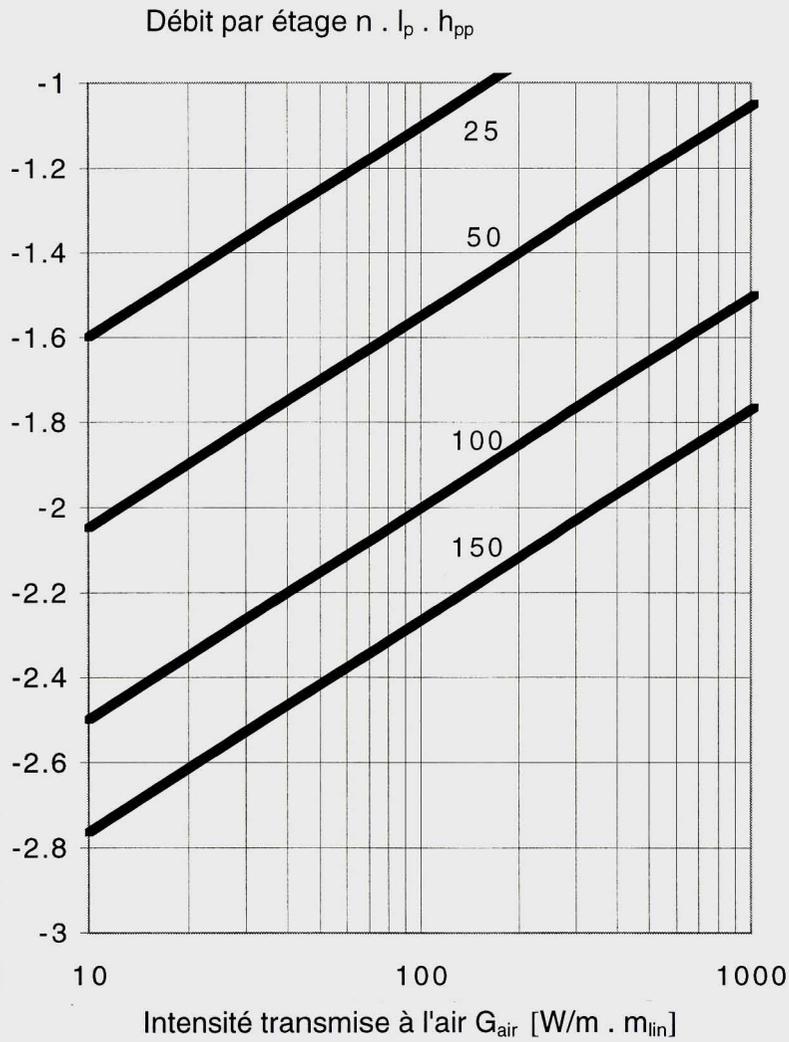
- [1] D. Pahud. Etude du Centre Industriel et Artisanal Marchinés à Meyrin (GE). Rapport final, sept. 1993. GPA et CUEPE, Université de Genève.
- [2] M.J. Holmes – Design of ventilation – 6th AIVC Conference, The Netherlands, 1985.
- [3] M.J. Holmes, F. Cousins – Optimisation of the thermal and ventilation performance of naturally ventilated building facades – 13th AIVC Conference, Nice, France, 1992
- [4] M.J. Holmes – Optimisation of the thermal performance of mechanically and naturally ventilated glazed facades – Renewable Energy, Vol. 5, Part. II, 1994.
- [5] A. Faist et al. Façade double-peau – Typologie et réalisations. Rapport 1993 – 95, EPFL – LESO-PB.
- [6] W. Hensler, A. Schwab, J. Ernst. Zweite – Wand – Fassaden
Fassade – Façade 4/1995, p. 13-18.
- [7] J.E. Emswiler – The neutral zone in ventilation. Trans. Amer. Soc. Heat. Vent. Eng., 32, 1926, p. 59 – 74.
- [8] A. Faist, S. Citherlet. Façades double-peau : Théorie et pratique. 9. Schweizerisches Status-Seminar 1996. Energieforschung im Hochbau EMPA-KWH, Zürich 1996.
- [9] A. Faist. La ventilation des locaux par la façade double-peau. Conférence CISBAT'97, EPF Lausanne, 1997.
- [10] Th. Frank – NEFF-Bericht Nr 266 – Oberflächentemperaturen von besonnten Fensterglasscheiben und ihre Auswirkungen auf Raumklima und Komfort, EMPA Dübendorf, 1986.



Abaque 4.4.1 : Ventilation naturelle traversante par la double-peau. Façade ombragée.
 Volume ventilé par la double-peau en fonction des caractéristiques géométriques et énergétiques.
 Le taux de renouvellement d'air n s'exprime en [1/h]. La section effective supérieure vaut $A_{sup} \cdot A_H \cdot C_{d,H}$.
 Le "volume moteur" $A_{sup} \cdot h_t$ s'exprime en [m³/m_{lin}]



