

* Prof. André P. Faist

Evolution dans la construction de façades

LA FAÇADE DOUBLE-PEAU

Le verre en tant que matériau architectural exerce actuellement une véritable fascination sur les architectes.

Ses remarquables qualités de transparence se doublent de nos jours de qualités mécaniques qui permettent les mises en œuvre les plus spectaculaires et les réalisations les plus frappantes.

Introduction

Toute médaille ayant son revers, les constructions fortement vitrées sont toutefois le siège de forts et rapides changements d'apports ou de pertes thermiques qui se traduisent par de rapides variations de la température intérieure, variations qu'il est difficile de maîtriser sans le recours à une installation de conditionnement du climat intérieur. A ces problèmes de nature thermique s'ajoutent entre autre les contraintes de protection acoustique contre les bruits extérieurs et de ventilation des locaux en façade.

En protégeant la façade principale – en général fortement vitrée – par un écran transparent, on forme une façade double-peau (en allemand *Zweite-Haut-Fassade* ou en anglais *doubleskin wall*) grâce à laquelle on peut espérer atténuer – voire résoudre – les problèmes thermiques, acoustiques et de ventilation évoqués ci-dessus.

Un travail de recherche mené à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne a permis de préciser les limites dans lesquelles et sous quelles conditions une façade double-peau peut apporter une solution aux problèmes cités.

Le projet «double-peau»

La base du travail poursuivi à l'EPFL est à rechercher dans les travaux de M. J. Holmes² qui dès 1985 exposait les possibilités remarquables des façades double-peau. Le projet de recherche «double-peau»³ a permis de préciser et prolonger l'analyse théorique de ces façades, de procéder à des mesures in-situ et en laboratoire et d'effectuer des études paramétriques prenant pour base un modèle mathématique sur ordinateur. Ces dernières ont permis de préciser un certain nombre de règles pratiques qui présentent un intérêt majeur tant pour l'architecte qui envisage d'équiper son bâtiment d'une façade double-peau que pour l'ingénieur qui sera chargé du dimensionnement final de cet élément en vue d'un fonctionnement correct du système.

Éléments principaux et leur interaction

La façade double-peau se compose (fig. 1) d'un écran placé devant la façade intérieure

(ou façade principale). L'espace ainsi délimité constitue le canal de la double-peau, canal dont la profondeur permettra – ou non – le nettoyage des surfaces vitrées. Les différents éléments qui forment la façade double-peau influencent les performances de la façade – et du bâtiment – sous les divers aspects du bilan énergétique, des confort thermique, visuel et acoustique et de la ventilation naturelle des locaux (tableau 1). On notera la prédominance des influences en saison chaude.

Typologie

Le recensement des réalisations et des projets de façades double-peau^{4/5} fait apparaître d'une part une classification de la position des éléments (principalement le brise-soleil) et d'autre part une classification du mode de ventilation du canal de la double-peau et des locaux attenants. Lorsqu'il est présent, le brise-soleil est généralement placé dans le canal de la double-peau (où il est à l'abri des intempéries), et plus rarement dans le local lui-même (fig. 2).

En coupe, on voit que le principal soucis est celui de la ventilation du canal de la double-peau et des locaux attenants. Cette ventilation peut se faire étage par étage (fig. 3a), sur la hauteur de l'immeuble (fig. 3b) ou en mode d'extraction uniquement (fig. 3c). Lorsque la ventilation se fait étage par étage, différentes astuces (fig. 4) permettent d'éviter que l'air extrait d'un local ne contamine l'air frais qui alimente le local suivant.

¹ A. Faist – Incidence de la typologie des façades double-peau sur leurs performances énergétiques et en physique du bâtiment. (Zusammenhang zwischen der Typologie von Zweite-Haut-Fassade und ihrem energetischen und bauphysikalischen Verhalten.) Projet soumis à l'OFEN, février 1993.

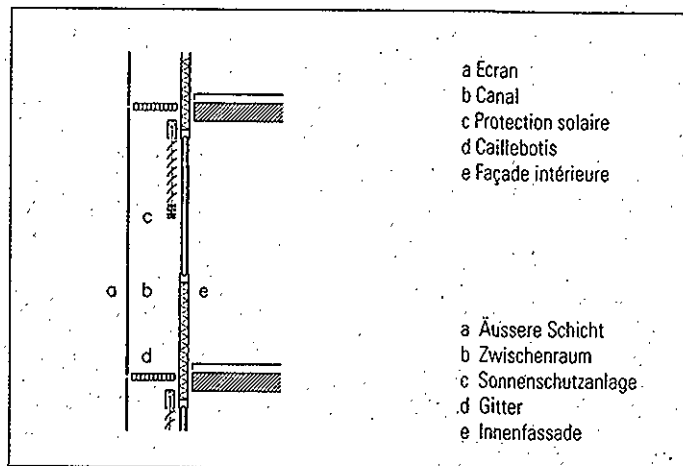
² M. J. Holmes – Design for ventilation – 6th AIVC Conference, The Netherlands, 1985.

³ A. Faist et al. La façade double-peau. Rapport final du projet OFEN, EPFL, 1998.

