

LESO-PB

Confort et énergie dans les bâtiments

Roulet C.-A.

Cycle Postgrade “Les Constructions en Bois”



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

INSTITUT DE TECHNIQUE DU BÂTIMENT
LABORATOIRE D'ÉNERGIE SOLAIRE ET DE PHYSIQUE DU BÂTIMENT

CYCLE POSTGRADE "LES CONSTRUCTIONS EN BOIS"
CONFORT ET ÉNERGIE DANS LES
BÂTIMENTS

Roulet Claude-Alain

10 mars 2000

CONFORT ET ÉNERGIE DANS LES BÂTIMENTS

1	Conditions pour un bon environnement intérieur.....	0
1.1	Conditions générales.....	0
1.2	Le confort.....	1
1.3	Confort thermique.....	1
1.4	Courants d'air.....	3
1.5	Qualité de l'air.....	4
1.5.1	Source de polluants et concentrations.....	4
1.5.2	Odeurs.....	5
1.6	Éclairage.....	6
1.6.1	Besoins.....	6
1.6.2	Avantages de l'éclairage naturel.....	6
1.6.3	Planification et contrôle de l'éclairage naturel.....	7
2	Flux d'énergie dans le bâtiment en hiver.....	8
2.1	Bilan énergétique.....	8
2.2	Pertes par transmission et isolation optimale.....	9
2.2.1	Déperditions de chaleur par transmission et température de surface.....	9
2.2.2	Épaisseur optimale.....	9
2.2.3	Isolation uniforme.....	12
2.3	Pertes par ventilation et aération optimale.....	12
2.3.1	Gestion des sources.....	12
2.3.2	Débit minimum requis.....	13
2.3.3	Contrôle des débits.....	13
2.3.4	Gestion des ouvertures et suppression des fuites.....	14
2.4	Optimisation des gains solaires.....	15
2.5	Production et émission de chaleur.....	15
3	Protection thermique d'été et inertie thermique.....	16
3.1	Protections solaires.....	16
3.2	Refroidissement passif.....	17
3.2.1	Principe.....	17
3.2.2	Règles et recommandations pour l'application du refroidissement passif.....	18
3.2.3	Avantages et inconvénients.....	20
4	Humidité, isolation et aération.....	21
4.1	Risques relatifs à l'humidité.....	21
4.2	Causes de dégâts dus à l'humidité.....	21
4.3	Humidité de l'air.....	22
4.4	Risques de moisissures sur les parois extérieures des bâtiments.....	24
4.5	Condensation interstitielle.....	26
5	Conclusions.....	27
6	Références.....	28

1 CONDITIONS POUR UN BON ENVIRONNEMENT INTÉRIEUR

1.1 Conditions générales

Les exigences actuelles peuvent être classées en plusieurs catégories: exigences de confort thermique, exigences de qualité d'air, d'éclairage et de bruit, et exigences en termes de consommation d'énergie.

Il doit être clair que les besoins des occupants passent avant les exigences énergétiques. Le bâtiment est d'abord construit pour assurer le bien être de l'occupant, et non pour économiser de l'énergie. Dans le cas contraire, on économiserait un maximum d'énergie en ne construisant pas le bâtiment. Il n'est toutefois pas correct de gaspiller l'énergie, notamment parce que la pollution qui en résulte est nuisible à l'occupant.

Dans les climats tempérés et froids, la plus grande part de l'énergie utilisée par un bâtiment sert au chauffage. Le flux de chaleur créé dans ce but part de la chaudière pour aboutir à l'extérieur par différentes voies plus ou moins directes.

Dans les climats plus chauds, il peut être nécessaire et en tout cas confortable d'abaisser la température intérieure des bâtiments. Ce refroidissement peut aussi être un grand consommateur d'énergie.

Un bâtiment devrait assurer, sans aucune consommation d'énergie, un confort au moins équivalent à celui régnant à l'extérieur. S'il est bien conçu et construit, il peut fournir un confort nettement supérieur (courbe A de la Figure 1). Un tel bâtiment ne surchauffe pas ou peu en été et profite des gains solaires pendant les périodes froides, pour raccourcir la saison de chauffage. Un bâtiment inadapté à son climat, (des exemples typiques sont des hôtels d'une grande chaîne internationale quelconque ou les baraques militaires) a tendance à surchauffer en saison chaude et à être glacial en saison froide. Ces bâtiments requièrent de grandes quantités d'énergie pour assurer un confort acceptable.