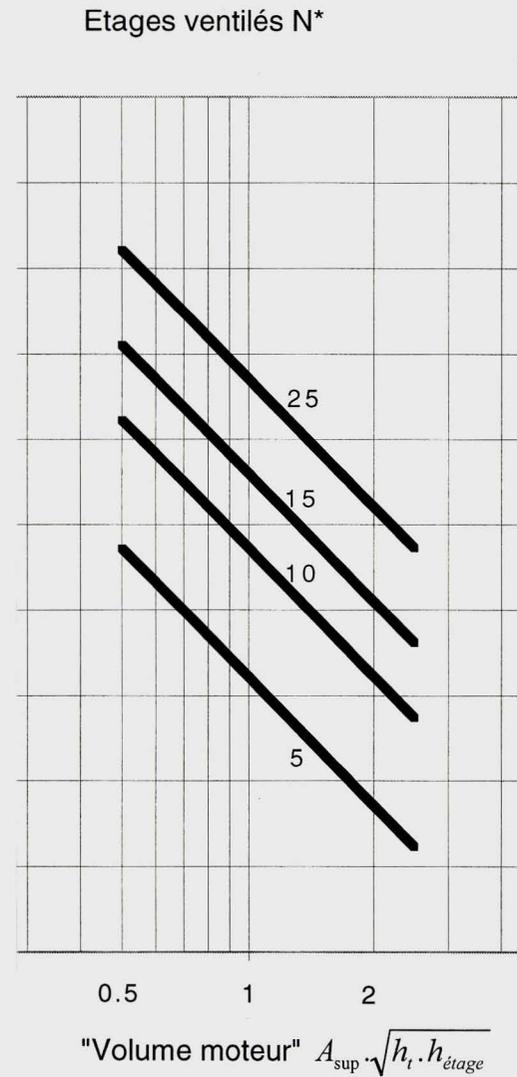
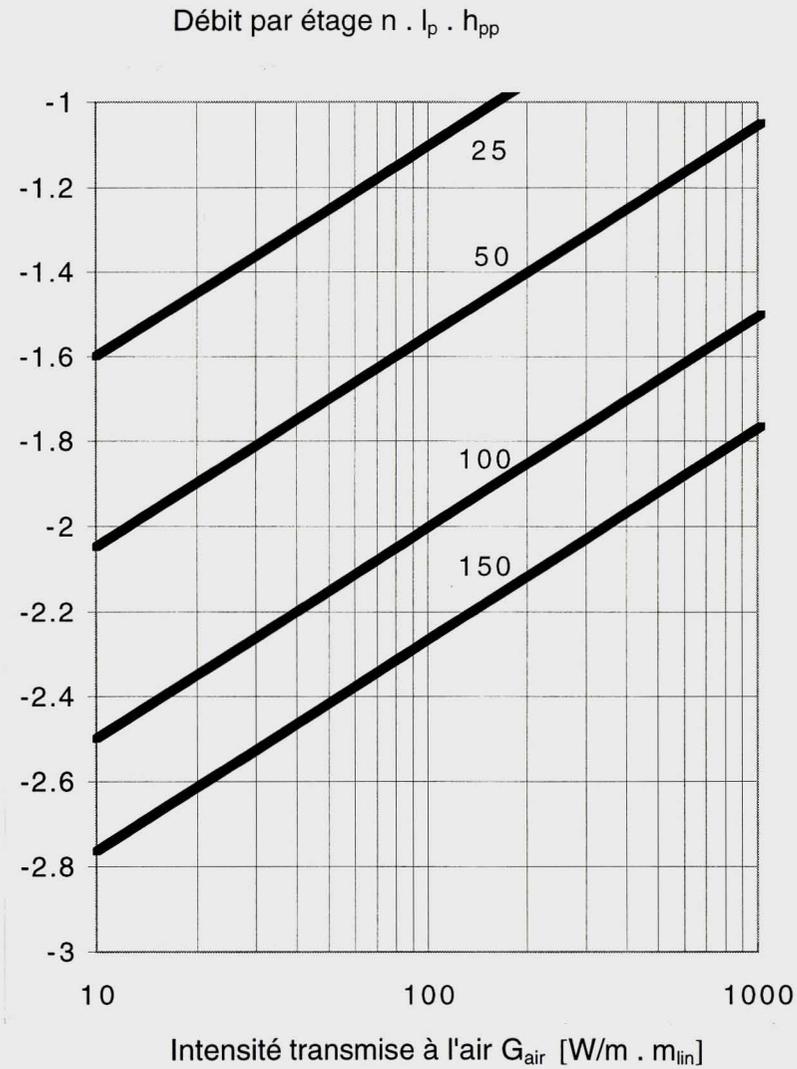
Abaque 4.4.2 : Ventilation naturelle traversante par la double-peau. Façade ombragée.
Volume ventilé par la double-peau en fonction des caractéristiques géométriques et énergétiques.
Le taux de renouvellement d'air n s'exprime en $[1/h]$. La section effective supérieure vaut $A_{sup} = A_H \cdot C_{d,H}$.
Le "volume moteur" $A_{sup} \cdot h_t$ s'exprime en $[m^3/m_{lin}]$



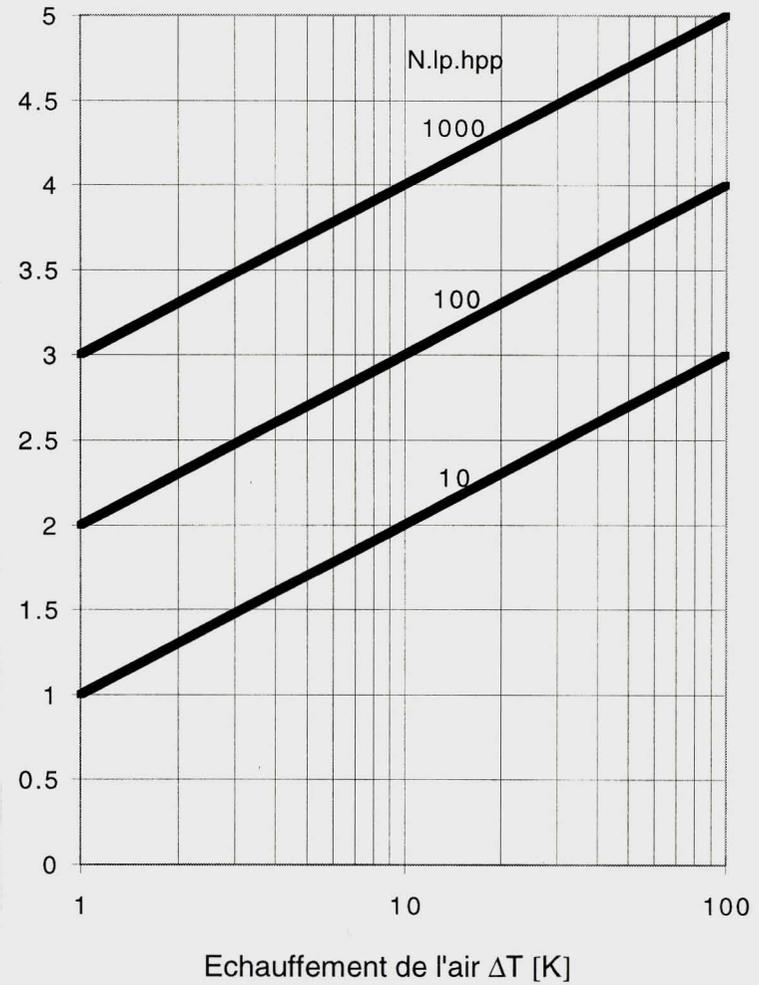
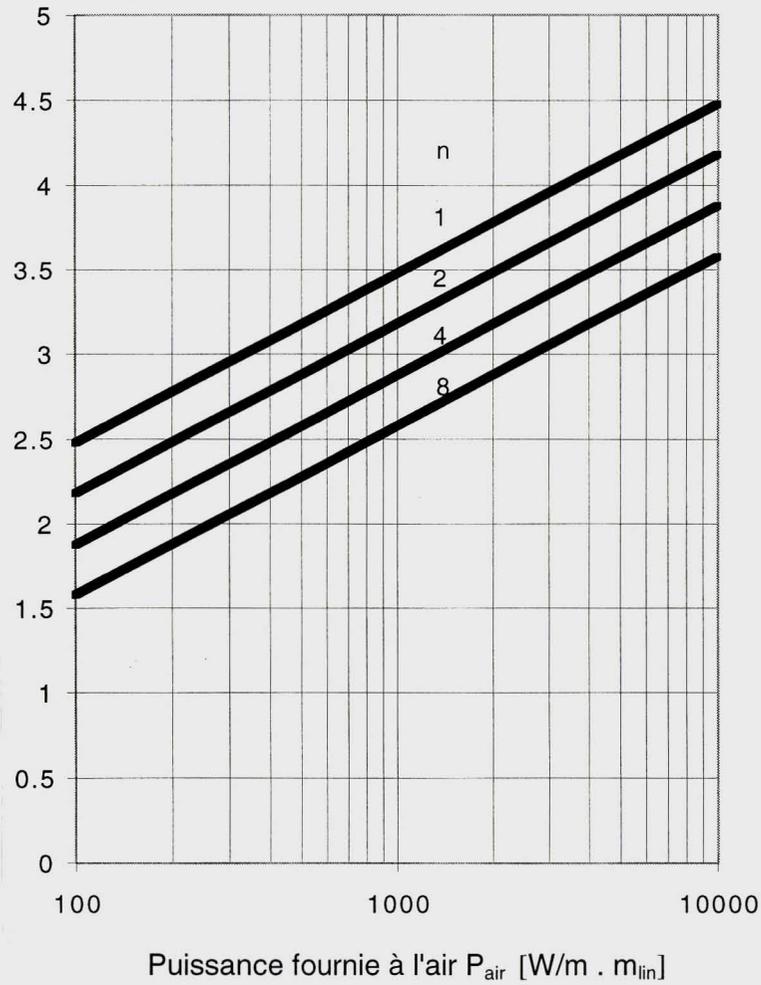
Abaque 4.4.3 : Ventilation naturelle traversante par la double-peau. Façade ensoleillée.