⁴ A. Faist et al. La façade double-peau, chap. 10, Dossier Typologie et Réalisations, EPFL, 1998.

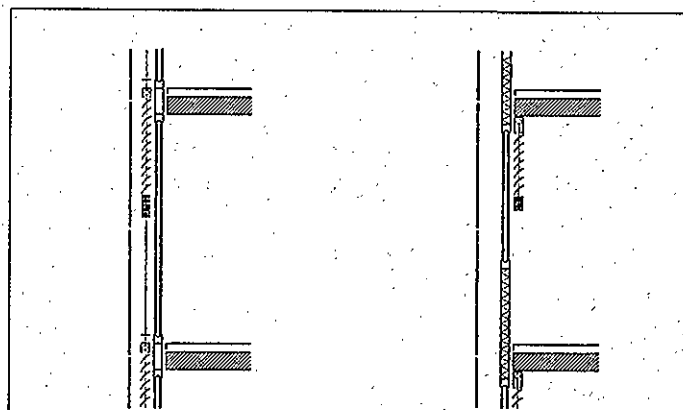
⁵ Werner Lang, Dipl.-Ing. Architekt. Zur Typologie mehrschaliger Gebäudehüllen aus Glas. Communications personnelles.

* Prof. André P. Faist,
Institut de technique du bâtiment –
ITB-LESO-PB, EPFL,
CH-Lausanne



1 Façade double-peau.

1 Zweite-Haut-Fassade.

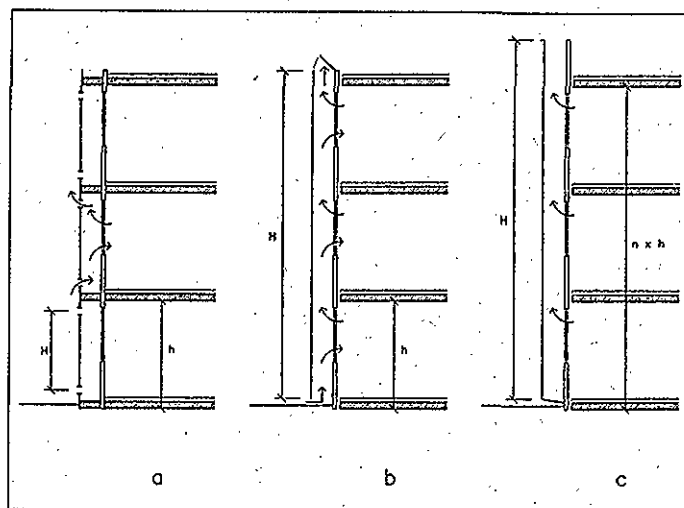


Lorsqu'elle est présente, la protection solaire peut être disposée dans le canal de la double-peau (a) ou dans le local (b). La façade intérieure peut être entièrement vitrée (a) ou comporter un contre-cœur opaque (b).

Falls vorhanden, kann der Sonnenschutz im Zwischenraum (a) oder im Innenraum (b) angebracht werden. Die Innenfassade kann komplett verglast sein (a) oder eine opake Brüstung (b) aufweisen.

2 Protection solaire.

2 Sonnenschutz.



3 Canal de la double-peau - Typologie en coupe verticale.

3 Zwischenraum der Zweite-Haut-Fassade - Typologie im vertikalen Schnitt.

- a) $H < h$ Le canal est fractionné étage par étage. La ventilation se fait de même.
- b) $H > h$ Le canal s'étend sur plusieurs étages et est muni d'ouvertures à sa base et au sommet.
- c) $H > n \cdot h$ Le canal dépasse le dernier étage. Une ventilation des locaux en extraction par le canal peut être envisagée.

- a) $H < h$ Der Zwischenraum ist nach Etagen aufgeteilt. Die Belüftung erfolgt auf die gleiche Weise.
- b) $H > h$ Der Zwischenraum erstreckt sich über mehrere Etagen und verfügt über obere und untere Öffnungen.
- c) $H > n \cdot h$ Der Zwischenraum ist höher als die letzte Etage. Eine Belüftung der Räume durch Entspannung verbrauchter Luft im Zwischenraum ist möglich.

Dans le cadre du projet «double-peau», nous avons retenu deux familles d'exécution: dans la première, le canal qui s'étend sur toute la hauteur du bâtiment est muni d'ouvertures à sa base et à son sommet. La ventilation des locaux ne se fait qu'accessoirement par ouverture des fenêtres: la façade qui limite le canal est considérée comme étanche par rapport à celui-ci. Dans la seconde famille, le canal dépasse la hauteur de dernier étage et est fermé à sa base. La ventilation (traverse) des locaux est assurée par le tirage du canal de la double-peau.

Après avoir exposé le principe de base du fonctionnement du système «double-peau», nous précisons les propriétés et limitations de ces deux familles.

Principe de fonctionnement

En situation hivernale ou plus généralement en présence de rayonnement solaire, le canal de la double-peau contient de l'air plus chaud que l'air ambiant. En raison de la différence de densité (entre l'air chaud du canal et l'air plus frais de l'extérieur), il se développe un effet de cheminée (stack effect) qui met l'air du canal en mouvement (fig. 5).