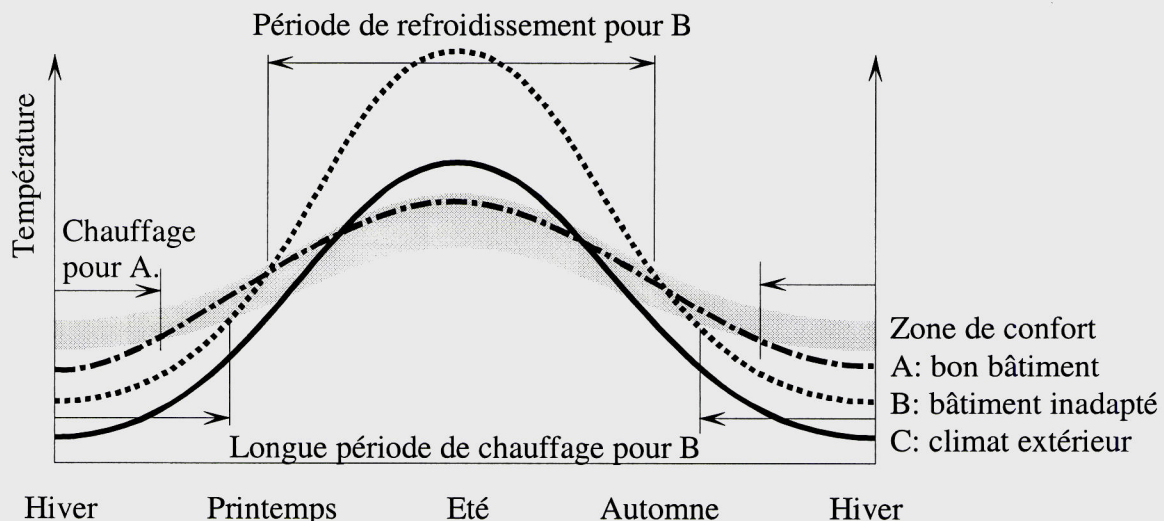


Figure 1: Évolution des températures dans des bâtiments au cours de l'année, sans effet des installations techniques de chauffage ou climatisation. La bande grisée représente les exigences de confort. C représente la température extérieure, A un bâtiment bien conçu et B un bâtiment inadapté à son climat.

1.2 Le confort

Le confort est un état de bien être général. Indépendamment des conditions propres à l'individu (métabolisme, activité, habillement), il est reconnu que les paramètres suivants interviennent dans le confort:

Conditions thermiques:	Température de l'air Sources de rayonnement (radiateurs, poêles, soleil) Température des surfaces environnantes Perméabilité thermique des surfaces en contact avec le corps Vitesse relative de l'air par rapport au sujet
Qualité de l'air:	Humidité relative de l'air Pureté de l'air, polluants Concentration en ions?
Acoustique	Niveau de bruit, nuisance acoustique Temps de réverbération (durée d'écho)
Optique:	Éclairage naturel et artificiel Couleurs Volumen intérieur et distribution des volumes
Autres influences:	Degré d'occupation des locaux "Ambiance"

etc.

Nous nous limiterons ici essentiellement aux conditions thermiques et aérauliques.

1.3 Confort thermique

Le confort thermique ne tient compte que des paramètres suivants:

Les facteurs liés à l'environnement:

- Températures de l'air et des surfaces environnantes
- Vitesse relative de l'air et le degré de turbulence
- Pression de vapeur d'eau ou humidité relative

Les facteurs liés à l'individu:

- Son activité et le rendement de cette activité.
- Son habillement.

Ainsi, contrairement à ce qui est généralement admis, il est erroné de vouloir satisfaire ces critères de confort par une simple régulation de la température de l'air intérieur de l'habitation.

Le confort est mesuré *a contrario* par le taux d'insatisfaction des occupants. Le **pourcentage d'insatisfaits** exprime la part des sujets insatisfaits dans une condition donnée.

A cause des différences physiologiques, il s'avère impossible de satisfaire tout le monde en réunissant des conditions "idéales". Par contre, il est possible de créer un environnement dans lequel le pourcentage de personnes satisfaites est maximum. Ainsi, dans les conditions les meilleures possibles, il reste 5 % d'insatisfaits, la moitié ayant trop froid, l'autre moitié trop chaud.

En comparant les réponses d'un grand nombre de personnes mises dans des conditions de confort diverses, avec leur bilan thermique donné par des relations bien connues de la physique, Fanger [1] a établi une équation prédisant l'opinion moyenne d'une population à partir des paramètres de confort. Cette équation est à la base de la Figure 2 qui donne la température

opérative idéale en fonction de l'activité et de l'habillement, et ce pour une vitesse de l'air basse (moins de 0,1 m/s) et une humidité relative normale (35 à 65%). Les parties ombrées donnent l'écart acceptable autour de la température idéale, donc les domaines où il n'y aurait que 10% d'insatisfaits.