La capacité de ventilation dépend du débit par étage $n \cdot I_p \cdot h_{pp}$ [$m^3/h \cdot mlin$] et du "volume moteur" $A_{sup} \cdot \sqrt{h_t \cdot h_{étage}}$ [$m^3/mlin$].

Le nombre maximum d'étages ventilables est $N = N^* + h_t / 2 h_{étage}$.



Abaque 4.4.4 : Ventilation naturelle traversante par la double-peau. Façade ensoleillée.
 Le "volume moteur" nécessaire à assurer la ventilation de N étages dépend du débit par étage $n \cdot I_p \cdot h_{pp}$ [m³/h m_{lin}]
 et du nombre d'étages $N^* = N + h_t/2 h_{étage}$.



Abaque 4.4.5 : Estimation de l'échauffement de l'air dans le canal de la double-peau.
La puissance fournie à l'air est donnée par le produit $G_{air} \cdot h$ où h est la hauteur ensoleillée (h_t ou H).
 n est le taux de renouvellement d'air dans le volume ventilé [$1/h$].
 $N \cdot l_p \cdot h_{pp}$ est le volume ventilé [m^3/m_{iin}].

4.5 Bibliographie

4.5.1 Comptes rendus de conférences

- M.J. Holmes - Design for ventilation - 6th AIVC Conference, The Netherlands, 1985.
- M.J. Holmes, F. Cousins - Optimisation of the thermal and ventilation performance of naturally ventilated building façades - 13th AIVC Conference, Nice, France, 1992.
- Karl. T. Andersen - Natural ventilation in atria - ASHRAE Technical data bulletin, Volume 11, Number 3, San Diego, California, June 1995.
- Karl. T. Andersen - Theoretical considerations on natural ventilation by thermal buoyancy - ASHRAE Technical data bulletin Volume 11, Number 3, San Diego, California, June 1995.
- F. Flourentzou, J. Van der Maas, C.-A. Roulet - Experiments in natural ventilation for passive cooling - 17th AIVC Conference, Gothenburg, Sweden, 1996.
- Willigert Raatschen - Energy and ventilation performance of double-façade office buildings, BEP'94 Conference, York, 1994.
- Willigert Raatschen - TWINFACE - First results about a new developed double-façade system - 16th AIVC Conference, Palm Springs, California, 1995.
- A. Faist et S. Citherlet – Façades double-peau : Théorie et pratique - Energieforschung im Hochbau, Status Seminar 1996, EMPA-KWH.
- A. Faist – La ventilation des locaux par la façade double-peau – Energie et bâtiment, CISBAT'97, EPFL, Lausanne, oct. 1997.
- J.E. Emswiler - The neutral zone in ventilation. Trans. Amer. Soc. Heat. Vent. Eng. 32, pages 59-74, 1926.

4.5.2 Revues

- **Trans. Amer. Soc. Heat. Vent. Eng.**
J.E. Emswiler, The neutral zone in ventilation, vol 32, 1926, p. 59 –74.
- **Energy research**
M. Rubin - Calculating heat transfer through windows. Vol. 6, 1982.
- **Ki Luft und Kältetechnik**
Forum : Erfahrungen mit Doppel-beziehungsweise « Klima » - Fassaden. No 5/1996 ; 6/1996 ; divers auteurs.

C. Ziller et al. - Natürliche Belüftung eines Hochhauses mit Doppelfassade, No 8/1996.
- **Fassade - Façade**
Winfried Heusler et al. - Zweite-Haut-Fassaden, No 4/1995.
- **Solar Energy**
F. Mootz, J.-J. Beziau - Numerical study of a ventilated façade panel - Vol. 57, No 1/1996.

4.5.3 *Etudes, Rapports*

- A. Meletta, A. Wirz - Fallstudie Sanierung des ZTL - Gebäudes, Luzern. Zentralschweizerisches Technikum Luzern Inenienschule HTL - 1995.
- Ahmad Husaunndee - La ventilation hybride. Rapport de DEA, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambresis et Ecole des Mines de Douai, ITB/EPFL, 1995.
- Klaus Daniels et al. - Hochhäuser natürlich belüftet ? Neue Wege ökologischen Bauens bei hohen Gebäuden. HL - Technik AG, Wekbericht 11. München 70.
- Th. Frank - NEFF-Bericht Nr 266 - Oberflächentemperaturen von besonnten Fensterglasscheiben und ihre Auswirkungen auf Raumklima und Komfort, EMPA Dübendorf, 1986.
- ASHRAE Standard measurement guide : Section on temperature measurement, ASHRAE 41.1 - 74, 1974.

4.5.4 *Livres*

- Adrian Bejan - Convection heat transfer - ISBN 0-471-89612-8, John Wiley and Sons - New York.
- Innovative Fassadentechnologie - Institut für Licht- und Bautechnik, D - 51105 Köln.
- ASHRAE, Handbook of fundamentals, 1985.
- Philipp Oswald, Susanne Rexroth – Wohltemperierte Architektur – ISBN 3 – 7880-7533-3, CF. Müller verlag, Heidelberg, 1995.
- Klaus Daniels – Technologie des ökologischen Bauens – Birkhäuser Verlag, Basel.

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 contre façade étanche
 - 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
 - 5.2.1 Résultats : profondeur du canal $d = 0,6$ m
 - 5.2.2 Profondeur du canal $d = 0,15$ m
 - 5.3 Mesures in-situ
 - 5.3.1 Bâtiment des Telecom-PTT
 - 5.3.2 Bâtiment Felimob
 - 5.4 Annexes
 - 5.4.1 Centre industriel et artisanal "Marcinhès" Meyrin (GE)
 - 5.4.2 Modèle de laboratoire
 - 5.4.3 Bâtiment des Telecom-PTT
 - 5.4.4 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 : 300 exemplaires
Lausanne, juin 1998

Pour la
tranche

Erratum – Chapitre 4 – page 21

Les valeurs **tramées** ont été corrigées.

Type de vitrage	A_{sup}/A_{inf}	Profondeur	
		0,6 m	0,2 m
V ₁	1/1	15	13
	1/10	10	8
V ₃	1/1	13	12
	1/10	9	7

Valeurs prises par α_{canal}^* [W/m²K] en fonction du type de vitrage de la paroi et du rapport des ouvertures du canal.

V₁ Vitrage isolant 4/12/4

$\Lambda_1 = 6,5$ [W/m²K]

V₃ Vitrage triple avec couches K : 4K/12/4 K/12/4

$\Lambda_3 = 1,6$ [W/m²K]

En fonction de la hauteur du canal et du coefficient de décharge, les valeurs de α_{canal}^* données par le tableau ci-dessus sont à ajuster comme suit :

Hauteur < 10 m augmenter α_{canal}^* de 1 W/m²K

> 30 m diminuer de 1 W/m²K

Coefficient de décharge $c_d \leq 0,25$ diminuer de 1 W/m²K

$c_d \geq 0,35$ augmenter de 1 W/m²K

Tableau 4.1.1 : Coefficient de transfert thermique équivalent α_{canal}^* du canal de la double-peau.