On observe les phénomènes suivants:

- Il se développe une dépression à la base du canal et une surpression à son sommet. Il existe par conséquent une zone neutre à la hauteur de laquelle les pressions (à l'intérieur du canal et à l'extérieur de celui-ci) sont égales. Cette zone s'élève si l'ouverture inférieure du canal est plus petite que l'ouverture supérieure. Elle s'abaisse dans le cas contraire.
- L'air n'est pas chauffé directement par le rayonnement solaire, mais au contraire par l'écran, la paroi intérieure, le store ainsi que tous les obstacles (caillebotis, structure porteuse, ...) qui meublent le canal.
- L'augmentation de température de l'air dans le canal ainsi que le débit de cet air dépendent de la puissance effectivement transmise à l'air (par conduction et convection). Le débit d'air ne croît que lentement en fonction de la puissance: il double si celle-ci est multipliée par huit (proportionnel à $P_{air}^{1/3}$). L'élévation de température quant à elle est multipliée par 4 dans les mêmes conditions (proportionnelle à $P_{air}^{2/3}$). Ces lois sont illustrées par l'exemple du tableau 2.

Propriétés générales

Les deux familles étudiées présentent des propriétés communes que nous allons énon-

cer ci-après, ainsi que des propriétés particulières qui feront l'objet des paragraphes suivants. Nous citerons dans les deux cas un certain nombre d'exigences qui découlent de ces propriétés.

Isolation thermique – Calcul de la valeur k (Uvalue)

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 (Uvalue) 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. Ces dernières ne dépendent que faiblement de la hauteur du canal ou du coefficient de décharge c_d .

Les pertes supplémentaires par rayonnement d'une surface verticale vers le ciel⁶ se montent à $\Delta R = 25 \text{ [W/m}^2\text{]}$ par ciel partiellement couvert. L'augmentation absolue des pertes thermiques de la façade est proportionnelle à la valeur k (calculée comme indiqué ci-dessus) ainsi qu'à ΔR . Pour $k = 1 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ et $\Delta R = 25 \text{ [W/m}^2\text{]}$, cette augmentation vaut $1,64 \text{ [W/m}^2\text{]}$, 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) en hiver par ciel couvert (avec éclairage

Tableau 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.

Tabelle 1: Einfluss der verschiedenen Elemente und Faktoren auf die Funktion einer Zweite-Haut-Fassade. Ein Einfluss ist normalerweise häufiger und ausgeprägter in der warmen Jahreszeit als in der kalten Jahreszeit festzustellen.

Élément ou facteur d'influence <i>Faktor oder Element</i>	Bilan énergétique <i>Energiebilanz</i>		Confort thermique <i>Wärme-komfort</i>		Lumière naturelle Confort visuel <i>Natürliches Licht Sichtkomfort</i>	Bruit Confort acoustique <i>Lärm Akustischer Komfort</i>	Ventilation naturelle des locaux <i>Natürliche Belüftung der Räume</i>
	Saison froide <i>Kalte Jahreszeit</i>	Saison chaude <i>Warme Jahreszeit</i>	Saison froide <i>Kalte Jahreszeit</i>	Saison chaude <i>Warme Jahreszeit</i>			
Nature de l'écran vitré (peau extérieure) <i>Art der Glasabschirmung (Aussenwand)</i>	-	-	-	-	XX	X	-
Nature des vitrages de façade (peau intérieure) <i>Art der Fassadenscheiben (Innenwand)</i>	XX	XX	XX	XX	XX	X	-
Distance écran-façade <i>Abstand Abschirmung - Fassade</i>	X	XX	X	XX	X	X	X
Hauteur du canal <i>Höhe des Zwischenraums</i>	X	XX	X	XX	-	-	XX
Taux de vitrage de la façade (peau intérieure) <i>Anteil der Verglasung an der Fassade (Innenwand)</i>	X	XX	X	XX	XX	X	-
Protections solaires <i>Sonnenschutz</i>	X	XX	X	XX	XX	-	-
Ventilation de la double-peau <i>Belüftung der Zweite-Haut-Fassade</i>	X	XX	X	XX	-	X	XX

Tableau 2: Double-peau contre façade étanche.

