

Saint-Gobain Isover SA
Rte de Payerne 1
CH-1522 Lucens

Rapport No 444'383f

Protection thermique estivale des pièces sous les combles

Analyse des facteurs d'influence sur le climat intérieur

Table des matières

1. Définition du mandat
2. Situation initiale, exposé du problème
3. Indications sur l'objet, conditions marginales
4. Modèle de calcul HELIOS
5. Résultats
6. Résumé
- Bibliographie
- Appendices

Ce rapport comprend au total 24 pages (appendices compris).

Dübendorf, 21 avril 2008
Laboratoire Technologies du bâtiment
Th. Frank



1. Définition du mandat

L'entreprise Saint-Gobain Isover SA, représentée par Monsieur Martin Bohnenblust, a chargé le laboratoire Technologies du bâtiment de l'Empa de réaliser une étude sur la protection thermique estivale des pièces sous combles et d'analyser en détail les facteurs d'influence agissant sur le climat intérieur. Les dimensions et le type de construction des combles ont été fixés par le commettant. Cette étude a été effectuée par calcul à l'aide du programme de simulation dynamique des bâtiments HELIOS pour le climat de Zürich-Kloten.

2. Situation initiale, exposé du problème

Les mesures de longue durée des températures effectuées par MétéoSuisse confirment que l'on observe en Suisse depuis 1980 un net réchauffement climatique. La figure 1 montre qu'en Suisse les écarts de température (en moyenne pour les mois de juin à août) sont toujours nettement positifs par rapport à la moyenne de la période 1961 – 1990 et qu'en 2003 ces écarts ont atteint la valeur record de +4.8°C. Le rapport de l'OcCC «Événements extrêmes et changements climatiques» [2] mentionne ainsi qu'il faudra s'attendre à l'avenir en Suisse à un accroissement des situations de températures élevées et à une augmentation des événements météorologiques extrêmes. La figure 2 donne à gauche une carte de la distribution des augmentations de température pronostiquées en Europe pour la période 2071-2100 selon le livre vert de la Commission européenne. Il en ressort que ce réchauffement sera le plus élevé dans le nord de la Scandinavie et dans les pays du sud de l'Europe ainsi que dans l'espace alpin en Europe centrale.

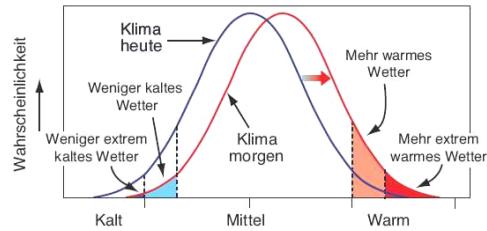
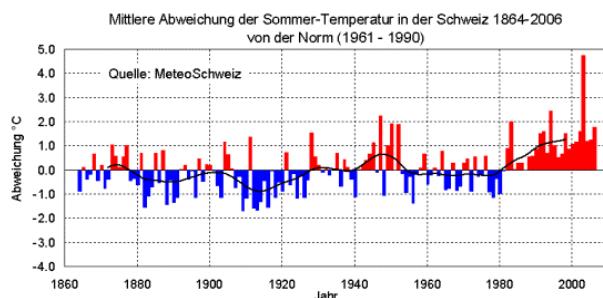


Figure 1: Ecarts des températures estivales par rapport à la moyenne WMO et tendance de développement selon l'OcCC [2]

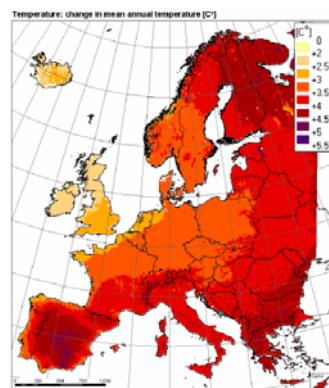
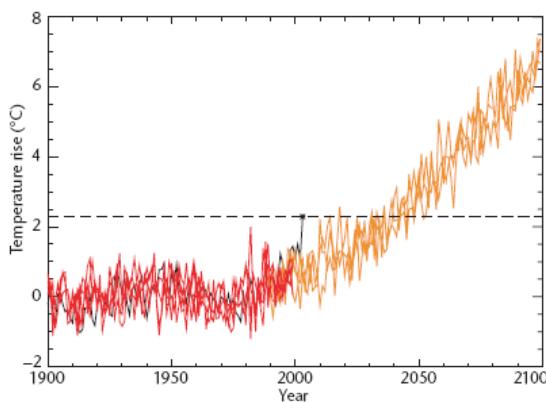


Fig 2: Augmentations de température pronostiquées en Europe jusqu'en 2100 [1] et pour la période 2071-2100 [3].

Un autre changement climatique s'observe à côté de l'augmentation de la température: l'augmentation de la fréquence et de la durée de périodes de grande chaleur, c.-à-d. du nombre de jours où la température maximale dépasse 30°C. Alors que jusqu'ici une période estivale normale comptait en moyenne 3 jours de grande chaleur (figure 3 en haut), il faudra s'attendre à des périodes de grande chaleur plus longue de 10 à 12 jours, comme le montrent les exemples des années 2003 et 2006 (figure 3 en bas).

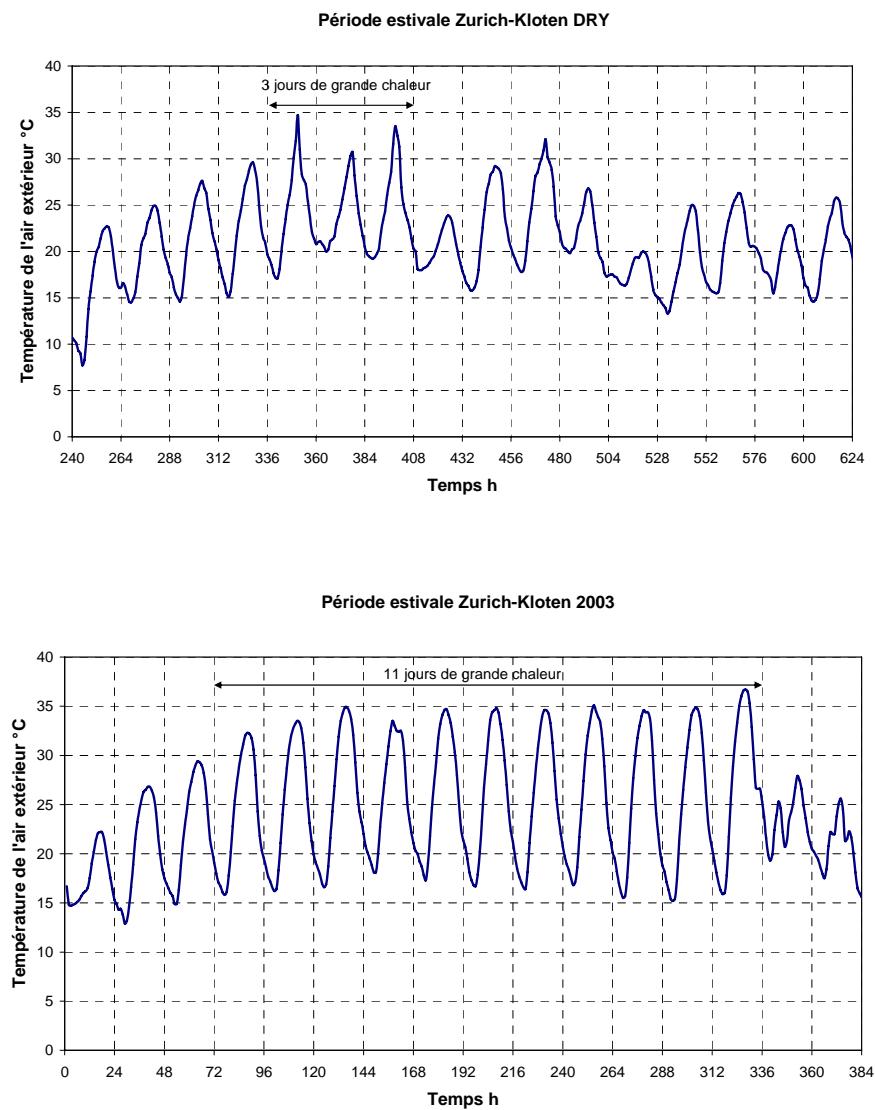


Figure 3: Période estivale normale DRY avec 3 jours de grande chaleur et période estivale extrême 2003 avec 11 jours de grande chaleur

Avec le réchauffement climatique qui se dessine, la protection thermique estivale prend une importance accrue. Une attention particulière doit être accordée aux pièces situées sous les combles qui sont tout spécialement exposées à un rayonnement solaire intense. Si en plus on est en présence d'une construction en bois, il se pose alors encore la question d'une capacité thermique suffisante pour d'amortir les grandes élévations de température. L'estimation correcte du comportement thermique de pièces situées sous les combles demande l'établissement d'un bilan thermique global de la pièce à l'aide d'un modèle de simulation dynamique tenant compte des aspects suivants:

Gains thermiques (*chaleur apportée*)

- . charges internes dues aux personnes, appareils, éclairage (variations journalières des charges convectives et radiatives)
- . gains solaires à travers la surface des fenêtres (orientation, dimensions des fenêtres, coefficient g, mesures d'ombragement)
- . gains solaires à travers les surfaces opaques (orientation, degré d'absorption des surfaces, transfert de chaleur)

Déperditions thermiques (*chaleur évacuée*)

- . transfert de chaleur par transmission (toit, murs, fenêtres, portes, sols, éléments de construction intérieurs)
- . transfert de chaleur par infiltration d'air (joints et autres inétanchéités)
- . transfert de chaleur par ventilation (aération par les fenêtres, ventilation mécanique)

Accumulation thermique (*enveloppe du bâtiment et parties de construction intérieures*)

- . comportement d'accumulation thermique des éléments de construction pour ce qui est des variations de la température intérieure de période T
- . comportement d'accumulation thermique des éléments de construction pour ce qui est des variations de la température extérieure de période T
- . comportement d'accumulation thermique de l'ensemble de la pièce (capacité thermique de la pièce, constante de temps) pour des variations de température de période T ou pour un seul saut de température

Si l'on considère le comportement thermique estival des pièces sous les combles pour des conditions de transmission thermique identiques mais pour des conditions de ventilation, de gains thermiques et des capacités thermiques différentes, les facteurs d'influence les plus importants sont alors ceux indiqués dans la figure 4 ci-dessous.