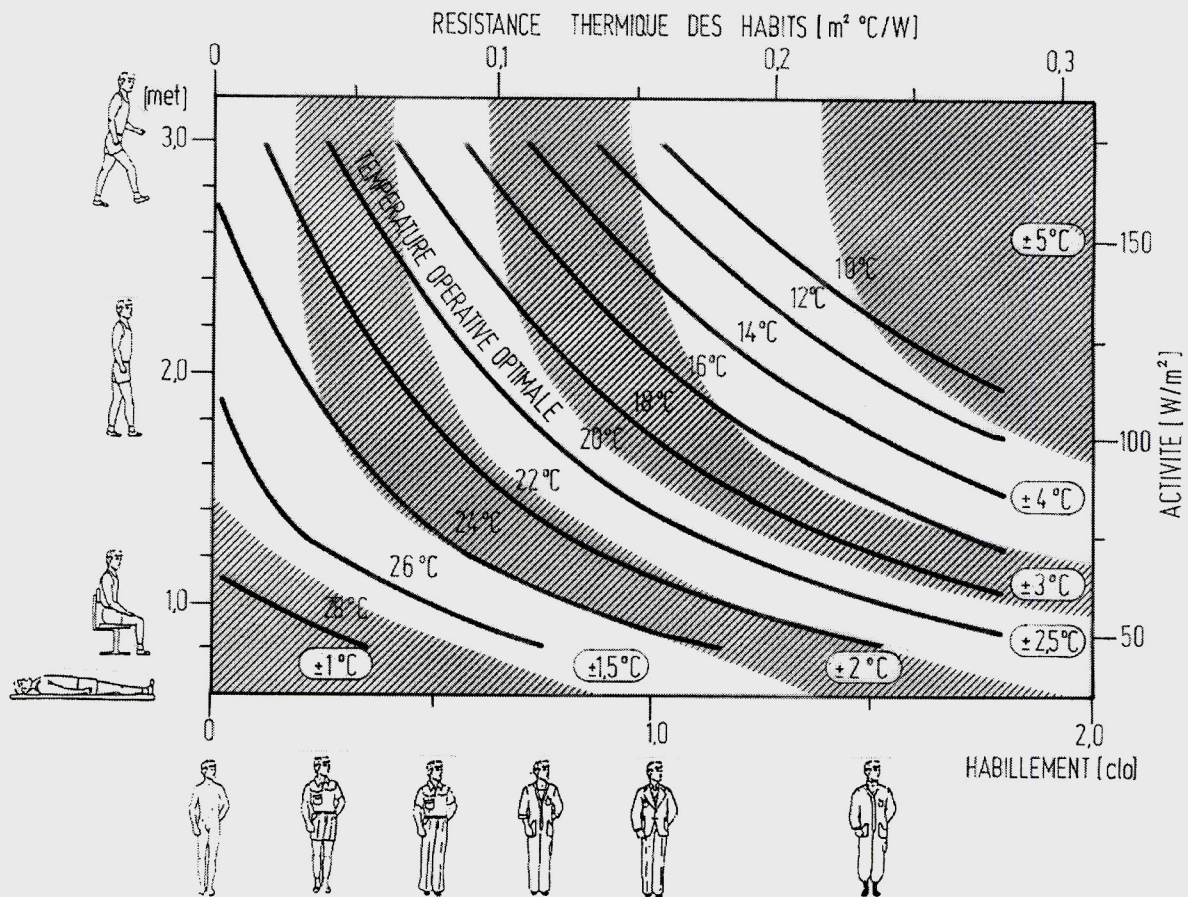


Figure 2: Température opérative idéale en fonction de l'habillement et du métabolisme. [2]

La température opérative est une moyenne pondérée de la température de l'air et de la température radiante:

$$\theta_{op} = a \theta_a + (1 - a) \theta_r \quad (1)$$

où $a = 0.5 + 0.25v$ si v est la vitesse relative de l'air. A vitesse de l'air nulle, la température opérative est la moyenne entre la température de l'air et la température radiante.

L'humidité relative n'a que peu d'influence sur la sensation de confort tant qu'elle est comprise entre 30 et 70 % et que la température opérative est confortable.

Pour utiliser l'équation de Fanger, il faut connaître les valeurs des différentes variables. Les températures, l'humidité et la vitesse de l'air se mesurent sur place ou se calculent au moyen de modèles. On utilisera la Table 1 pour les taux de métabolisme et la Table 2 pour l'habillement. Ces valeurs ont été mesurées en laboratoire.

Le taux de métabolisme ou l'activité peut être rapporté à un taux conventionnel, par exemple celui d'un individu assis tranquille. L'unité est alors le **met**, qui correspond à une puissance de 58 W dissipée par mètre carré de surface du corps.

Table 1: Taux de métabolisme moyen correspondant à diverses activités [2]

Activité	Taux en met
Sommeil	0,8
Assis tranquille	1,0
Activité sédentaire (bureau, lecture, études)	1,2
Activité légère, debout	1,6
Travail debout (ménage, usine)	2,0
Marche (4 km/h)	2,8
Marche (5 km/h)	3,4
Course 10 km/h	8,0

L'habillement donne lieu à une résistance thermique entre la surface de la peau et l'environnement. On peut donc, à l'aide de mannequins chauffants, mesurer cette résistance thermique et l'exprimer en $\text{m}^2\text{K/W}$. Il est aussi usuel de l'exprimer en **clo** (pour clothing). 1 clo correspond à une résistance thermique de $0.155 \text{ m}^2\text{K/W}$. C'est la résistance thermique du complet-veston. Quelques exemples sont donnés dans la Table 2.

Table 2: Valeurs en clo pour quelques habillements [2]

Habillement	valeur en clo
Nu, debout	0.0
Shorts, costume de bain	0.1
Tenue tropicale: chemise courte, shorts et sandales	0.3 - 0.4
Tenue d'été: idem, mais pantalons longs légers	0.5
Tenue de ville légère	0.8
Complet - veston - cravate	1.0
Idem avec manteau de coton	1.5
Tenue d'hiver fourrée	3.0

La conséquence pratique pour les bâtiments commerciaux et les logements (où l'activité avoisine 1,1 met) est que la température opérative idéale en hiver (habillement de 1 clo) est comprise entre 20 et 24°C, alors qu'en été (habillement de 0,5 clo) elle est comprise entre 22 et 26 °C. Rappelons qu'il ne s'agit pas de la température de l'air seulement, mais d'une combinaison entre celle-ci et la température radiante.

1.4 Courants d'air

L'équation de Fanger ne tient pas compte de certains facteurs d'inconfort supplémentaires tels que les gradients de température, les contacts avec les surfaces froides, l'effet désagréable des courants d'air ou les effets dynamiques.

Le pourcentage d'individus ressentant des courants d'air alors que, à vitesse d'air nulle, leur confort est idéal, dépend non seulement de la vitesse et de la température de l'air mais aussi de son degré de turbulence.

On voit par exemple sur la Figure 3 que, pour limiter le pourcentage d'insatisfaits à 10% si la vitesse de l'air est de 0,4 m/s, il faut une température d'au moins 28°C en régime laminaire (turbulence nulle) ou 33°C par forte turbulence. Les mesures ont été effectuées avec un habillement adapté à la température. Ces conditions dépendent toutefois relativement peu de l'habillement, car les courants d'air sont ressentis par les parties dénudées du corps, notamment la tête, la nuque et les chevilles.