ERRATUM – La façade double-peau – Chapitres 1 à 4

Page 5 (avant dernier paragraphe)

Lorsque la double-peau est fractionnée par la dalle d'étage, la ventilation se fait à travers la double-peau, étage par étage [6]. (Figure 2.3, variante a).

Page 12 (4^{ème} ligne, haut de la page)

$$A_{\text{sup}} = C_{d,H} \cdot A_H ; A_{\text{inf}} = C_{d,B} \cdot A_B \quad \text{remplace} \quad A_{\text{sup}} = C_{d,H} \cdot A_H ; A_{\text{inf}} = C_{d,B} ; A_B$$

Page 13 (2^{ème} tête de colonne du tableau 3.1.2 + légende)

G_{air} [W/m · m _{lin}]	P_{air} [W/m _{lin}]	ΔT [K]	D [m ³ /h · m _{lin}]	V_{Base} [m/s]	$\Delta T / P_{\text{air}}$ [K/kW]
50	500	2,2	682	0,76	4,4
100	1000	3,5	857	0,95	3,5
200	2000	5,5	1091	1,2	2,8
400	4000	8,8	1364	1,5	2,2

Tableau 3.1.2 : Double-peau contre façade étanche.
Débit, vitesse et échauffement de l'air en fonction de la puissance transmise à l'air (H = 10 m, T_B = 300 K, A_{sup}/A_{inf} = 0,5/ 0,25 m²/m_{lin})

Page 14 (3^{ème} paragraphe depuis le haut de la page)

- il faut que l'ouverture supérieure du canal de la double-peau ($A_{\text{sup}} = A_H \cdot C_{d,H}$) soit à même d'évacuer tout l'air extrait des différents étages,

Page 16

(+ $\frac{1}{2}$ ne se trouve pas dans la racine carrée)

$$N \leq \left(\frac{3600}{n \cdot l_p \cdot h_{pp}} \right)^{3/2} (A_{\text{sup}} \cdot h_t) \sqrt{\frac{G_{\text{air}} \cdot g \cdot h_{\text{étage}}}{\rho c_p \cdot T_{\text{en}} \cdot h_t}} + \frac{1}{2} \frac{h_t}{h_{\text{étage}}}$$

Tableaux 3.2.3 et 3.2.4 : remplacer toutes les valeurs indiquées.

G_{air} [W/m ²]	$N \leq$	N_{max}	H [m]	$\Delta T \geq$ [K]	P_{air} [W/m _{lin}]	$P/\Delta T$ [W/K . m _{lin}]
100	9,9	9	31,7	8	3170	403
200	13,8	13	44,9	15	8980	582
300	16,9	16	54,8	23	16440	717
400	19,4	18	61,4	31	24560	806

Tableau 3.2.3 : Immeuble ventilé au travers du canal double-peau. Pas d'ombrage

G_{air} [W/m ²]	$N \leq$	N_{max}	H [m]	$\Delta T \geq$ [K]	P_{air} [W/m _{lin}]	$P/\Delta T$ [W/K . m _{lin}]
100	12,8	12	42,9	8	4290	538
200	17,9	17	59,4	16	11880	762
300	21,8	21	72,6	23	21780	941
400	25,1	24	82,5	31	33000	1075

Tableau 3.2.4 : Immeuble ventilé au travers du canal double-peau. Pas d'ombrage.

Page 18 : § 3.3.1

(Dans ce paragraphe : remplacer peau intérieure par **peau extérieure**)

La peau **extérieure** vitrée diminue le rayonnement vers le ciel clair (cf. 4.1 ou 4.3). Les pertes par convection concernent principalement les échanges avec l'air du canal de la double-peau qui "lèche" la façade intérieure dans son mouvement ascendant et emporte un peu moins de la moitié de l'énergie. L'effet de protection de l'écran (peau **extérieure** vitrée) est d'autant meilleur que *l'isolation de la peau intérieure* est plus poussée.

Page 19 (3^{ème} paragraphe depuis le haut de la page - insertion des numéros de sous-chapitres)

Par soucis de clarté et de facilité de lecture, les deux types de façade envisagés (Double-peau contre façade étanche (4.1) et Double-peau assurant la ventilation des locaux (4.3)) sont présentés de façon totalement indépendante et ceci au prix d'un certain nombre de répétitions. Les différences essentielles entre ceux deux types sont les suivantes :

(Colonne de gauche – 4^{ème} énumération)

- La protection acoustique offerte par l'écran est faible, voire inexistante.

remplace

- La protection acoustique offerte par la double-peau est faible, voire inexistante.

Page 25 (Canal de la double-peau, 3^{ème} paragraphe)

La présence d'un caillebotis influence **d'une part les gains solaires et d'autre part** l'apport en lumière naturelle (cf. Lumière naturelle).

remplace

La présence d'un caillebotis influence l'apport en lumière naturelle (cf. Lumière naturelle).

Protections solaires

Des protections solaires efficaces (toile ou à lamelles) sont indispensables. Pour des raisons pratiques (et esthétiques) elles sont placées dans le canal de la double-peau.

Elles sont détachées de la façade afin de favoriser la circulation de l'air.

Page 26 (remplacer les 2 premiers paragraphes de la page par :)

Une façade double-peau correctement réalisée permet d'obtenir une amélioration de **la** protection contre les bruits extérieurs. Elle peut aussi maintenir une protection appréciable lorsque les fenêtres sont ouvertes. Cependant, selon sa mise en oeuvre, l'écran extérieur de la façade double-peau peut très bien n'apporter aucune protection supplémentaire contre les bruits extérieurs.

La prévision de l'affaiblissement acoustique d'une façade double-peau est complexe car **elle** **intègre** de nombreux paramètres. Il est erroné de croire que l'affaiblissement acoustique de la façade double-peau est la somme de ceux de la façade principale et de l'écran.

Page 27 (milieu de la page 3^{ème} et 4^{ème} énumérations)

Lumière naturelle

- accorder une attention particulière au linteau supérieur du vitrage de la façade (influence importante sur la pénétration de la lumière du jour dans le local), en réduisant la hauteur de ce dernier au minimum (**distance au plafond**);
- choisir un caillebotis de profondeur compatible avec la hauteur du linteau (18 cm de profondeur pour un linteau de 25 cm de hauteur par ex.), de façon à ce qu'il ne diminue pas la **partie** diffuse de la lumière du jour, provenant directement de la voûte céleste (**composante directe**), en plus du linteau.

Page 28 (dernier paragraphe)

La façade double-peau ne constituant pas un système d'éclairage naturel à proprement dit, l'autonomie en lumière naturelle du local est donc comparable à celle offerte par une façade conventionnelle, munie d'un contre-cœur et d'un double (**ou triple**) vitrage. L'autonomie du local reste donc très limitée : seule la première moitié de ce dernier bénéficie d'une autonomie non nulle dans le cas de vitrages clairs. Moins d'un tiers en bénéficie dans le cas de l'utilisation d'un verre teinté au niveau de la peau extérieure, d'où la nécessité d'éviter ce type de vitrage.