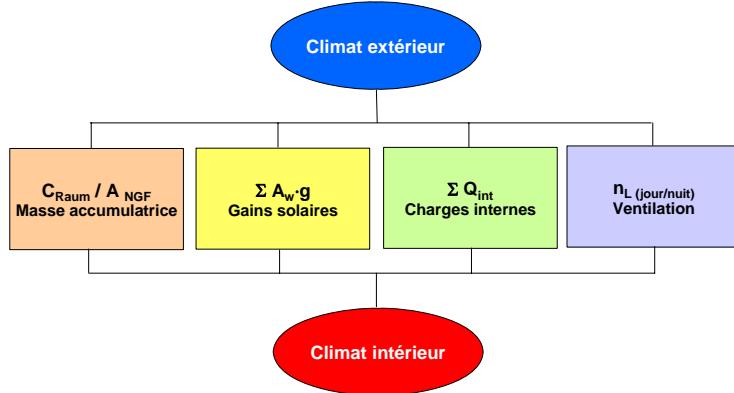


Figure 4: Facteurs d'influence sur le comportement thermique estival d'une pièce sous combles

Les notions utilisées dans les différentes normes SIA pour la caractérisation du comportement thermique des éléments de construction et des pièces sont les suivantes:

Valeurs caractéristiques des éléments de constructions

Coefficient de transmission thermique stationnaire	U	W/(m ² K)	SIA 180 [6]
Coefficient de transmission thermique dynamique sur une période de 24 heures T = 24 h	U ₂₄	W/(m ² K)	SIA 180 [6]
Capacité thermique surfacique, intérieur	κ _i	Wh/(m ² K)	SIA 180.073 [10]
Capacité thermique surfacique, extérieur	κ _e	Wh/(m ² K)	SIA 180.073 [10]

Valeurs caractéristiques des pièces

Capacité thermique dynamique de la pièce	C _R = ΣA _i κ _i	Wh/K	SIA 382/1 [8]
Capacité thermique dynamique de la pièce rapportée à la surface externe nette SEN	C _R / SEN	Wh/(m ² K)	SIA 382/1 [8]
Capacité thermique statique de la pièce	C = Σ A _i Σ p _j d _{c_j}	Wh/K	SIA 180 [6]
Coefficient de déperdition thermique de la pièce (transmission et ventilation)	H = H _T + H _V	W/K	SIA 180 [6]
Constante de temps de la pièce	τ = C / H	h	SIA 180 [6]

Température de rayonnement de l'air

Pour la protection thermique estivale, l'influence du rayonnement de courte et de longue longueur d'onde sur le transfert de chaleur par transmission a une grande importance (sources et puits de chaleur sur la surface extérieure). Cette influence peut être prise en compte avec la définition d'une température de rayonnement de l'air θ_e^{*} tenant des facteurs d'influence suivants:

$$\theta_e^* = \theta_e + (\alpha_s \cdot I_s - \varepsilon \cdot \Delta I_R) / h_e$$

θ_e température de l'air extérieur en °C

α_s degré d'absorption solaire de la surface

I_s intensité du rayonnement solaire en W/m²

ε émissivité de la surface

ΔI_R déperditions supplémentaires par rayonnement infrarouge vers le ciel clair en W/m²

h_e coefficient de transfert thermique extérieur en W/(m²K)

Confort thermique

La température optimale d'une pièce en fonction des activités et de l'habillement des occupants selon la norme SIA 180 [6] est représentée à gauche sur la figure 5; la partie droite indique les domaines de température intérieure admissibles en fonction du maximum journalier de la température extérieure selon la norme SIA 382/3 [9].

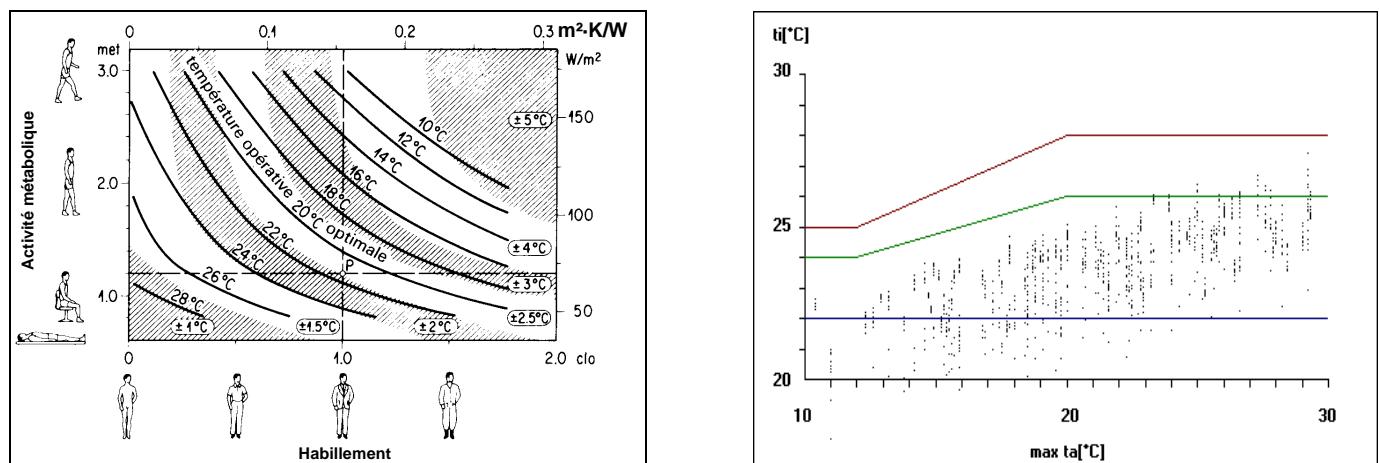


Fig 5: Températures intérieures optimales selon la norme SIA 180 [6] et domaines de température intérieure admissibles selon la norme SIA 382/3 [9]

La nouvelle norme EN 15251 [11] donne une classification plus différenciée des exigences de confort en 4 catégories qui mentionne les domaines de température indiqués dans le tableau ci-dessous pour l'été, cela pour une activité de 1.2 met et un habillement de 0.5 clo.

Catégorie	PPD	Domaine de température °C
I	< 6%	23.5 – 25.5
II	< 10%	23.0 – 26.0
III	< 15%	22.0 – 27.0
IV	> 15%	< 22.0 bzw. > 27.0

Tableau 1: Domaines de température admissibles pour l'été avec une activité de 1.2 met et un habillement de 0.5 clo selon la norme EN 15251 [11]

PPD: pourcentage attendu de personnes non satisfaites (Predicted Percentage Dissatisfied)

La présente étude est consacrée principalement aux questions suivantes portant sur le climat intérieur:

- Comportement thermique estival d'une pièce sous combles normale d'une construction en bois avec une isolation thermique standard actuelle et avec l'utilisation de différents types de matériaux isolants
- Influence d'une surface vitrée modérée (10%, resp. 20% de la surface du sol) et de l'orientation
- Influence des charges thermiques internes (utilisation comme habitation 5 W/m², 10 W/m², 15 W/m²)
- Analyse des facteurs qui exercent une influence importante sur le comportement thermique de la pièce

3. Indications sur l'objet, conditions marginales

L'étude a été réalisée sur une pièce sous combles d'une construction en bois dont les dimensions sont données sur la figure 6. La pièce présente un plafond mansardé, deux parois contre le climat extérieur et deux parois contre des pièces voisines. Deux variantes de surfaces de fenêtre ont été étudiées, une variante avec une fenêtre de toit d'une surface de 2 m^2 (10 % de la surface du sol) et une variante avec une porte-fenêtre de balcon d'une surface de 4 m^2 (20% de la surface du sol). Les surfaces de l'enveloppe pour les deux variantes de la pièce sont données dans les tableaux 2a et 2b. Le volume de la pièce est de 53.3 m^3 .