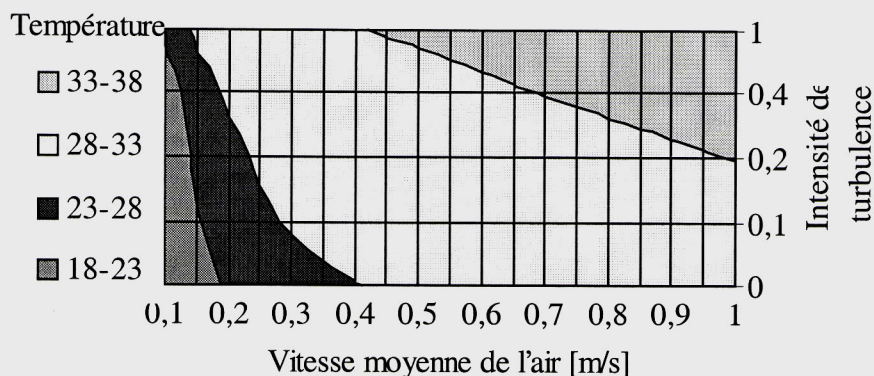


Figure 3: Combinaisons de vitesse moyenne, d'intensité de turbulence et de température qui cause 10% d'insatisfaits (d'après [3])

En règle générale, on évite de causer des courants d'air dont la vitesse excède 0,2 m/s dans la zone occupée. Il est même recommandé de ne pas dépasser 0,1 m/s. Il convient aussi de se rappeler qu'il est extrêmement difficile de réaliser un environnement intérieur où l'intensité de turbulence est inférieure à 30%.

1.5 Qualité de l'air

1.5.1 Source de polluants et concentrations

Un air de bonne qualité ne contient pas d'impuretés en quantités gênantes ou dangereuses pour les occupants. Dans une zone homogène, la concentration en impuretés dépend de l'intensité de la source de cette impureté et du débit d'air pur. En première approximation, la concentration résultant d'une source de polluant est directement proportionnelle à l'intensité de la source (débit de polluant) et inversement proportionnelle au débit d'air pur (voir 2.3).

Les polluants à considérer sont la vapeur d'eau, les odeurs, divers composés gazeux (CO, CO₂, NO_x, composés organiques volatils, radon, etc.) et même la chaleur. Une personne produit approximativement 18 litres de CO₂ et 80 g de vapeur d'eau par heure. Des valeurs plus détaillées sont données dans la Table 3.

Table 3: Valeurs indicatives de la production de vapeur d'eau pour quelques sources [4]

Source de vapeur d'eau	émission [g/h]
personne, travail léger	30 - 60
personne, travail ménager	60 - 90
personne, travail lourd	100 - 200
cuisine	400 - 800
lave vaisselle	200 - 400
douche	1500 - 3000
bain	600 - 1200
surface d'eau ouverte (par m ²)	30 - 50
plantes d'ornement en pot	7 - 15
figus	10 - 20

1.5.2 Odeurs

Les odeurs proviennent de quantités minimales de milliers de composés divers, souvent en mélange, et rarement tous identifiés. A l'heure actuelle, rien ne remplace le nez pour qualifier et même quantifier les odeurs. De ce fait, la concentration est difficile à quantifier de façon usuelle (en volume ou en poids) et un nouveau concept est nécessaire.

Les odeurs peuvent être quantifiées, selon Fanger, de la manière suivante [5]: on définit l'**olf** comme la quantité d'odeurs corporelles émises par un individu moyen, se lavant pratiquement chaque jour et changeant de linge régulièrement. Le **pol** est la concentration en odeurs corporelles résultant d'une émission permanente d'un olf dans un débit de 1 l/s d'air pur.

Le pourcentage d'insatisfaits de l'odeur de l'air parmi les personnes entrant dans un local est lié à la concentration en odeurs corporelles dans ce local par la relation empirique illustrée dans la Figure 4.

Cette relation est aussi à la base de la mesure des odeurs: On demande à des personnes de bien se rafraîchir le nez en respirant de l'air pur, puis de donner leur première impression sur l'air d'un local donné, immédiatement après y être entré. Le jury peut être constitué par au moins 50 personnes non entraînées et la charge olfactive est déduite du pourcentage d'insatisfait parmi ce jury. Pour des raisons pratiques, un plus petit nombre de personnes est préférable. Il a été démontré qu'un jury de 12 personnes sélectionnées pour leur sensibilité olfactive et bien entraînées peut juger un air directement en pol.

Pour éviter de dépasser 10% d'insatisfaits parmi des personnes entrant dans la pièce, il convient donc d'assurer un débit d'au moins 17 l/(s·olf.) ou 60 m³/(h·olf). Ce débit peut être beaucoup plus faible si on ne désire satisfaire que les occupants. Notons que:

1. les odeurs désagréables peuvent provenir d'autres sources que les personnes: mobilier, matériaux de construction, cuisine, fumeurs, etc. Pour quantifier ces odeurs, on admet qu'un pol dû à ces odeurs est équivalent à un pol provenant d'une personne, et que l'on peut ajouter ces concentrations. Cette hypothèse d'additivité reste discutable et est discutée.

Ceci étant admis, il apparaît qu'un fumeur représente en moyenne une source d'odeurs désagréables d'environ 6 olf, et cette intensité monte à 25 olf pendant qu'il fume.

2. Les contaminants non odorants (radon, CO₂, etc.) ne sont pas mesurés par l'insatisfaction des usagers. La satisfaction des usagers n'est donc pas la seule condition à prendre en compte.