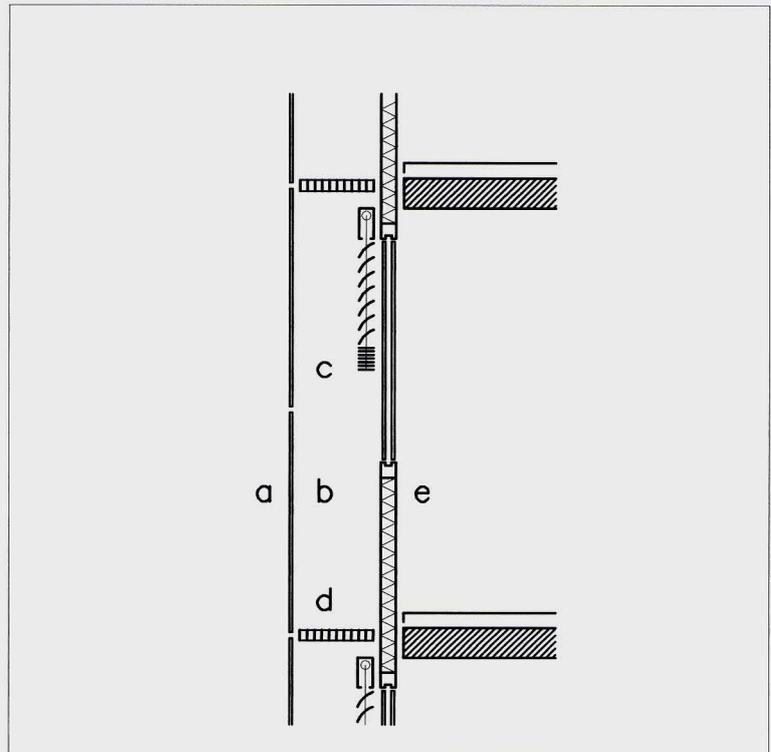
Page 29

- **Isolation thermique nocturne – Calcul de la valeur k**
L'isolation thermique de la façade intérieure est renforcée par la présence de l'écran. La circulation de l'air dans le canal de la double-peau limite toutefois le gain attendu et ceci même si le mouvement de l'air est freiné par la fermeture **des clapets aux différents étages**.
- L'augmentation *absolue* des pertes thermiques de la façade [W/m^2K] est quant à elle proportionnelle à la valeur k ainsi qu'à ΔR . Pour $k = 1 [W/m^2K]$ et $\Delta R = 25 [W/m^2]$, cette augmentation vaut $1,64 [W/m^2]$ et ceci quelle que soit la différence de température existant entre l'intérieur et l'extérieur.

Page 31 (dernier paragraphe de "Façade intérieure)

L'ouverture des clapets de ventilation **favorise** la propagation des bruits dans le canal de la double-peau et de là dans les locaux ou étages voisins (cf. Aspects acoustiques).

Shémas
rapport N. Faist.