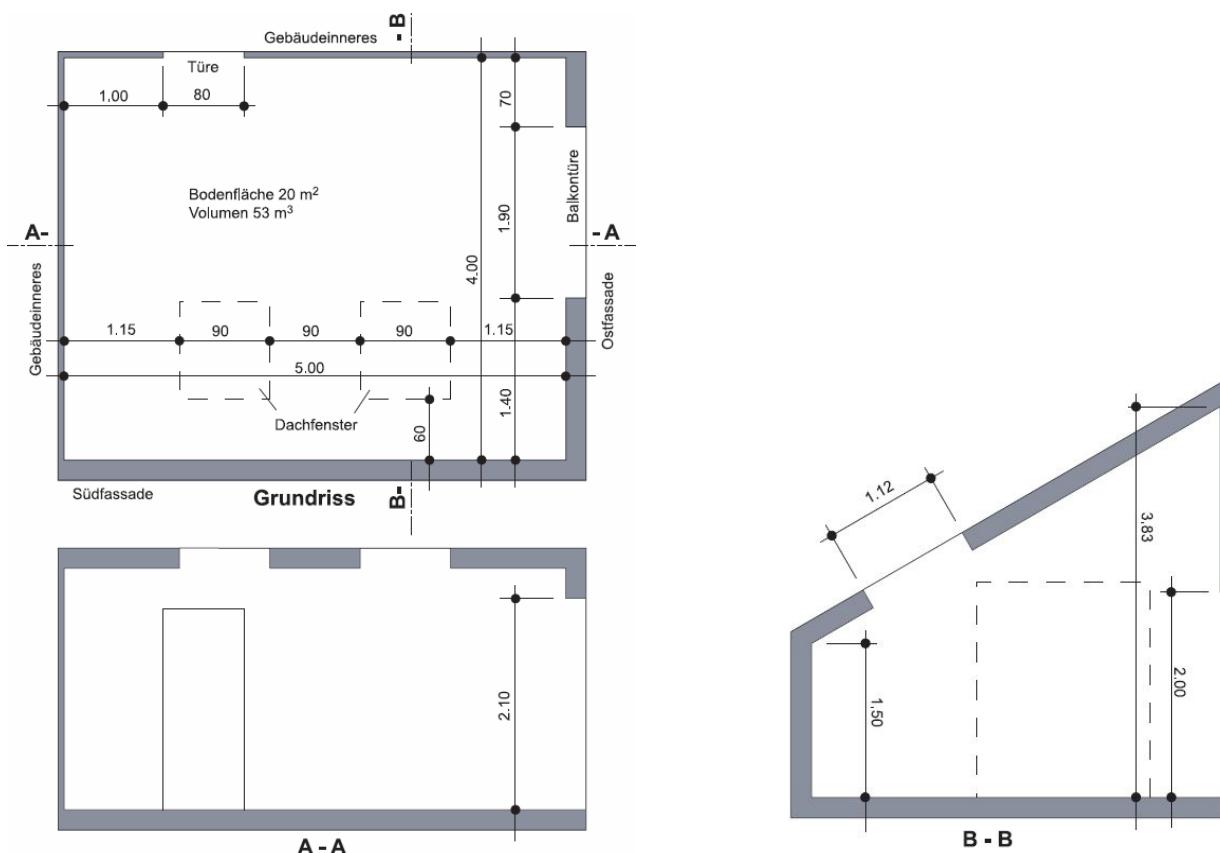


Figure 6: Plan et coupes de la pièce sous combles étudiée avec toit incliné et deux variantes de fenêtre.

Elément de construction	Orientation	Surface en m^2
Paroi extérieure	est	10.7
Paroi extérieure	sud	7.5
Toit incliné	sud	21.2
Fenêtre de toiture	sud	2.0
Paroi de séparation contre climat intérieur	ouest	10.7
Paroi de séparation contre climat intérieur	nord	17.2
Porte contre climat intérieur	nord	2.0

Tableau 2a: Surface de l'enveloppe de la pièce sous combles avec la variante fenêtre de toit

Elément de construction	Orientation	Surface en m ²
Paroi extérieure	est	6.7
Porte-fenêtre de balcon	est	4.0
Paroi extérieure	sud	7.5
Toit incliné	sud	23.2
Paroi de séparation contre climat intérieur	ouest	10.7
Paroi de séparation contre climat intérieur	nord	17.2
Porte contre climat intérieur	nord	2.0

Tableau 2b: Surfaces de l'enveloppe de la pièce sous combles avec la variante porte-fenêtre de balcon

Les caractéristiques des fenêtres sont données dans le tableau 3 .

Objet	Caractéristique
Vitrage isolant double	$U_g = 1.1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Coefficient de transmission énergétique global du vitrage	$g = 0.60$
Coefficient Ψ de l'intercalaire en acier inoxydable	$\Psi = 0.06 \text{ W}/(\text{mK})$
Châssis bois-métal	$U_f = 1.6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Pourcentage de la surface du châssis	25 %
Coefficient de transmission thermique de la fenêtre de toit	$U_w = 1.4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Coefficient de transmission thermique de la porte-fenêtre de balcon	$U_w = 1.4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Tableau 3: Caractéristiques des fenêtres

Les structures et les dimensions du toit, des parois et du sol sont données dans l'appendice 1. L'étude a été réalisée pour deux épaisseurs d'isolation thermique (20 cm et 20+6 cm), 5 types de matériaux isolants et des parement des cloisons monocouches et bicouches en panneaux de plâtre armés de fibres (PAF). Les tableaux 4 à 8 ci-après donnent les valeurs des coefficients de transmission thermique et de la capacité thermique de ces constructions. Les caractéristiques de matériaux utilisées dans les calculs sont indiquées dans l'appendice 2. Comme revêtement de sol on a étudié une variante avec moquette et une variante avec revêtement de carreaux de pierre.

Variante	Isolation thermique (épaisseur 200 mm) et parements	U (EN 6946) W/(m ² K)	U_{24} EN 13786 W/(m ² K)	κ_i EN 13786 Wh/(m ² K)
D1.1a	Laine de verre, parements PAF 12.5 mm	0.20	0.15	6
D1.1b	Laine de verre, parements PAF 25 mm	0.20	0.14	9
D1.2a	Laine de pierre, parements PAF 1 2.5 mm	0.20	0.14	6
D1.2b	Laine de pierre, parements PAF 25 mm	0.20	0.13	9
D1.3a	Cellulose, parements PAF 12.5 mm	0.21	0.09	6
D1.3b	Cellulose, parements PAF 25 mm	0.21	0.09	9
D1.4a	Panneaux de fibres de bois tendres, parements PAF12.5 mm	0.21	0.11	6
D1.4b	Panneaux de fibres de bois tendres, parements PAF 25 mm	0.20	0.10	9
D1.5a	Panneaux de fibres de bois, parements PAF12.5 mm	0.22	0.07	6
D1.5b	Panneaux de fibres de bois, parements PAF 25 mm	0.22	0.07	9

Tableau 4: Caractéristiques de la construction du toit, variante 1

Variante	Isolation thermique (épaisseur 200 mm + 60 mm) et parements	U (EN 6946) W/(m ² K)	U_{24} EN 13786 W/(m ² K)	κ_i EN 13786 Wh/(m ² K)
D2.1a	Laine de verre, parements PAF 12.5 mm	0.16	0.09	6
D2.1b	Laine de verre, parements PAF 25 mm	0.16	0.09	9
D2.2a	Laine de pierre, parements PAF1 2.5 mm	0.16	0.08	6
D2.2b	Laine de pierre, parements PAF 25 mm	0.16	0.08	9
D2.3a	Cellulose, parements PAF 12.5 mm	0.17	0.05	6
D2.3b	Cellulose, parements PAF 25 mm	0.17	0.05	9
D2.4a	Panneaux de fibres de bois tendres, parements PAF12.5 mm	0.17	0.06	6
D2.4b	Panneaux de fibres de bois tendres, parements PAF 25 mm	0.17	0.06	9
D2.5a	Panneaux de fibres de bois, parements PAF12.5 mm	0.18	0.04	6
D2.5b	Panneaux de fibres de bois, parements PAF 25 mm	0.18	0.03	9

Tableau 5: Caractéristiques de la construction du toit, variante 2

Variante	Isolation thermique (épaisseur 200 mm) et parements	U (EN 6946) W/(m ² K)	U_{24} EN 13786 W/(m ² K)	κ_i EN 13786 Wh/(m ² K)
A1.1a	Laine de verre, parements PAF 12.5 mm	0.19	0.12	8
A1.1b	Laine de verre, parements PAF 25 mm	0.18	0.11	11
A1.2a	Laine de pierre, parements PAF1 2.5 mm	0.19	0.12	8
A1.2b	Laine de pierre, parements PAF 25 mm	0.18	0.11	11
A1.3a	Cellulose, parements PAF 12.5 mm	0.20	0.08	8
A1.3b	Cellulose, parements PAF 25 mm	0.19	0.07	10
A1.4a	Panneaux de fibres de bois tendres, parements PAF12.5 mm	0.20	0.09	8
A1.4b	Panneaux de fibres de bois tendres, parements PAF 25 mm	0.19	0.08	10
A1.5a	Panneaux de fibres de bois, parements PAF12.5 mm	0.21	0.06	8
A1.5b	Panneaux de fibres de bois, parements PAF 25 mm	0.21	0.05	10

Tableau 6: Caractéristiques des cloisons extérieures, variante 1

Variante	Isolation thermique (épaisseur 200 mm + 60 mm) et parements	U (EN 6946) W/(m ² K)	U_{24} EN 13786 W/(m ² K)	κ_i EN 13786 Wh/(m ² K)
A2.1a	Laine de verre, parements PAF 12.5 mm	0.15	0.05	5
A2.1b	Laine de verre, parements PAF 25 mm	0.15	0.05	8
A2.2a	Laine de pierre, parements PAF1 2.5 mm	0.15	0.05	5
A2.2b	Laine de pierre, parements PAF 25 mm	0.15	0.05	8
A2.3a	Cellulose, revêtement de sol moquette	0.16	0.03	6
A2.3b	Cellulose, revêtement de sol, carreaux de pierre	0.16	0.03	8
A2.4a	Panneaux de fibres de bois tendres, parements PAF12.5 mm	0.16	0.06	6
A2.4b	Panneaux de fibres de bois tendres, parements PAF 25 mm	0.16	0.06	8
A2.5a	Panneaux de fibres de bois, parements PAF12.5 mm	0.17	0.02	6
A2.5b	Panneaux de fibres de bois, parements PAF 25 mm	0.17	0.02	9

Tableau 7: Caractéristiques des parois extérieures, variante 2

Variante	Isolation thermique (épaisseur 200 mm) et revêtement de sol	U (EN 6946) W/(m ² K)	U_{24} EN 13786 W/(m ² K)	κ_i EN 13786 Wh/(m ² K)
B1.1a	Laine de verre, sol moquette	0.18	0.03	12
B1.1b	Laine de verre, sol carreaux de pierre	0.18	0.04	24
B1.2a	Laine de pierre, sol moquette	0.18	0.03	12
B1.2b	Laine de pierre, sol carreaux de pierre	0.18	0.04	24
B1.3a	Cellulose, sol moquette	0.18	0.02	12
B1.3b	Cellulose, sol carreaux de pierre	0.19	0.03	24
B1.4a	Panneaux de fibres de bois tendres, sol moquette	0.18	0.02	12
B1.4b	Panneaux de fibres de bois tendres, sol carreaux de pierre	0.18	0.03	24
B1.5a	Panneaux de fibres de bois, sol moquette	0.19	0.01	12
B1.5b	Panneaux de fibres de bois, sol carreaux de pierre	0.20	0.02	24

Tableau 8: Caractéristiques de la construction du plancher

Les indications sur la ventilation, les charges internes ainsi que sur les dispositifs de protection solaire sont données dans le tableau 9.