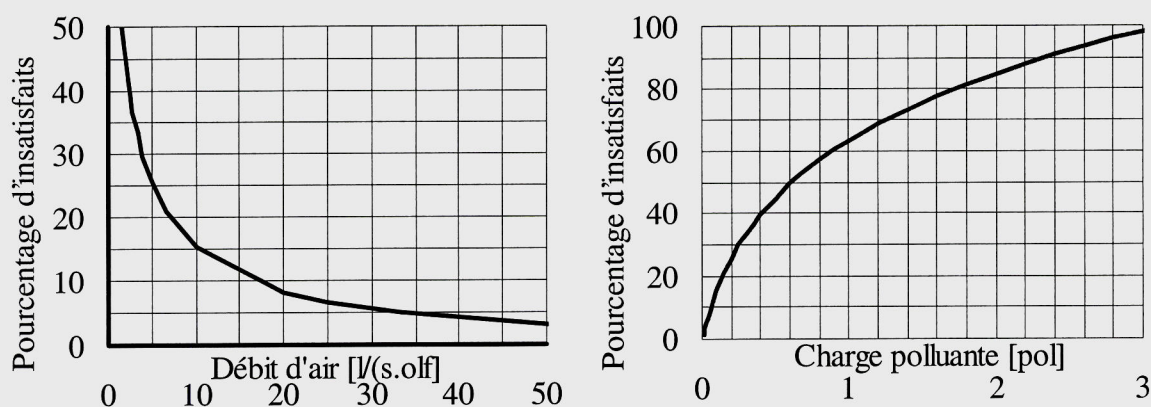


Figure 4: Pourcentage d'insatisfaits de la qualité de l'air dans une population entrant dans un local, en fonction de sa charge polluante et du débit d'air spécifique (par olf)

1.6 Éclairage

1.6.1 Besoins

Les conditions d'éclairage nécessaires pour assurer la satisfaction des usagers dépendent de l'utilisation des locaux. La caractéristique la plus importante quantifiant la qualité de l'éclairage est l'éclairement local (Table 4) et sa répartition.

L'Union Suisse pour la Lumière (USL) recommande, dans sa publication ASE 8912-1/2, 1977 les valeurs de la Table 4 pour l'éclairage artificiel des locaux. Il est toutefois reconnu actuellement que ces exigences peuvent être réduites. Par exemple, on admet actuellement un éclairage de 350 à 400 lux dans un bureau.

Table 4: Éclairagements recommandés

Type de locaux et d'activité	Eclairement requis [lux]		
	Min.	Moyenne	Max.
Circulation, corridors, théâtres, salle de concert	50	100	150
Écoles, bureaux, magasins, ateliers, halles de montage	300	500	750
Ateliers de précision	1000	1500	2000

D'autres paramètres que l'éclairage ont néanmoins de l'importance. Citons notamment:

- le spectre de la lumière, ou sa teinte. Ce spectre doit être de préférence continu (pas de raies monochromes) et adapté au niveau d'éclairage.
- la localisation et la répartition des sources de lumière
- la brillance, les contrastes et les ombres perçues.

La luminance L , à savoir l'intensité lumineuse par mètre carré de surface vue, ne doit pas trop varier dans le champ visuel. Les rapports suivants peuvent être adoptés en tant que limites admissibles:

$L/L' < 3$ entre les surfaces vues directement (L) et les surfaces adjacentes (L'), par exemple entre un papier et la surface de la table.

$L/L' < 10$ entre la surface vue directement (L) et un environnement plus lointain L' (parois, sols, etc.).

$L/L' < 50$ entre l'endroit le plus clair (L) et l'endroit le plus sombre (L') du champ visuel; par exemple entre la fenêtre et les parois adjacentes.

L'éblouissement, à savoir un flux lumineux trop important reçu directement dans les yeux doit être évité. Ce phénomène peut apparaître dans les locaux à grandes fenêtres, en hiver, lorsque le soleil est bas sur l'horizon. Des protections intérieures doivent être prévues pour éviter cet éblouissement tout en laissant la chaleur solaire pénétrer dans le bâtiment. Ce peut être des voilages ou des stores à lamelles. Ces derniers peuvent être posés avec la concavité vers le haut, de façon à réfléchir la lumière vers le plafond.

1.6.2 Avantages de l'éclairage naturel

La lumière naturelle est la source lumineuse de référence, la seule à donner un rendu correct des couleurs. Elle est indispensable à la croissance et à l'équilibre psychologique. L'éclairage naturel permet en outre:

- de réduire la consommation d'énergie de l'éclairage artificiel,
- de diminuer la charge thermique des locaux (à flux lumineux égal, l'éclairage naturel amène deux à trois fois moins de chaleur que la plupart des sources de lumière artifi-

cielle), donc de réduire la consommation d'énergie de refroidissement tout en améliorant le confort,

- d'accroître la productivité du personnel.

1.6.3 Planification et contrôle de l'éclairage naturel

En Suisse, l'éclairement sur un plan horizontal à l'extérieur dépasse 10'000 lux pendant plus de 70% des heures de travail (2500 heures par an). Toutefois, seule une partie de cette lumière pénètre à l'intérieur du bâtiment. On définit le facteur de lumière du jour (en un endroit), ou FLJ, par le rapport de l'éclairement sur le plan de travail à l'éclairement extérieur, et ce par ciel couvert.

Si le FLJ est supérieur à 3%, on obtiendra 300 lux ou plus pendant la majorité des heures de travail. Les locaux sont jugés lumineux. Pour obtenir un tel résultat, il faut installer de grandes et hautes fenêtres, libres d'obstacles, de manière que l'on voie une partie appréciable du ciel depuis la place de travail, et utiliser des teintes très claires dans l'agencement des locaux.