- a ECRAN
- b CANAL
- c PROTECTION SOLAIRE
- d CAILLEBOTTIS
- e FACADE INTERIEURE

Fig. 2.1
FACADE DOUBLE-PEAU

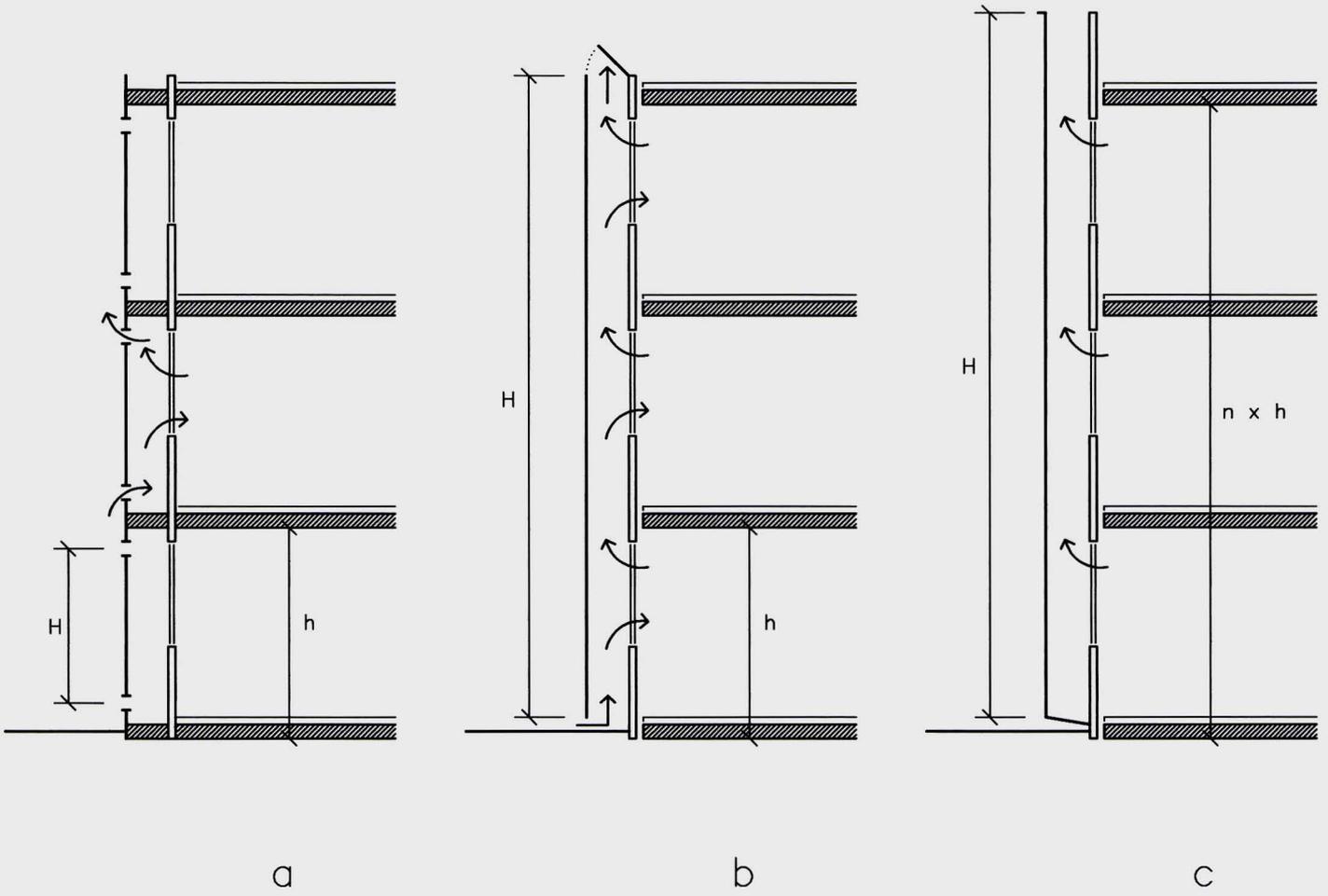


Fig. 2.3
CANAL DE LA DOUBLE-PEAU

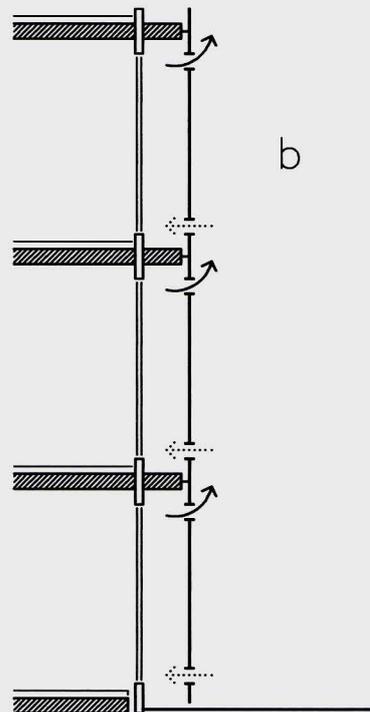
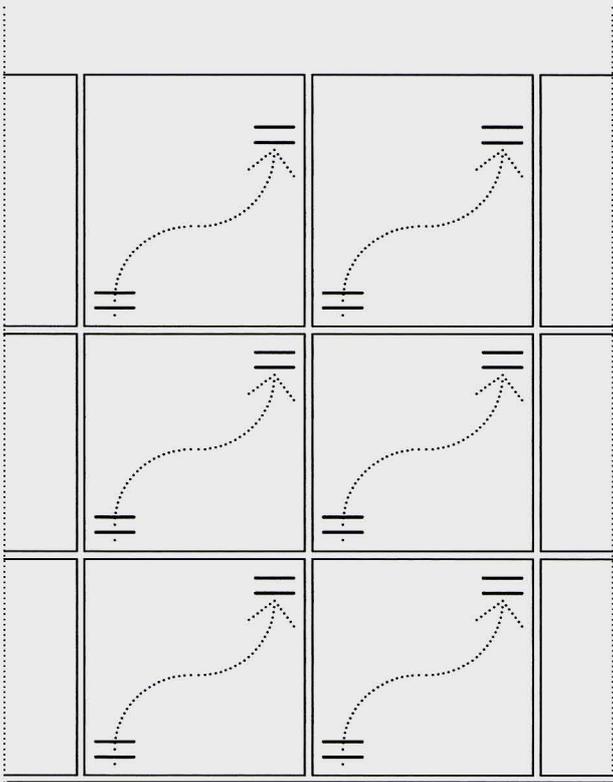
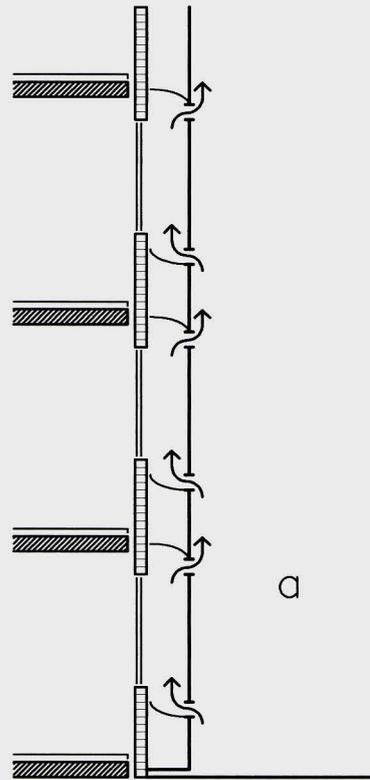
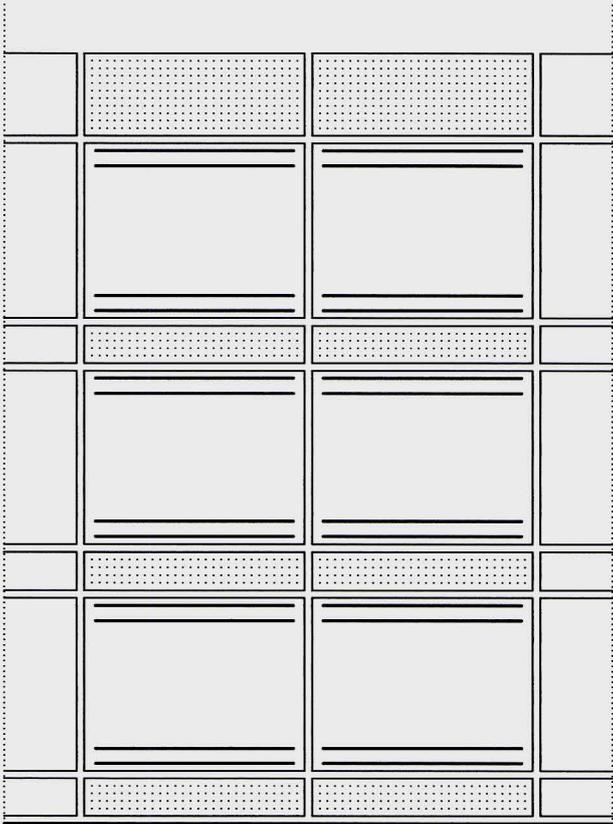