Objet	Variantes
Ventilation	Taux de renouvellement minimal sur le plan hygiénique $n_L = 0.5 \text{ 1/h}$
(aération par les fenêtres)	Pas d'aération nocturne $n_{L,N} = 0 \text{ 1/h}$
	Faible aération nocturne $n_{L,N} = 1 \text{ 1/h}$
	Bonne aération nocturne $n_{L,N} = 3 \text{ 1/h}$
Charge internes (personnes + app. électr.)	Utilisation normale $q_i = 5 \text{ W/m}^2$
(50 % convection, 50 % radiation)	Utilisation moyenne $q_i = 10 \text{ W/m}^2$
	Utilisation intensive $q_i = 15 \text{ W/m}^2$
Mesures de protection solaire	Pas de mesures de protection solaire $g = 0.60, b=1.0$
(coefficients g résultant de la fenêtre, facteur d'ombrage b)	Stores bannes extérieurs $g = 0.30, b=0.5$
	Stores à lamelles extérieurs $g = 0.12, b=0.2$

Tableau 9: Variantes concernant la ventilation, les charges internes et les mesures de protection solaire

La station climatique choisie pour cette étude est celle de Zurich-Kloten (altitude. 425 m) avec les données météorologiques DRY. Les simulations ont été réalisées sur une période estivale allant du 15 juillet au 15 août. L'évaluation des résultats et l'analyse du comportement thermique de la pièce sous combles ont été réalisées sur la période de grande chaleur du 25 juillet au 6 août. Les courbes des températures de l'air extérieur et de l'intensité du rayonnement solaire sur un plan horizontal pour cette période sont données sur la figure 7.

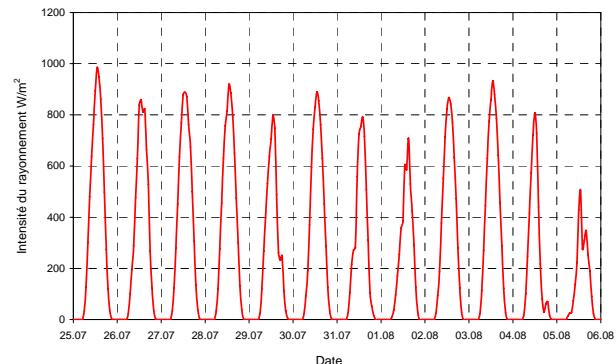
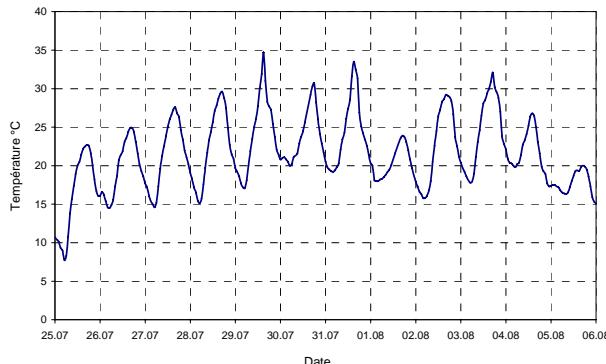


Figure 7: Température extérieure et intensité du rayonnement solaire pour une période de grande chaleur à Zurich-Kloten

4. Modèle de calcul HELIOS

Les calculs de simulation thermique ont été réalisés à l'aide du programme de calcul HELIOS-XP développé par l'Empa. Ce modèle dynamique monozone établit le bilan horaire de tous les flux thermiques entrant et sortant en tenant compte du bilan de rayonnement de courtes et de longues longueurs d'onde sur l'enveloppe du bâtiment et permet la détermination des charges de réfrigération et de chauffage ainsi que celle des températures superficielles des éléments de construction et de la température intérieure en tenant compte des processus d'accumulation thermique dans toutes les parties de la construction. La conduction thermique à travers les parties de construction opaques est déterminée par la méthode des facteurs de réponse. La température de l'air intérieur dans une zone est considérée comme homogène, c.-à-d. pour un air parfaitement mélangé. La figure 8 donne une représentation schématique des effets thermiques agissant sur une pièce modulaire et de leur prise en compte dans le modèle de simulation des bâtiments HELIOS.

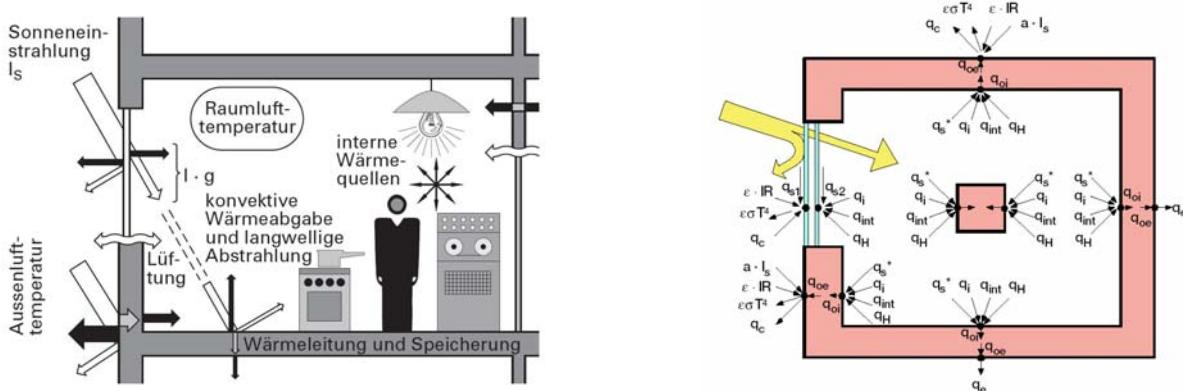


Figure 8: Effets thermiques sur un module de pièce (à gauche) et dans le modèle de calcul HELIOS (à droite)

Toutes les conditions marginales telles que le climat extérieur, les charges internes et la ventilation sont saisies sous forme de valeurs horaires.

5. Résultats

Capacité thermique interne C_R

Selon la norme SIA 382/1, l'inertie thermique d'une pièce se caractérise par la capacité thermique de la pièce C_R rapportée à la surface externe nette SEN. Le tableau 10 donne les valeurs caractéristiques de la capacité thermique de la pièce sous combles étudiée (construction ossature bois, parements intérieurs du toit et des parois en panneaux de plâtre armés de fibres de 12.5 mm d'épaisseur, chape de ciment avec revêtement de sol en moquette), cela pour les différentes variantes d'isolants thermiques. Pour pouvoir estimer l'ordre de grandeur des variations, le tableau 11 compare les valeurs des différentes variantes d'exécution. Il en ressort que les différences d'au maximum 4 Wh/(m²K) constatées entre les différents types d'isolants thermiques sont faibles et à considérer comme insignifiantes. Un accroissement important de la capacité thermique de la pièce peut être obtenu avec des parements comportant une double épaisseur de panneaux de plâtre armé de fibres, un revêtement de sol en carreaux de pierre ou l'utilisation d'une construction massive pour l'intérieur. La valeur minimale de 30 Wh/(m²K) exigée par la norme SIA 382/1 [8] est atteinte avec toutes les variantes d'isolants thermiques

Variantes de construction à ossature bois	C_R / A_{NGF} Wh/(m ² K)
Isolation thermique avec laine de verre	31 - 32
Isolation thermique avec laine de pierre	32 - 33
Isolation thermique avec cellulose	33 - 34
Isolation thermique avec panneaux de fibres de bois tendres	32 - 33
Islation thermique avec panneaux de fibres de bois	34 – 35

Tableau 10: Influence du type d'isolant thermique sur la capacité thermique surfacique intérieure

Mode de construction	C_R / A_{NGF} Wh/(m ² K)
Ossature bois, parements PAF 12.5 mm revêtement de sol moquette	31 - 34
Ossature bois, parements PAF 25mm, revêtement de sol moquette	41 - 43
Ossature bois, parements PAF 12.5 mm, revêtement de sol pierre	43 - 45
Toit incliné avec PAF 12.5 mm, parois en briques, revêtement de sol moquette	50 - 53
Toit incliné avec PAF 25 mm, parois en briques, revêtement de sol pierre	65 - 68
Toit incliné avec PAF 25 mm, parois extérieures béton, parois intérieures briques, revêtement de sol pierre	72 - 84
Construction massive entièrement en béton, revêtement de sol pierre	90 - 100

Tableau 11: Comparaison des capacités thermiques surfaciques pour différents types de construction

Influence du type d'isolant thermique

L'influence du type d'isolant thermique sur le comportement en température de la pièce en été ressort de la figure 9. Les températures de l'air intérieur sont très proches les unes des autres pour toutes les variantes d'isolation thermique (figure du haut), les différences détaillées aux températures maximales sont données sur la figure du bas et se situent dans le domaine de 0 – 1°C.