On cherchera, par une disposition judicieuse des fenêtres, à répartir la lumière du jour aux endroits où elle est nécessaire. La Figure 5, par exemple, montre des exemples de distribution du FLJ dans une pièce. Courbe (a) sans éclairage zénithal, coefficient de réflexion interne de 40%; (b) le coefficient de réflexion est abaissé à 25% et (c) avec éclairage zénithal et coefficient de réflexion de 40 %

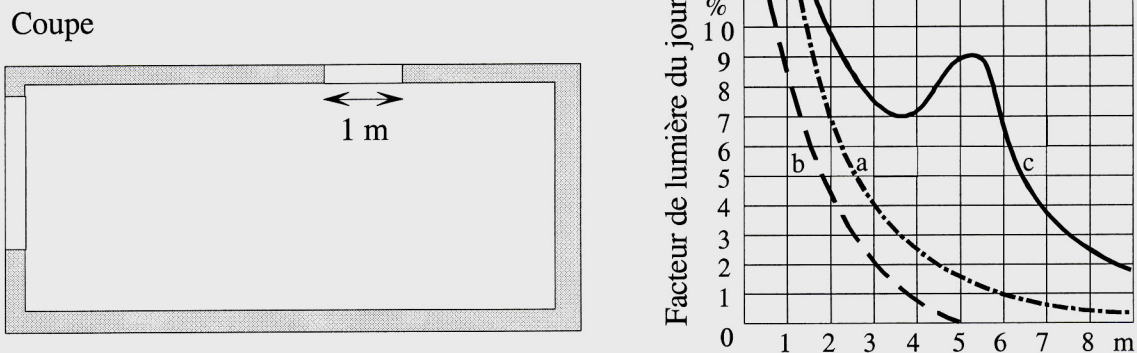


Figure 5: Exemples d'éclairage naturel.

Des dispositifs spéciaux (miroirs, lumiducs, etc.) permettent aussi d'améliorer l'éclairage naturel en fond de pièce, et peuvent se justifier par des économies en éclairage artificiel.

Il est possible de déterminer le FLJ, et même l'aspect du local placé sous le ciel, avant la construction. Il existe en effet des programmes d'ordinateurs permettant de simuler l'éclairement d'un local sous un ciel donné. On a aussi la possibilité de placer des maquettes de l'objet futur sous un ciel ou un soleil artificiel.

2 FLUX D'ÉNERGIE DANS LE BÂTIMENT EN HIVER

2.1 Bilan énergétique

Le *bilan énergétique* du bâtiment est basé sur le fait que pratiquement toute l'énergie entrant dans un bâtiment finit par être transformée en chaleur. Étant donné qu'en moyenne, l'intérieur du bâtiment est à température constante, toute cette énergie finit par en sortir. Le bâtiment peut être comparé à un tonneau des Danaïdes dans lequel on maintient un niveau de confort en le remplissant continuellement d'énergie (Figure 6). On peut améliorer l'étanchéité du tonneau en isolant le bâtiment, et éviter qu'une partie de l'énergie soit perdue, parce que versée à côté du tonneau.

Le bilan énergétique est une comptabilité des entrées et des sorties d'énergie du bâtiment pendant une période de temps donnée. Ce bilan doit évidemment être équilibré, par conservation de l'énergie. Le bilan énergétique détaille donc toutes les pertes et tous les gains, les sommes des gains et des pertes étant égales si la période de consommation est suffisamment grande (par exemple une année, voire un mois s'il n'existe pas de capacité de stockage particulièrement grande).

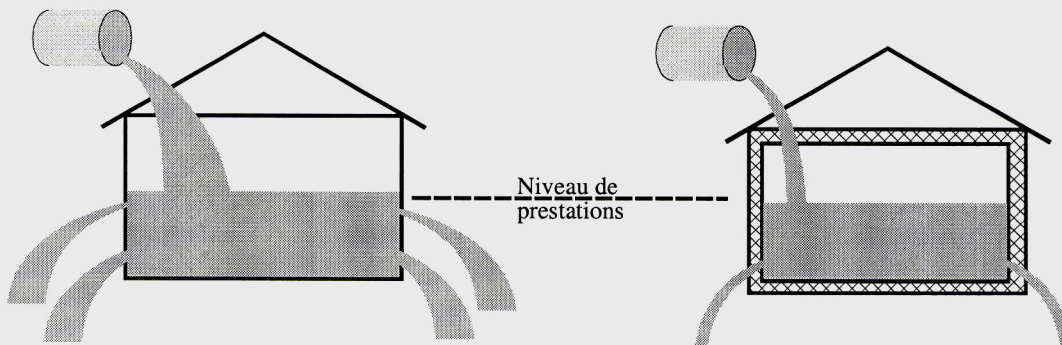


Figure 6: Le bâtiment est un tonneau des Danaïdes: on maintient le confort grâce à un flux d'énergie. A gauche, bâtiment mal isolé, à droite, bâtiment correct.