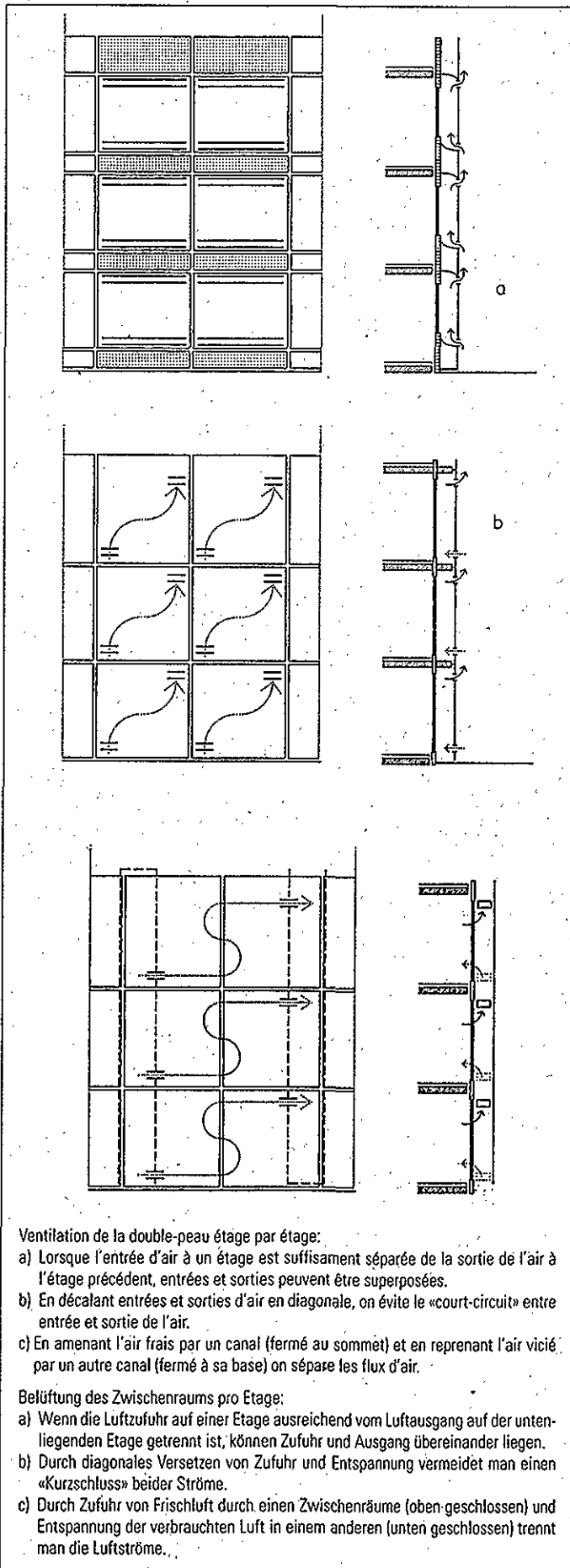
Débit, vitesse et échauffement de l'air en fonction de la puissance transmise à l'air. L'élévation de température ΔT de l'air dans le canal est proportionnelle à $P_{\text{air}}^{2/3}$ alors que le débit varie proportionnellement à $P_{\text{air}}^{1/3}$.
($H = 10 \text{ m}$, $T_B = 300 \text{ K}$, $A_{\text{sup}}/A_{\text{inf}} = 0,5/0,25 \text{ m}^2/\text{m}_{\text{lin}}$)

Tabelle 2: Zweite-Haut-Fassade gegen dichte Fassade.

Durchfluss, Geschwindigkeit und Erwärmung der Luft in Abhängigkeit von der Leistung, die auf die Luft übertragen wird. Die Temperaturerhöhung Δt der Luft im Zwischenraum ist proportional zu $P_{\text{Luft}}^{2/3}$, während der Durchfluss sich proportional zu $P_{\text{Luft}}^{1/3}$ verhält.
($H = 10 \text{ m}$, $T_a = 300 \text{ K}$, $A_{\text{oben}}/A_{\text{unten}} = 0,5/0,25 \text{ m}^2/\text{m}_{\text{unten}}$)

G_{air} [W/m _{lin}] <i>G_{Luft}</i> [W/m _{unten}]	P_{air} [W/m _{lin}] <i>P_{Luft}</i> [W/m _{unten}]	ΔT [K] <i>DT</i> [K]	D [m ³ /h _{lin}] <i>D</i> [m ³ /h _{unten}]	V_{base} [m/s] <i>V_{basis}</i> [m/s]	$\Delta T/P_{\text{air}}$ [K / k W] <i>$\Delta T/P_{\text{Luft}}$</i> [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

⁶ Th. Frank, NEFF-Bericht Nr. 266 – Oberflächentemperaturen von besonnten Fensterglasscheiben und ihre Auswirkungen auf Raumklima und Komfort, EMPA, Dübendorf, 1986.



artificiel) ou par ciel dégagé (pas d'éclairage artificiel). Par temps plus clément, des protections solaires deviennent indispensables.

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'autonomie en éclairage naturel.

Un store (en 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 solaire incident 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 $2 \text{ }^\circ\text{C}$.

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 de la façade intérieure et à retarder les gains à travers les éléments opaques en augmentant le déphasage thermique du contre-cœur.

Lumière naturelle⁷

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

⁷ Lumière naturelle, chap. 10, Dossiers D. Lymberis et J.-L. Scartezini, EPFL 1998.

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:

- 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 l'emprise de ce dernier au minimum;
- choisir la nature et la position du caillbotis de façon à ce qu'il ne diminue pas la composante diffuse de la lumière du jour provenant directement de la voûte céleste.