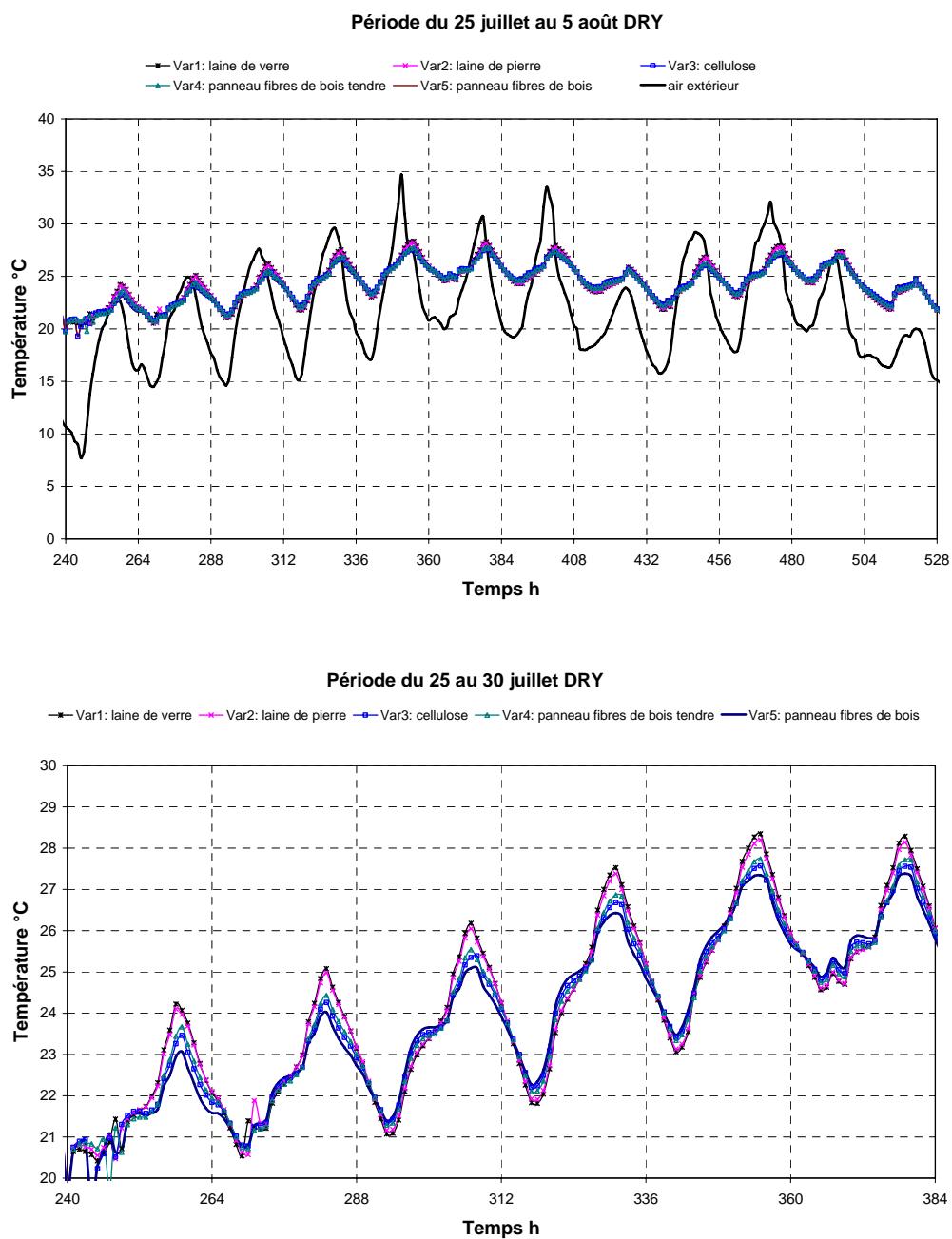


Fig 9: Influence du type d'isolant thermique sur le profil de la température intérieure

Conditions marginales: porte-fenêtre balcon $g=0.12$, revêtement de sol moquette, parements PAF 12.5 m, aération nocturne 3 l/h , $q_i = 5 \text{ W/m}^2$, $U=0.2 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

Influence du parement des cloisons et du revêtement de sol

L'influence des couches superficielles sur le comportement en température ressort clairement de la figure 10 en haut. La pose d'un parement double de panneaux de plâtre armés de fibres et d'un revêtement de sol en carreaux de pierre conduisent à une réduction des pointes de température allant jusqu'à 1.5 °C (figure du bas).

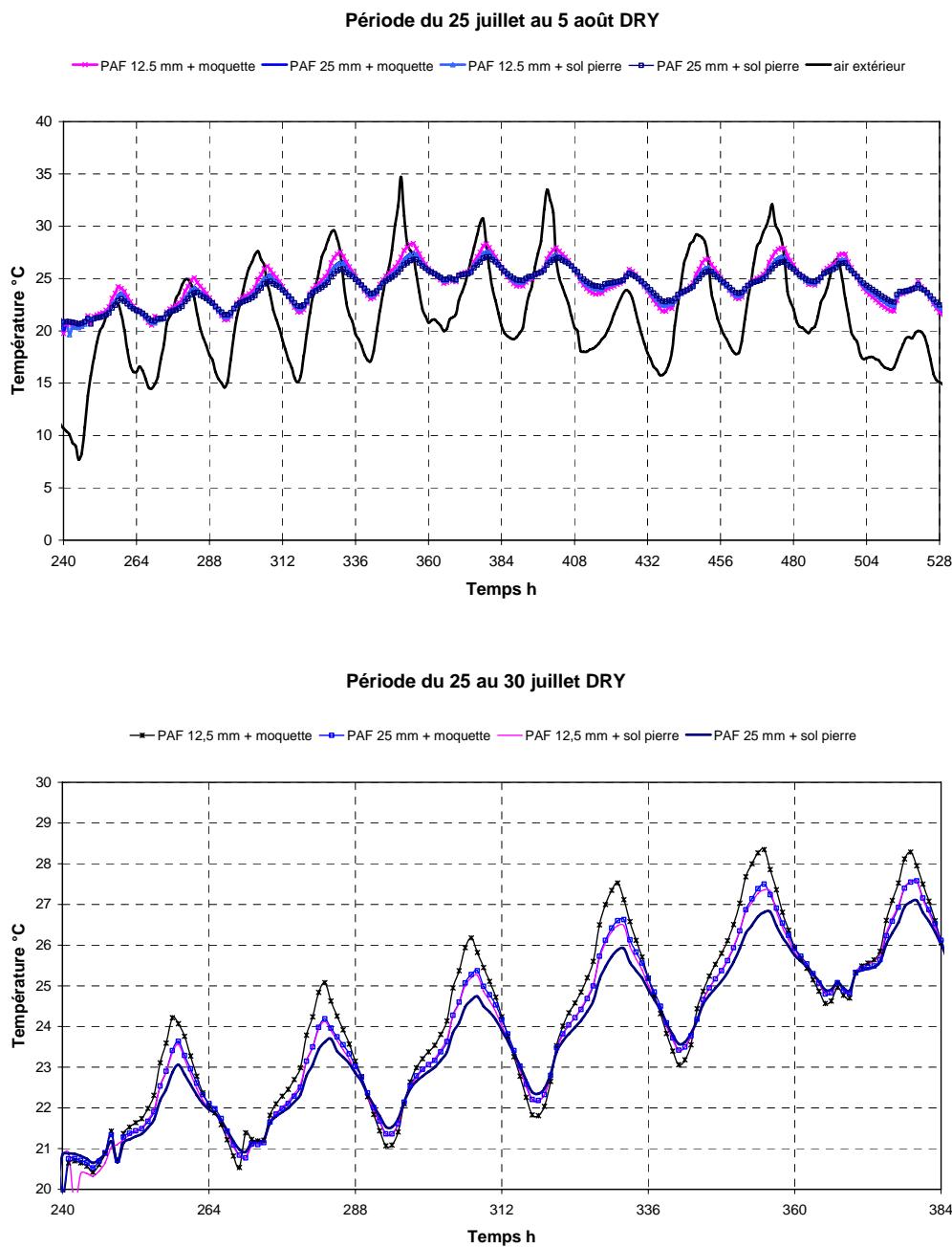


Fig 10: Influence du parement des parois et du revêtement de sol sur le profil de la température intérieure

Conditions marginales: isolation thermique laine de verre, porte-fenêtre de balcon $g=0.12$, aération nocturne $3 \text{ }^1/\text{h}$, $q_i = 5 \text{ W/m}^2$, $U=0.2 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

Influence de la protection solaire

La figure 11 montre très clairement qu'en absence d'une protection solaire efficace les températures intérieures augmentent à des valeurs dépassant les 30°C et que l'on quitte ainsi le domaine de confort thermique admissible. L'utilisation de stores à lamelles extérieurs ($g=0.12$) permet d'atteindre une réduction des pointes de température de 3.5 °C.