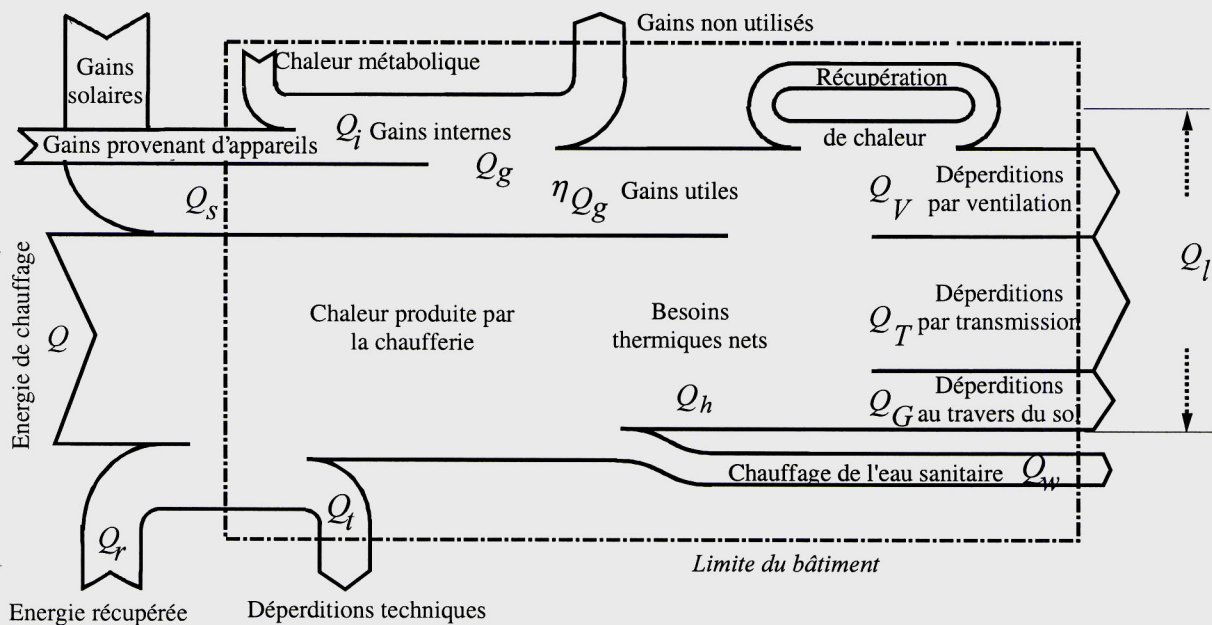


Figure 7: Flux globaux d'énergie concernant un bâtiment [6].

Nous allons examiner comment minimiser la consommation d'énergie tout en satisfaisant les exigences des occupants à un coût raisonnable.

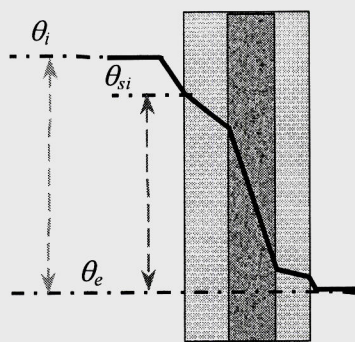
2.2 Pertes par transmission et isolation optimale

2.2.1 Déperditions de chaleur par transmission et température de surface

Les déperditions de chaleur au travers des parois (murs, vitrages, toitures, dalles, etc.) sont proportionnelles à la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur, à la surface de la paroi et à son coefficient de transmission thermique U :

$$q = U A \Delta T \quad (2)$$

Le seul moyen confortable de réduire ces déperditions est de réduire le coefficient U . Pour cela, on dispose dans la paroi une certaine épaisseur de matériau isolant.



De plus, nous avons vu que la sensation de confort thermique dépend de la température des parois environnantes. Or, plus une paroi extérieure est isolée, plus haute est la température de surface intérieure. L'écart entre la température de l'air et la température de surface est proportionnel au coefficient U . On définit le facteur de température superficiel par le rapport :

$$f_{R_{si}} = \frac{\theta_{s,i} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad (3)$$

où θ représente les températures. L'indice i désigne l'intérieur et e l'extérieur. $\theta_{s,i}$ est la température à la surface intérieure de la paroi. Pour une paroi formée de couche planes, homogènes et parallèles :

$$f_{R_{si}} = 1 - R_{si} U \quad (4)$$

où U est le coefficient de transmission thermique de la paroi, en $W/(m^2K)$ et R_{si} la résistance thermique superficielle intérieure (entre 0,1 et 0,5 m^2K/W). Le facteur de température superficiel qualifie le niveau d'isolation thermique. S'il est nul, l'isolation est nulle, s'il vaut 1, l'isolation est parfaite.

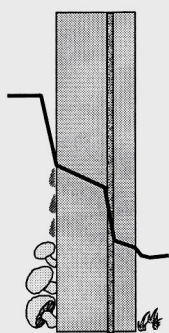
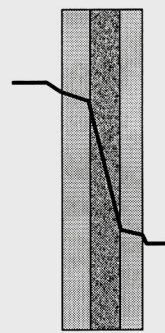


Figure 8: degré d'isolation

Faible isolation, basse température de surface intérieure, risque de condensation et de moisissures à moins d'augmenter fortement l'aération.



Bonne isolation: haute température de surface intérieure, confort et santé, avec une aération correcte.

Pour que la température de surface soit proche de la température de l'air par les plus grands froids, le coefficient U devrait être inférieur à $0.4 W/m^2K$. Cette valeur, considérée actuellement à juste titre comme une valeur maximale, est atteinte avec 10 cm d'isolant de bonne qualité.

2.2.2 Épaisseur optimale

Le prix ou la quantité d'énergie consommée pour la construction augmente avec l'épaisseur d'isolant. Par contre, le coût du chauffage ou l'énergie consommée pendant l'exploitation

diminue avec cette épaisseur. Le coût total, montré sur la Figure 9, présente alors un minimum pour une épaisseur optimale, qu'il est possible de calculer.