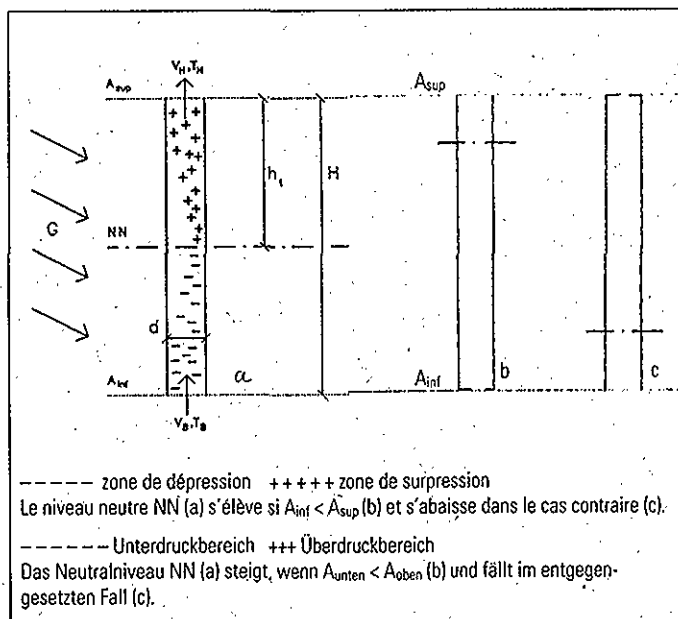
Aspects acoustiques⁸

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 œuvre, 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 (fig. 6). Pour ces raisons, il est risqué de planifier des performances d'affaiblissement réduites pour la façade principale sans consulter un acousticien.

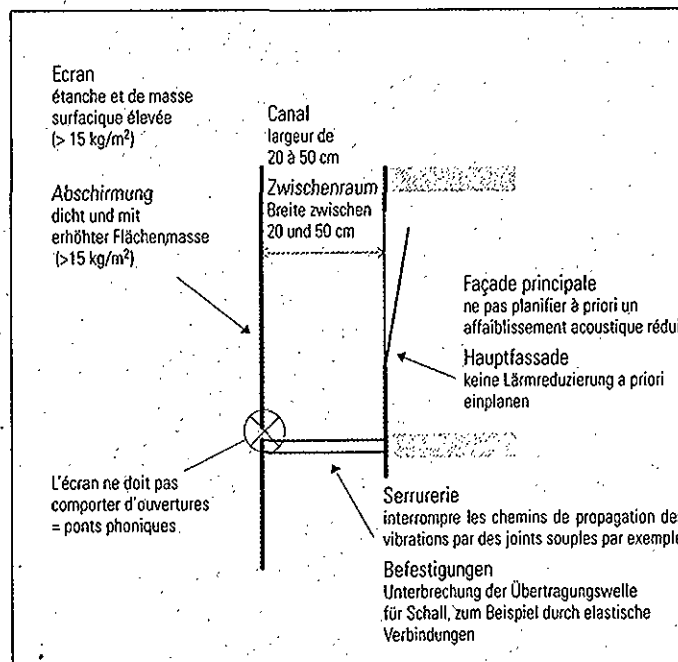
Les directives générales pour qu'une façade double-peau améliore la protection contre les bruits extérieurs sont:

- 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



5 Principe de la double-peau.

5 Funktionsweise der Doppelwand.



6 Critères acoustiques.

6 Akustische Kriterien.

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.

Double-peau contre façade étanche (famille 1)

Les propriétés particulières de ce type de façade et les exigences qui en découlent sont les suivantes:

Dans cette exécution, le canal de la double-peau est en dépression aux étages inférieurs (sous le niveau neutre) et en surpression aux étages supérieurs (au-dessus du niveau neutre). Dans ces conditions, la ventilation des locaux en direction du canal de la double-peau devient problématique: en présence de rayonnement solaire, les étages supérieurs reçoivent l'air chaud rejeté par les étages inférieurs et, mis à part l'action possible du vent, l'ouverture de clapets aménagés dans l'écran ne modifie pas radicalement cette situation.

⁸ Aspects acoustiques, chap. 10, Dossiers W. Koeller et M. Rossi, EPFL 1998.

Tableau 3: Double-peau contre façade étanche (famille 1).

Etant donné l'intensité transmise à l'air G_{air} et la hauteur H du canal, l'élévation de température ΔT de l'air du canal sera une fonction de la section effective totale A du canal.

Tabelle 3: Zweite-Haut-Fassade gegen dichte Fassade (Typ 1).

Bei einer auf die Luft übertragenen Leistung G_{Luft} und einer Höhe H des Zwischenraums hängt die Temperaturerhöhung ΔT der Luft des Zwischenraums vom Gesamtwirkquerschnitt A des Zwischenraums ab.