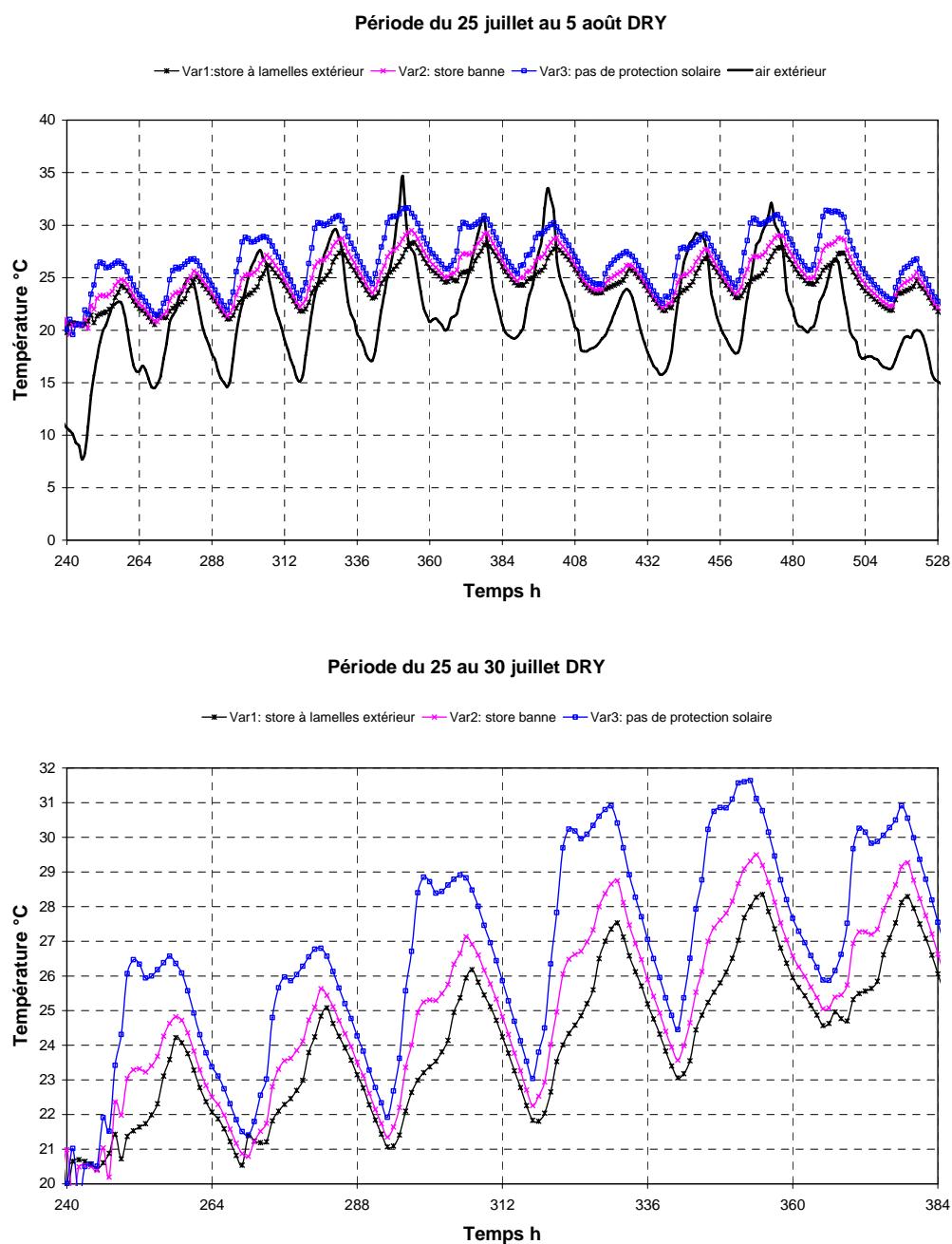


Figure 11: Influence de la protection solaire sur le profil de la température intérieure

Conditions marginales: isolant thermique laine de verre, porte-fenêtre balcon, revêtement de sol moquette, parements PAF 12.5 mm, aération nocturne 3^{1/h}, $q_i = 5 \text{ W/m}^2$, $U=0.2 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

Influence des charges thermiques internes

Les charges thermiques internes présentes dans la pièce dues aux personnes, aux appareils et à l'éclairage constituent un facteur important pour le profil de température intérieure. Ainsi que le montre clairement la figure 11, des charges thermiques de 300 W, resp. 15 W/m^2 conduisent à une augmentation de la température de 3°C dans la pièce.

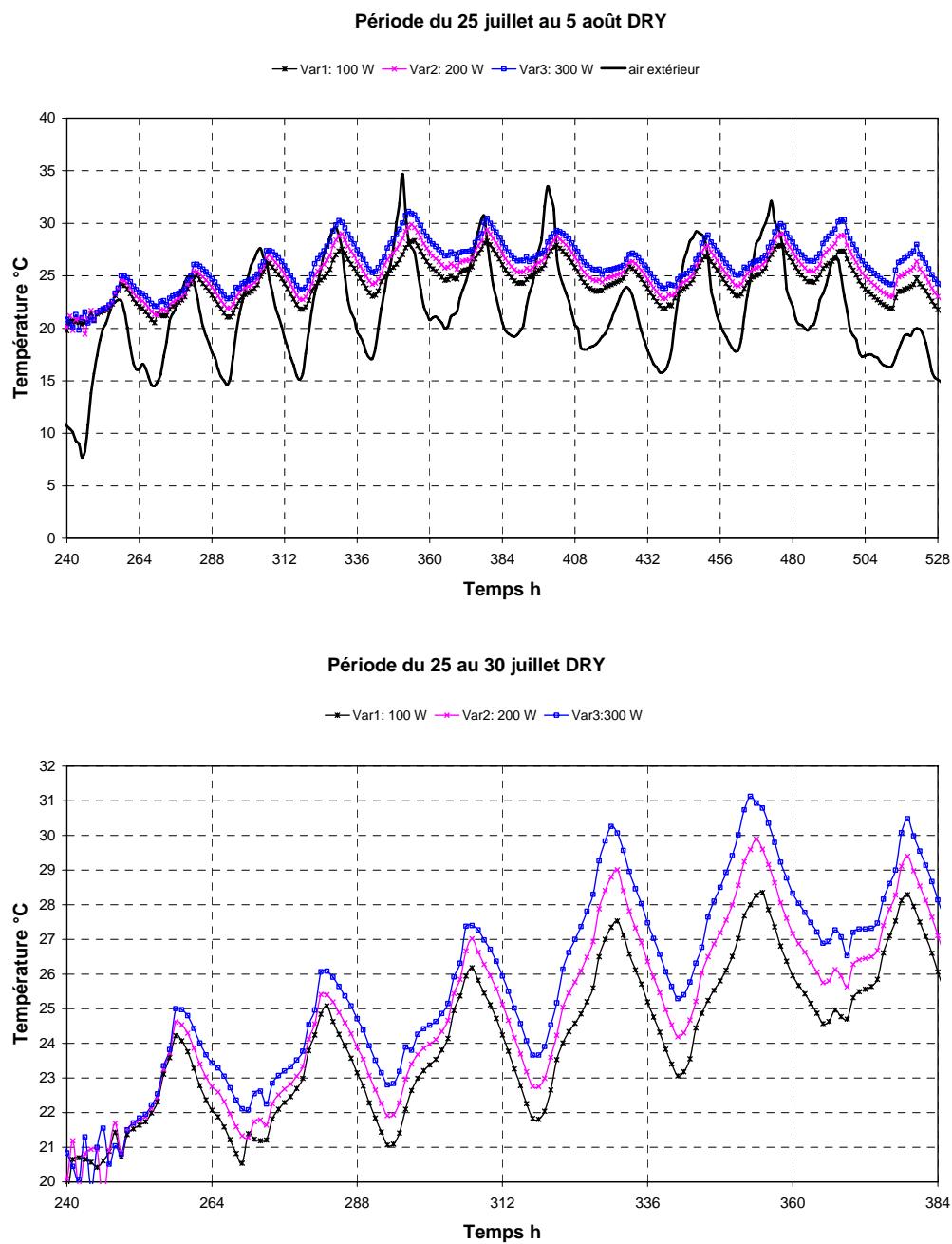


Figure 12: Influence des charges thermiques internes sur le profil de la température intérieure

Conditions marginales: Isolant thermique laine de verre, porte-fenêtre de balcon $g=0.12$, revêtement de sol moquette, parements PAF 12.5 mm, aération nocturne $3 \frac{1}{h}$, $U=0.2 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

Influence de l'aération nocturne

L'aération nocturne est une mesure très importante pour maintenir dans un domaine acceptable la température intérieure durant les périodes de grande chaleur. Comme le montre la figure 13, un taux de renouvellement de l'air nocturne trois fois plus élevé permet d'atteindre une réduction de la température intérieure atteignant jusqu'à 4.5 °C.

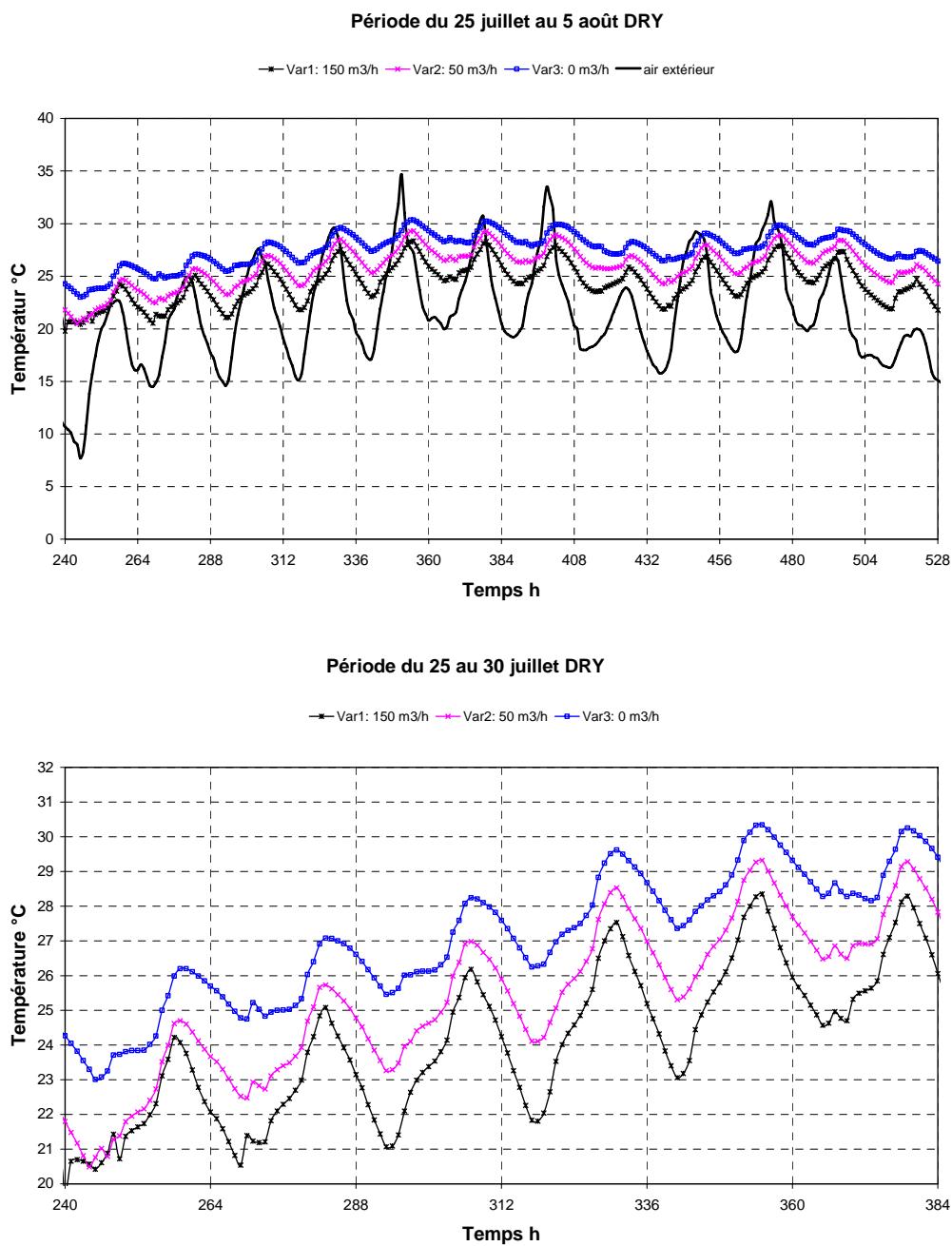


Figure 13: Influence de l'aération nocturne sur le profil de la température intérieure