Fig. 2.4
VENTILATION DE LA DOUBLE-PEAU ETAGE PAR ETAGE

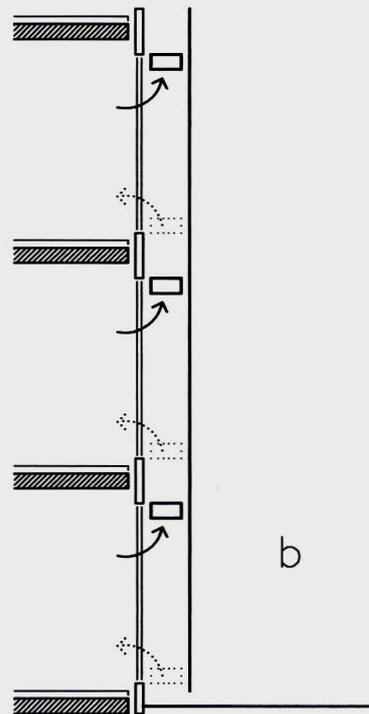
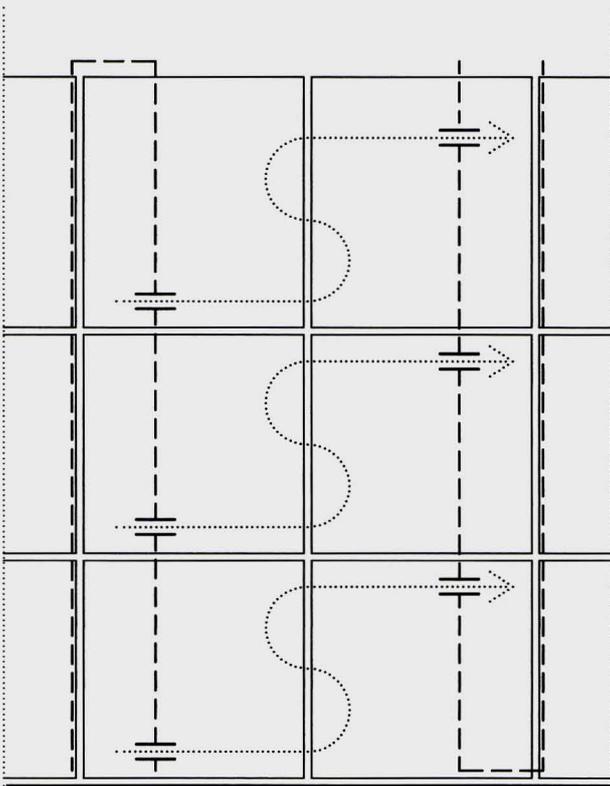
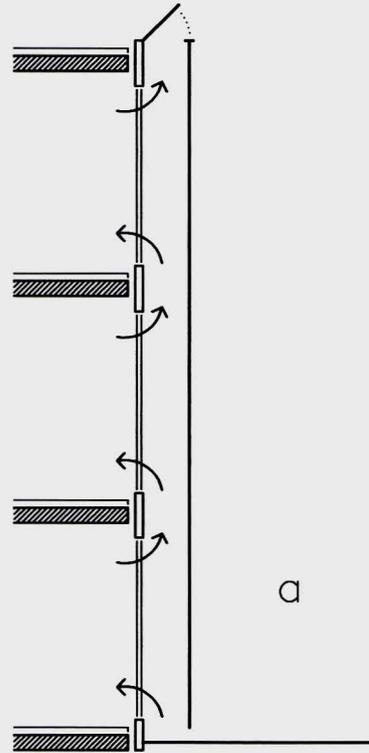
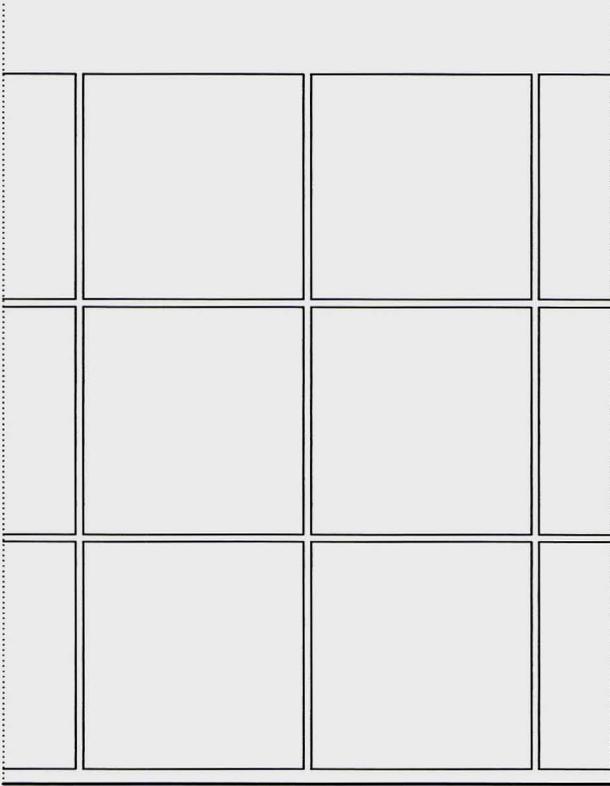


Fig. 2.5
VENTILATION DE LA DOUBLE-PEAU SUR PLUSIEURS ETAGES

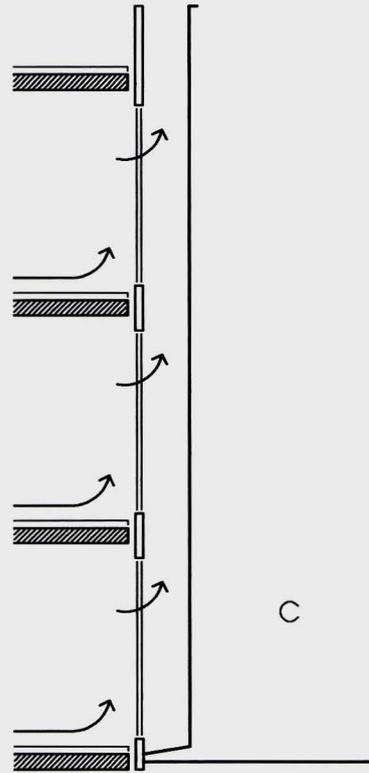
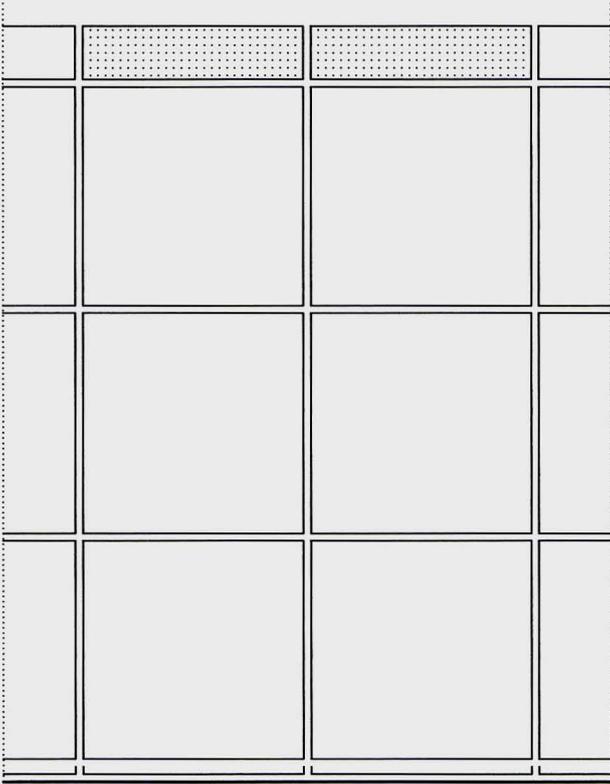