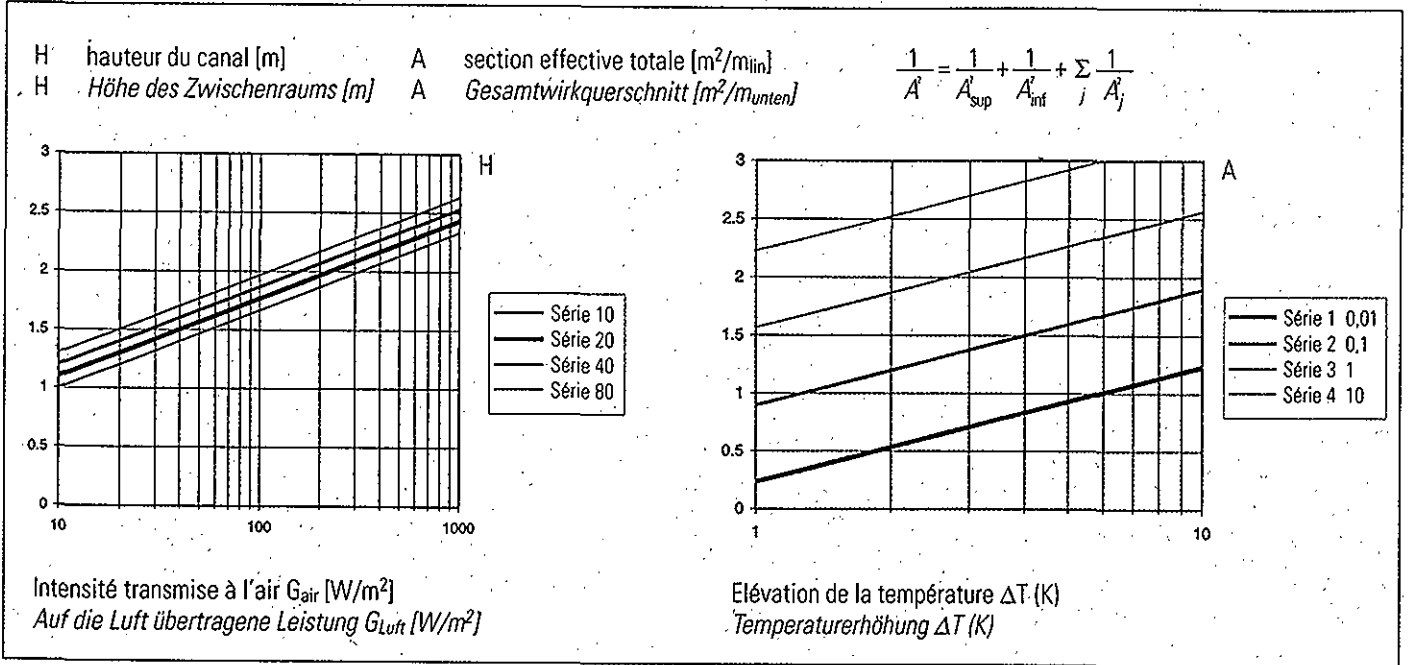
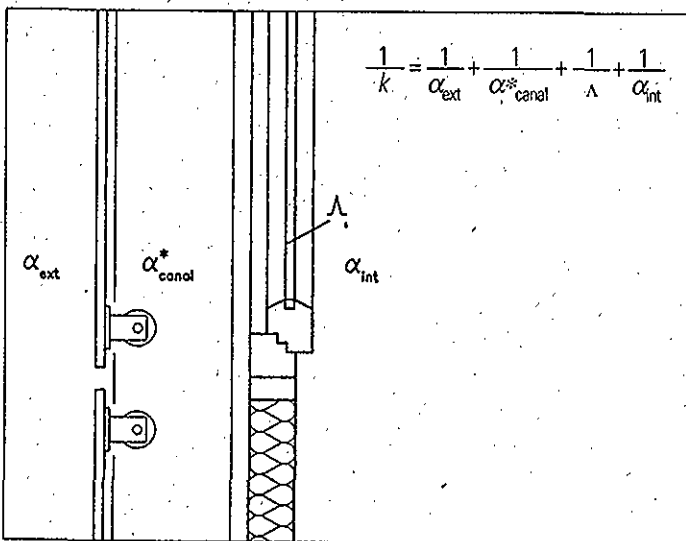


Tableau 4: Coefficient de transfert thermique équivalent α_{canal} du canal de la double-peau.

Tabelle 4: Thermischer Übertragungskoeffizient α_{kanal} des Zwischenraums der Zweite-Haut-Fassade.



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

- V₁ Vitrages isolant 4/12/4 $\Lambda_1=6,5$ [W/m²K]
- V₃ Vitrage triple avec couches K: 4K/12/4K/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

Werte durch α_{kanal} [W/m²K] in Abhängigkeit von der Verglasungsart der Wand und dem Versatz der Zwischenraum-Öffnungen.

- V₁ Isolierglas 4/12/4 $\Lambda_1=6,5$ [W/m²K]
- V₃ Dreifachglas mit K-Schichten: 4K/12/4K/12/4 $\Lambda_3=1,6$ [W/m²K]

In Abhängigkeit von der Höhe des Zwischenraums und des Ableitkoeffizienten sind die Werte für α_{kanal} in der Tabelle folgendermassen zu berichtigen:

- Höhe < 10 m Anheben von α_{kanal} um 1 W/m²K
- > 30 m Senken um 1 W/m²K
- Ableitkoeffizient $c_a \leq 0,25$ Senken um 1 W/m²K
- $c_a \geq 0,35$ Anheben um 1 W/m²K

Type de vitrage Art der Verglasung	$\frac{A_{sup}}{A_{inf}}$ $\frac{A_{oben}}{A_{unten}}$	Profondeur Tiefe	
		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

Tableau 5: Immeuble ombragé ventilé au travers du canal d'une double-peau. Le tableau 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. Hauteur ensoleillée $h_t = 2$ m, Taux de renouvellement d'air $n = 6 \text{ h}^{-1}$. Hauteur d'étage $h_{pp} = 2,8$, profondeur $l_p = 8$ m. Ouverture supérieure effective $A_{sup} = 0,6 \cdot 0,84 = 0,5 \text{ m}^2/\text{m}_{lin}$.