Conditions marginales: isolant thermique laine de verre, porte-fenêtre de balcon $g = 0.12$, revêtement de sol moquette, parement PAF 12.5 mm, $q_i = 5 \text{ W/m}^2$, $U=0.2 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

Influence de la longueur des périodes de grande chaleur

La figure 14 donne l'évolution de la température intérieure pour des périodes de grande chaleur de 3 jours (en haut) et de 11 jours (en bas). La longueur de la période de grande chaleur influence la réponse oscillatoire de la pièce sous comble; après la période de grande chaleur de 11 jours, les pointes de température sont de 2°C plus élevées que pour la période de grande chaleur de 3 jours.

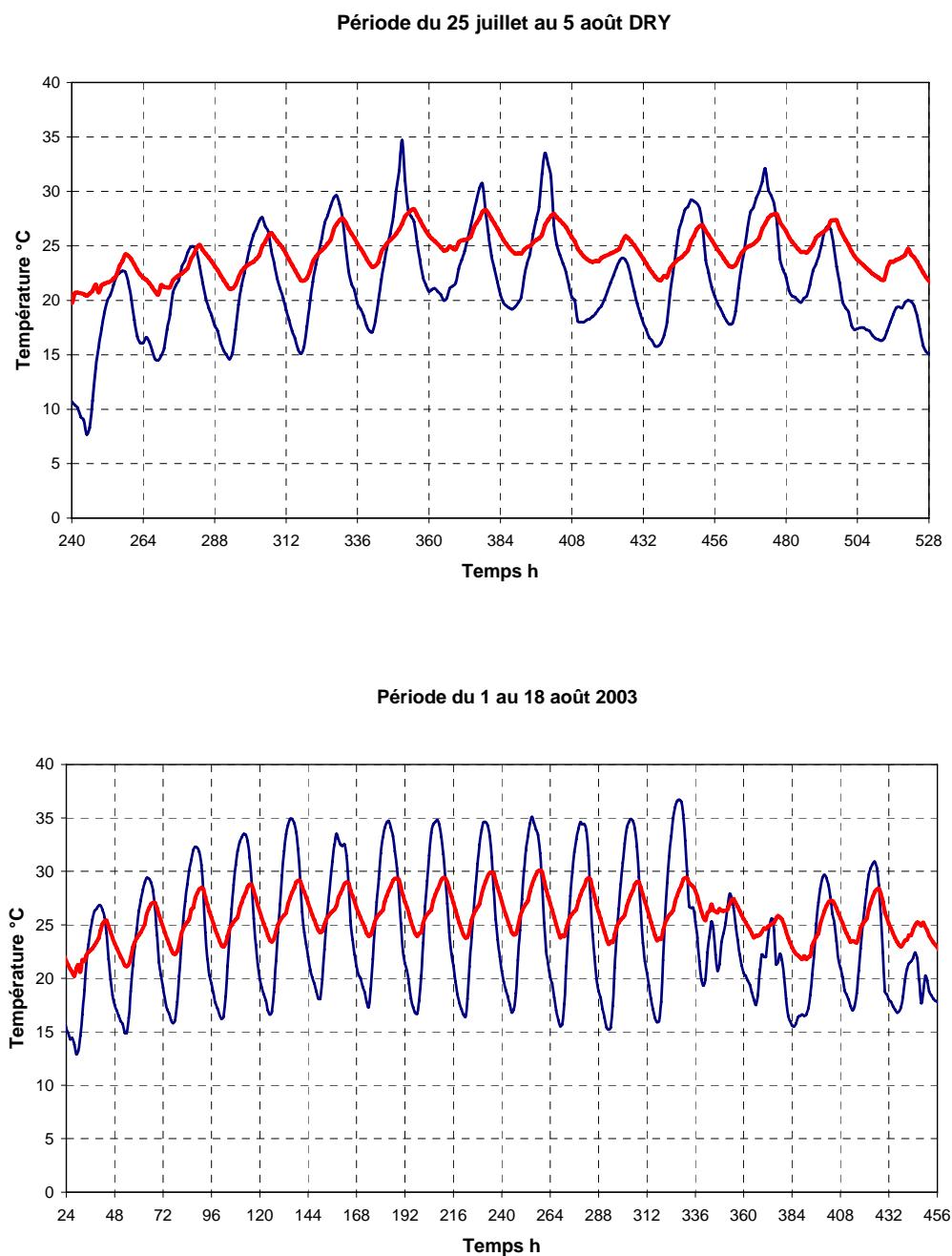


Figure 14: Influence de la longueur de la période de grande chaleur sur le profil de la température intérieure

Conditions marginales: isolant thermique laine de verre, porte-fenêtre de balcon $g=0.12$, revêtement de sol moquette, parements PAF 12.5 mm, aération nocturne $3 \frac{1}{h}$, $q_i = 5 \text{ W/m}^2$, $U=0.2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

6. Résumé

L'étude par simulation du comportement thermique estival d'une pièce sous combles avec un pourcentage de surface de fenêtre modéré a montré que l'importance à attribuer aux différents facteurs d'influence diffère fortement. Du fait des bonnes caractéristiques d'isolation thermique des bâtiments actuels et de leur bonne étanchéité à l'air, les mesures à prendre consistent à maintenir à un niveau aussi bas que possible les charges thermiques agissant sur la pièce et à les évacuer de manière ciblée par des mesures de ventilation par aération nocturne. La figure 15 représente ces différents facteurs d'influence et leurs effets sur les températures intérieures maximales. La figure 16 expose les principes d'une bonne protection thermique estivale. Les principes de planification de la protection thermique estivale basés sur le cahier technique SIA 2021 [15] sont résumés dans l'appendice 3.

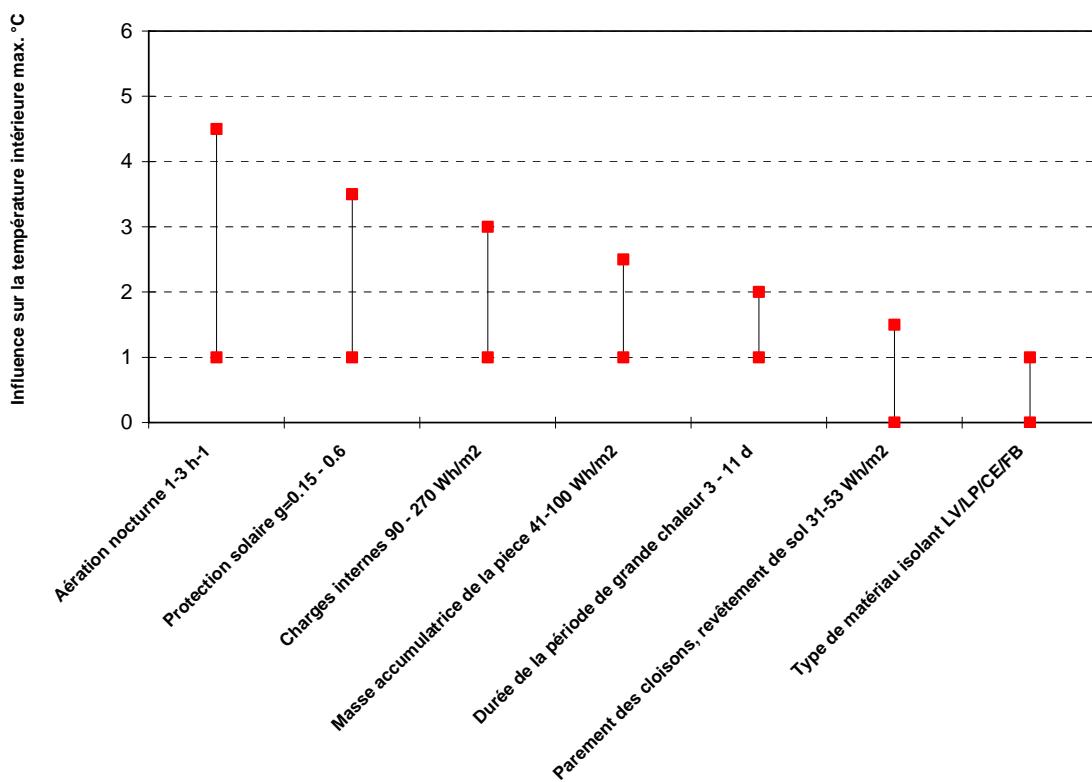


Figure 15: Facteurs d'influence et leurs effets sur le comportement en température de pièces sous combles