Fig. 2.5
VENTILATION DE LA DOUBLE-PEAU SUR PLUSIEURS ETAGES

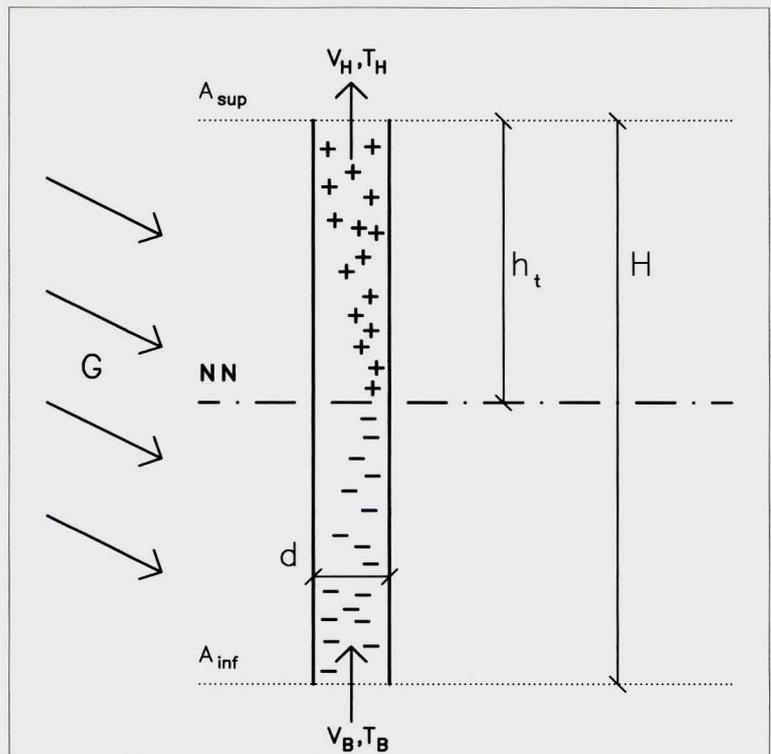


Fig. 3.1
 PRINCIPE DE DOUBLE-PEAU CONTRE FACADE ETANCHE

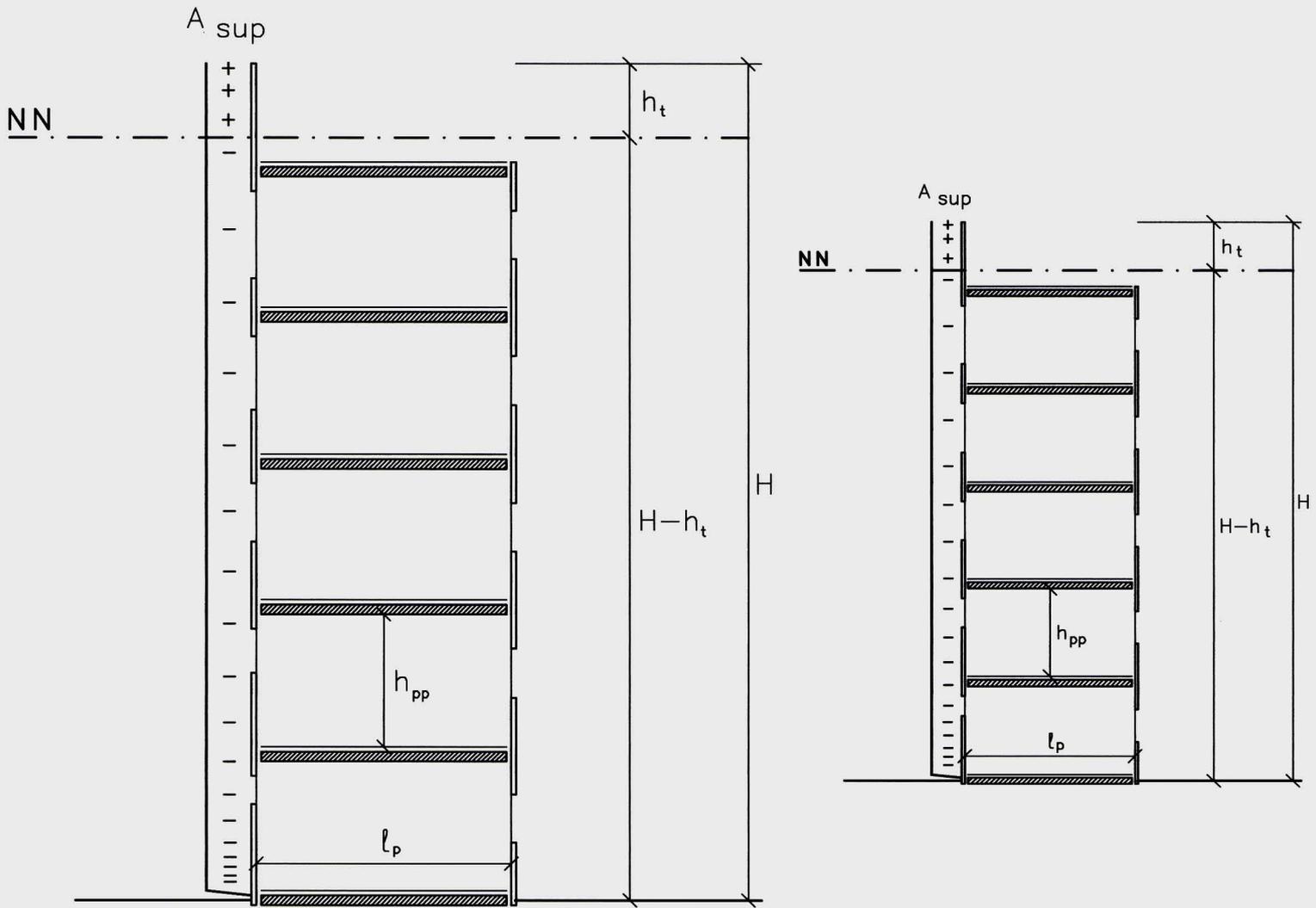


Fig. 3.2.1
 VENTILATION DES LOCAUX PAR LA DOUBLE-PEAU

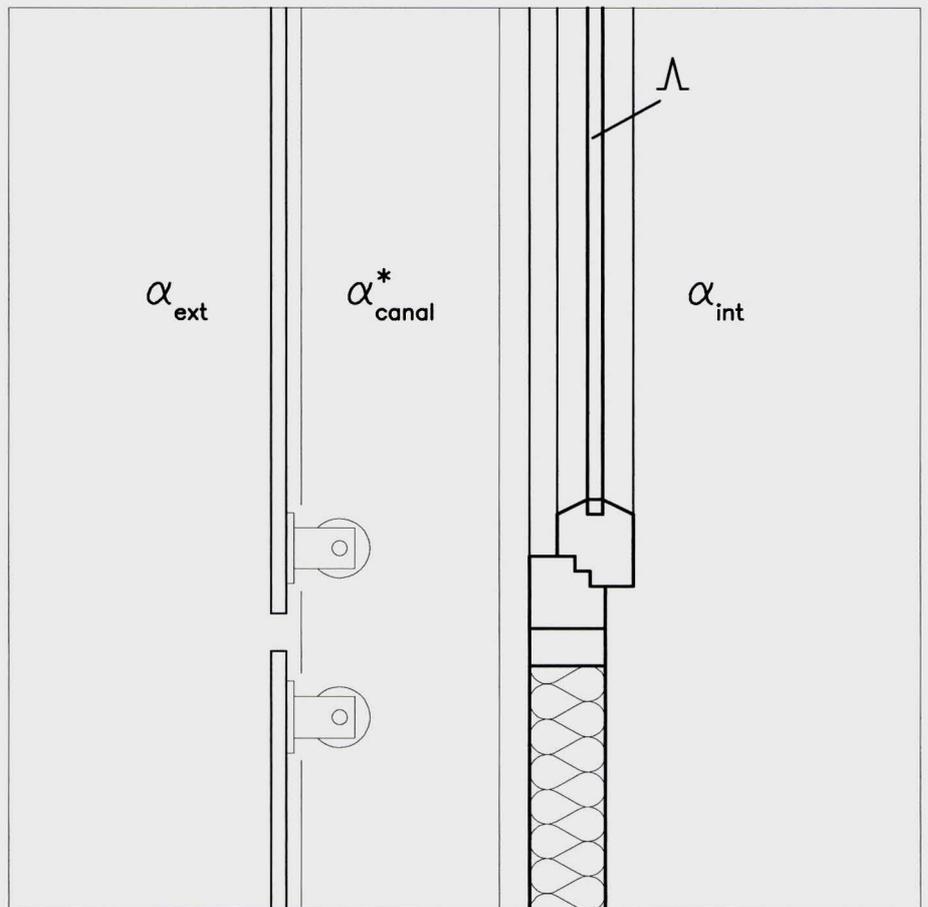


Fig. 4.1.1
COEFFICIENT DE TRANSFERT THERMIQUE EQUIVALENT (α^*_{canal})
DU CANAL DE LA DOUBLE-PEAU

Catherine

EX	Fig	2.1	ok	
		2.2	réduction	80%
		2.3	red.	80%
		2.4		80%
		2.5		60%
		3.1	h indice t	h_t
		3.2.1	ok (eulerer	Aint)
		4.1		

2 ex

EXT.