Table 5: Beschattetes Gebäude, das mit einem Zwischenraum belüftet wird. Die Tabelle gibt die maximale Anzahl der Etagen, die Gesamthöhe des Zwischenraums und die Lufterwärmung an. Man stellt in der letzten Spalte fest, dass die Wärmeleistung der Ableitung entsprechend der Lufterwärmung mit der Leistung, die an die Luft übertragen wird, zunimmt. Besonnte Höhe $h_t = 2$ m, Luftaustauschrate $= 6 \text{ h}^{-1}$. Etagenhöhe $h_{pp} = 2,8$, Tiefe $l_p = 8$ m. Obere tatsächliche Öffnung $A_{oben} = 0,6 \cdot 0,84 = 0,5 \text{ m}^2/\text{m}_{unten}$.

G_{air} [W/m \cdot m $_{lin}$] G_{Luft} [W/m \cdot m $_{oben}$]	$N \leq$	N_{max} étages N_{max} Etagen	H_{tot} [m] H_{gesamt} [m]	ΔT [K] ΔT [K]	P_{air} [W/m $_{lin}$] P_{Luft} [W/m $_{oben}$]	$P/\Delta T$ [W/K \cdot m $_{lin}$] $P/\Delta T$ [W/K \cdot m $_{oben}$]
25	2,4	2	8,6	0,6	50	90
50	3,0	3	11,9	0,7	100	134
100	3,8	3	11,9	1,5	200	134
200	4,8	4	15,2	2,2	400	179

Tableau 6: Immeuble ventilé au travers du canal d'une double-peau. Pas d'ombrage. Mêmes données que celles du tableau précédent.

Table 6: Mit einem Zwischenraum belüftetes Gebäude. Ohne Beschattung. Gleiche Daten wie in der oberen Tabelle.

G_{air} [W/m \cdot m $_{lin}$] G_{Luft} [W/m \cdot m $_{oben}$]	$N \leq$	N_{max} étages N_{max} Etagen	H_{tot} [m] H_{gesamt} [m]	ΔT [K] ΔT [K]	P_{air} [W/m $_{lin}$] P_{Luft} [W/m $_{oben}$]	$P/\Delta T$ [W/K \cdot m $_{lin}$] $P/\Delta T$ [W/K \cdot m $_{oben}$]
25	5,1	5	18,5	2,1	463	224
50	7,1	7	25,1	4,0	1255	314
100	9,9	9	31,7	7,9	3170	403
200	13,8	13	44,9	15,4	8980	582

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.

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.

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 appréciable sur les mouvements d'air.

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.

Protections solaires

Des protections solaires efficaces (en toile ou à lamelles) sont indispensables. Pour des rai-

sons pratiques (et esthétiques) elles sont placées dans le canal de la double-peau.

Double-peau assurant la ventilation des locaux (famille 2)

Dans cette famille, le canal de la double-peau est étanche à sa base et dépasse de 2 à 3 mètres le niveau du dernier étage. 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 de la double-peau au travers des clapets d'étage. Le taux de renouvellement d'air s'adapte automatiquement à l'intensité du rayonnement solaire.

Façade intérieure

Elle suit les mêmes règles de dimensionnement que celles énoncées ci-dessus, mais comporte en plus des clapets situés au-dessus des fenêtres et dimensionnés étage par étage, clapets qui permettent l'évacuation de l'air vicié par le canal de la double-peau. (Des entrées d'air frais seront aménagées côté couloir.)

Canal de la double-peau

Le dimensionnement correct de l'ouverture supérieure A_{sup} du canal est un facteur clé du fonctionnement du système. Il se fait 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),
- nombre d'étages ventilés,
- intensité solaire transmise à l'air.

Le «moteur» de la ventilation naturelle d'une façade ombragée est constitué par le «volume moteur» de profondeur A_{sup} et de hauteur h_t alimenté par l'intensité solaire transmise à l'air. Un prédimensionnement peut se faire à l'aide d'abaques ou en portant les équations correspondantes sur une feuille de calcul d'ordinateur.

Lorsque la façade est uniformément ensoleillée, le nombre maximum d'étages ventilables augmente, de même que la température de l'air dans le canal de la double-peau. Celle-ci devient le critère qui limite le nombre d'étages. Les tableaux 5 et 6 illustrent ceci.

Le canal de la double-peau propage les sons horizontalement et verticalement, ce qui peut conduire à une gêne acoustique.