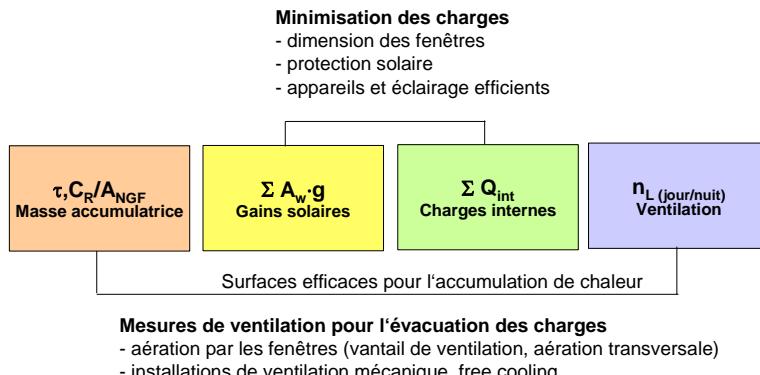


Figure 16: Principes d'une protection thermique estivale efficace de pièces sous combles

Bibliographie

- [1] Report "Uncertainty, risk and dangerous change", Recent research on climate change science from the Hadley Met Office Centre, Exeter UK, 2004
- [2] Rapport de l'OcCC «Evénements extrêmes et changements climatiques», Berne 2003
- [3] Livre vert de l'UE «Adaptation au changement climatique en Europe -option et mesures de l'UE», Bruxelles 2007
- [4] Norme SIA 381.101 - EN 12524:2000; Matériaux et produits pour le bâtiment. Propriétés hygrothermiques. Valeurs utiles tabulées
- [5] Cahier technique SIA 2001 – Edition 2007; Isolants thermiques - Valeurs thermiques déclarées et autres données relatives à la physique du bâtiment
- [6] Norme SIA 180:1999; Isolation thermique et protection contre l'humidité dans les bâtiments
- [7] Norme SIA 380/1:2007; L'énergie thermique dans le bâtimen
- [8] Norme SIA 382/1:2007; Installations de ventilation et de climatisation - Bases générales et performances requises
- [9] Recommandation SIA 382/3:1992; Preuve des besoins pour les installations de ventilation et de climatisation
- [10] Norme SIA 180.073 - EN ISO 13786:2007; Performance thermique des composants de bâtiment - Caractéristiques thermiques dynamiques - Méthodes de calcul
- [11] Norme SIA 382.706 – EN 15251:2007; Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique
- [12] Schlussbericht BFE-Projekt „Gebäudesimulationsprogramm HELIOS-XP“, Dübendorf 2006
- [13] Frank, Th.; Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland, Energy and Buildings 37 (2005) 1175-1185
- [14] SIA Dokumentation D0176 Gebäude mit hohem Glasanteil – Behaglichkeit und Energieeffizienz, Zurich 2001
- [15] SIA Merkblatt 2021 Gebäude mit hohem Glasanteil – Behaglichkeit und Energieeffizienz, Zurich 2002
- [16] Cahier technique SIA 2023, Ventilation des habitations, Zurich 2007
- [17] Cahier technique SIA 2028, Données climatiques pour la physique du bâtiment, l'énergie et les installations du bâtiment, Zurich 2008

Appendice 1 Constructions bois du toit, des parois et des plancher étudiées

Toit 1	<p>Diagram of Roof 1 showing a cross-section of a double-layered roof system. The total height is 20. The distance between supports is 57, and the distance from each support to the edge is 65, with a small gap of 8 between the supports.</p>	<p>Diagram of Roof 1 showing a perspective view of the sloped roof structure. The dimensions shown are 50, 44, and 6.</p>
Toit 2	<p>Diagram of Roof 2 showing a cross-section of a double-layered roof system. The total height is 20. The distance between supports is 57, and the distance from each support to the edge is 65, with a small gap of 8 between the supports.</p>	<p>Diagram of Roof 2 showing a perspective view of the sloped roof structure. The dimensions shown are 50, 44, and 6.</p>
Paroi extérieure 1	<p>Diagram of Exterior Wall 1 showing a cross-section of an exterior wall. The total height is 20. The distance between supports is 56.5, and the distance from each support to the edge is 62.5, with a small gap of 6 between the supports. The layers are labeled 'Innen' (inner) and 'Aussen' (outer).</p>	<p>Diagram of Exterior Wall 1 showing a cross-section of an exterior wall. The total height is 20. The distance between supports is 62.5, and the distance from each support to the edge is 56.5, with a small gap of 6 between the supports. The layers are labeled 'Innen' (inner) and 'Aussen' (outer).</p>
Paroi extérieure 2	<p>Diagram of Exterior Wall 2 showing a cross-section of an exterior wall. The total height is 20. The distance between supports is 56.5, and the distance from each support to the edge is 62.5, with a small gap of 6 between the supports. The layers are labeled 'Innen' (inner) and 'Aussen' (outer).</p>	<p>Diagram of Exterior Wall 2 showing a cross-section of an exterior wall. The total height is 20. The distance between supports is 62.5, and the distance from each support to the edge is 56.5, with a small gap of 6 between the supports. The layers are labeled 'Innen' (inner) and 'Aussen' (outer).</p>
Plancher	<p>Diagram of Floor 1 showing a cross-section of a double-layered floor system. The total height is 20. The distance between supports is 57, and the distance from each support to the edge is 65, with a small gap of 8 between the supports.</p>	<p>Diagram of Floor 2 showing a cross-section of a double-layered floor system. The total height is 20. The distance between supports is 37, and the distance from each support to the edge is 42, with a small gap of 5 between the supports.</p>

Appendice 2 Valeurs de dimensionnement thermique des matériaux de construction et des isolants thermique selon SIA 381.101 [4] et cahier technique SIA 2001 [5]

Matériaux	Masse volumique apparente ρ	Conductibilité thermique λ_D	Capacité thermique spécifique c_p	
			J/(kgK)	Wh/(kgK)
Revêtement de sol en pierre	2800	3.500	1000	0.278
Chape de ciment	2200	1.650	1000	0.278
Tuile en béton	2100	1.500	1000	0.278
Brique modulaire de terre cuite	1100	0.440	940	0.261
Crépi intérieur	1400	0.700	900	0.278
Crépi extérieur	1800	0.870	1000	0.278
Panneau de plâtre armé de fibres PAF	1150	0.320	1000	0.278
Panneau de bois OSB	650	0.130	1700	0.472
Bois d'oeuvre	500	0.130	1600	0.444
Panneau de fibres de bois (sous-toiture)	250	0.047	1400	0.389
Panneau isolant en fibres de bois tendre	55	0.038	1400	0.389
Panneau isolant en fibres de bois	150	0.042	1400	0.389
Panneau de fibres de cellulose	70	0.039	1600	0.444
Panneau isolant en fibres de pierre	32	0.036	1030	0.286
Panneau isolant en fibres de pierre	60	0.034	1030	0.286
Panneau isolant en laine de verre	20	0.035	1030	0.286
Panneau isolant en laine de verre	28	0.034	1030	0.286
Moquette	200	0.060	1300	0.361

Appendice 3 Principes de la planification pour la protection thermique estivale

■ 1^e étape: Estimation charges solaires Q_s / A_{NGF}

- Pourcentage de vitrage/ surface des fenêtres / surface de plancher
- Déterminer la protection solaire selon SIA 382/1

Sommes journalières du rayonnement solaire I_s

- Surfaces horizontales	6000 Wh/(m ² d)
- Surfaces toit incliné E/S/O	7000 Wh/(m ² d)
- Surface toit incliné N	5000 Wh/(m ² d)
- Surfaces verticales E/SO	4000 Wh/(m ² d)
- Surface verticale N	2000 Wh/(m ² d)

■ 2^e étape: Estimation charges thermiques internes Q_i / A_{NGF}

- Densité d'occupation par les personnes
- Appareils électriques et éclairage

Charges internes dans les immeubles d'habitation

- basses	5 W/m ²	90 Wh/(m ² d)
- moyennes	10 W/m ²	180 Wh/(m ² d)
- élevées	15 W/m ²	270 Wh/(m ² d)

■ 3^e étape: Détermination charges thermiques totales Q_{tot} / A_{NGF}

$$Q_{tot} / A_{NGF} = (Q_s + Q_i) / A_{NGF} \quad \text{en Wh/(m}^2\text{ d)}$$

■ 4^e étape: Détermination de la capacité thermique C_R / A_{NGF}

■ 5^e étape: Fixation des mesures de ventilation

- Aération par ouverture des fenêtres, ventilation mécanique
- Possibilité d'aération nocturne

■ 6^e étape: Evaluation des risques

- définir la poursuite des opérations
- calculs de simulation
- évaluation des mesures optimales

Schéma pour l'évaluation des risques pour les données météorologiques DRY Zürich-Kloten avec 3 jours de grande chaleur et $\theta_{e,\max} = 35^\circ\text{C}$

Capacité thermique C_R / A_{NGF} Wh/(m ² K)	Mesures de ventilation	Somme journalière des charges $Q_{tot} / A_{NGF} = (Q_s + Q_i) / A_{NGF}$ Wh/(m ² d)		
		150	250	350
30	Pas d'aération nocturne	$\theta_{i,\max} \sim 30^\circ\text{C}$	$\theta_{i,\max} \sim 32^\circ\text{C}$	$\theta_{i,\max} \sim 35^\circ\text{C}$
	Aération nocturne $n_L \sim 1 \text{ 1/h}$	$\theta_{i,\max} \sim 29^\circ\text{C}$	$\theta_{i,\max} \sim 31^\circ\text{C}$	$\theta_{i,\max} \sim 33^\circ\text{C}$
	Aération nocturne $n_L \sim 3 \text{ 1/h}$	$\theta_{i,\max} \sim 28^\circ\text{C}$	$\theta_{i,\max} \sim 30^\circ\text{C}$	$\theta_{i,\max} \sim 31^\circ\text{C}$

Echelle d'évaluation