Protections solaires

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

Conclusions

Le domaine de la façade double-peau est en plein développement, il poursuit une évolution qui devrait permettre de mettre en évidence les solutions qui offrent les meilleurs compromis entre avantages et inconvénients. L'étude brièvement présentée ci-dessus met clairement en évidence les conséquences majeures de la configuration double-peau sur les conditions de travail en saison estivale. La protection offerte par l'écran vitré extérieur conduit à une amélioration du bilan thermique hivernal, mais contribue également à augmenter les risques de surchauffe en périodes chaudes. Pour limiter ce danger, il est essentiel de fixer très tôt les objectifs poursuivis: bilan énergétique, protection acoustique, esthétique, ventilation des locaux... Une fois ceux-ci fixés, on sera automatiquement orienté vers une famille de solutions à l'intérieur de laquelle la forme adéquate sera choisie et dimensionnée. Nous espérons que notre travail permettra de faciliter ce choix. □

Entwicklung im Fassadenbau

Prof. André P. Faist Institut für Gebäude-technik – ITB-LESO-PB, EPFL, CH-Lausanne

DIE ZWEITE-HAUT-FASSADE

Glas als Architekturmaterial übt momentan auf Architekten eine wahre Faszination aus. Die bemerkenswerten Qualitäten an Transparenz werden heute durch mechanische Qualitäten ergänzt, die die spektakulärsten Einsatzbereiche und bemerkenswerte Bauten ermöglichen.

Einleitung

Aber jede Münze hat eine Kehrseite. Bauten mit viel Glasfläche führen zu starken und schnellen Erwärmungen und Abkühlungen, die zu schnellen Schwankungen der Innentemperatur führen. Diese Schwankungen sind ohne Innenraumklimatisierung schwierig zu bekämpfen. Zu diesen Wärmeproblemen kommen noch Schallschutzmassnahmen gegen Lärm von aussen und die Belüftung der aussen liegenden Räume hinzu.

Durch Schutz der Hauptfassade – meist mit einer grossen Glasfläche – mit einer transparenten Abschirmung erhält man eine Zweite-Haut-Fassade, mit der man die genannten Wärme-, Schall- und Belüftungsprobleme mindern oder sogar beheben kann. Eine Forschungsarbeit an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Lausanne ermöglichte eine Abgrenzung, inwieweit eine Zweite-Haut-Fassade die erwähnten Probleme lösen kann und welche Voraussetzungen hierfür vorliegen müssen.

Das Projekt Zweite-Haut-Fassade

Die Grundlage der Studie an der ETHL ist in den Arbeiten von M. J. Holmes² zu finden, der ab 1985 die bemerkenswerten Möglichkeiten von Zweite-Haut-Fassade darstellte. Das Forschungsprojekt Zweite-Haut-Fassade³ ermöglichte eine Detaillierung und Erweiterung der theoretischen Analyse dieser Fassaden und erlaubte es, vor Ort und im Labor Massnahmen zu treffen und Parameterstudien auf Grundlage eines Computerrechenmodells durchzuführen. Letztere erlaubten die Bestimmung

einer Reihe praktischer Regeln, die Architekten, die Gebäude mit einer Zweite-Haut-Fassade ausstatten wollen, und Ingenieure, die mit der endgültigen Berechnung dieses Elements für eine ordnungsgemässe Funktion des Systems befasst sind, interessieren dürften.

Grundlegende Elemente und deren Wechselwirkung

Die Zweite-Haut-Fassade beinhaltet (Abb. 1) eine Abschirmung vor der Innenfassade (oder Hauptfassade). Der so geschaffene Zwischenraum ermöglicht ein Reinigen der Glasflächen und Wartungsarbeiten an den Fassaden. Die verschiedenen Elemente der Zweite-Haut-Fassade beeinflussen die Funktion der Fassade und des Gebäudes, wenn man die verschiedenen Aspekte der Energiebilanz, des Wärme- komforts, der Ästhetik, des Schallschutzes und der natürlichen Belüftung der Räume berücksichtigt (Tabelle 1, 2, 3).

Typologie

Die Sichtung der Realisierungen und Projekte mit Zweite-Haut-Fassaden^{4,5} ergibt einerseits eine Klassifizierung nach der Anordnung der Elemente (vor allem der Sonnenblende) und andererseits eine Klassifizierung nach der Belüftungsart für den Zwischenraum und der anschliessenden Räume. Falls vorhanden, wird die Sonnenblende meist im Zwischenraum untergebracht (wo sie vor der Witterung geschützt ist) und seltener in den Innenräumen selbst (Abb. 2).

Im Schnitt sieht man, dass das wichtigste Problem die Belüftung des Zwischenraumes und der innenliegenden Räume ist. Die Belüftung kann etagenweise (Abb. 3a), auf der gesamten Höhe des Gebäudes (Abb. 3b) oder nur durch Abführen der Luft (Abb. 3c) erfolgen. Wenn die Belüftung etagenweise erfolgt, vermeiden mehrere Kunstgriffe (Abb. 4), dass sich die Abluft aus einem Raum nicht mit der Frischluft für den nächsten Raum vermischt.

Im Rahmen des Projekts Zweite-Haut-Fassade untersuchten wir zwei Ausführungsarten. Bei der ersten erstreckt sich der Zwischenraum auf der gesamten Höhe des Gebäudes. Er verfügt über untere und obere Öffnungen. Die Belüftung der Räume funktioniert nur gelegentlich beim Öffnen der Fenster. Die Fassade, die den Zwi-