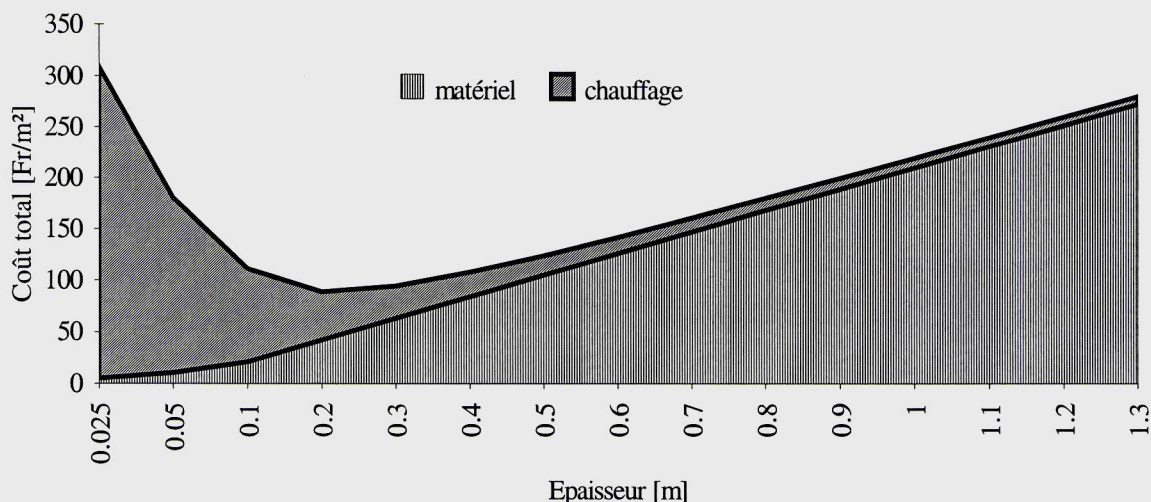


Figure 9: Coût total pour une isolation en laine minérale, en fonction de l'épaisseur. Le calcul ne tient pas compte des surcoûts éventuels nécessaires pour des raisons de statique ou autres, à partir de certaines épaisseurs.

Si l'on cherche à minimiser soit le coût total (investissement et chauffage), soit la consommation d'énergie totale (fabrication, montage et chauffage), on peut trouver une épaisseur optimale pour un matériau donné. Cette épaisseur dépend des données climatiques, de la conductibilité thermique, ainsi que du prix ou du contenu énergétique du matériau isolant considéré, et de la durée de vie de l'élément de construction [7]. Quelques épaisseurs optimales, pour les conditions climatiques indiquées, sont données dans la Table 5.

Table 5: Épaisseurs optimales pour divers matériaux, pour les conditions de calcul suivantes:

Degrés-jour de chauffage	3200 Kd
Durée de vie du bâtiment	50 ans
Rendement de chauffage	80 %
Prix de l'énergie	5 ct/kWh

Isolant	ρ kg/m ³	λ W/m K	Coût Fr/m ³	Coût MJ/m ³	Epaisseur optimale	
					Financière	Energétique
Laine de pierre	60	0.035	210	790	0.19	0.87
Laine de verre	35	0.035	210	1140	0.19	0.72
Polystyrène	20	0.042	147	2500	0.25	0.53
Polyuréthane	30	0.030	293	5000	0.15	0.32
Bois de construction	400	0.14	500	7800	0.24	0.53
Brique thermique	700	0.160	270	4600	0.35	0.75
Brique module	1100	0.440	200	3300	0.65	1.44

Ces résultats sont illustrés sur la Figure 10. On remarque que les épaisseurs optimales sont nettement plus élevées que les épaisseurs couramment pratiquées. Ceci montre qu'il est rentable d'augmenter les épaisseurs d'isolant.

La Figure 11 montre le coût total pour les divers matériaux, pour une épaisseur optimale. On remarque que ce coût est également réparti entre l'investissement et le coût d'exploitation. On notera aussi que la différence entre les divers matériaux isolants est faible.

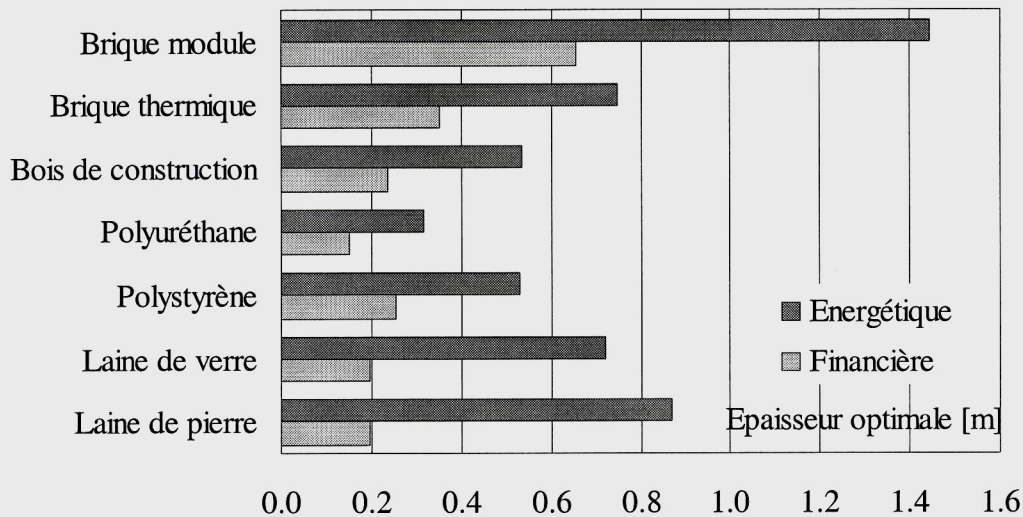


Figure 10: Épaisseurs optimales de divers matériaux, du point de vue financier et énergétique, et pour les conditions de calcul données dans la table 1. On remarque que l'épaisseur de 20 cm est justifiée pour tous les matériaux.

Notons que l'épaisseur optimale augmente avec le prix de l'énergie. Or, on connaît le prix actuel de l'énergie, mais quel sera-t-il dans 20 ans, alors que l'élément de construction sera toujours utilisé? Un centimètre d'isolant en plus ne coûte pas cher à l'installation, mais peut coûter cher s'il manque à l'exploitation.

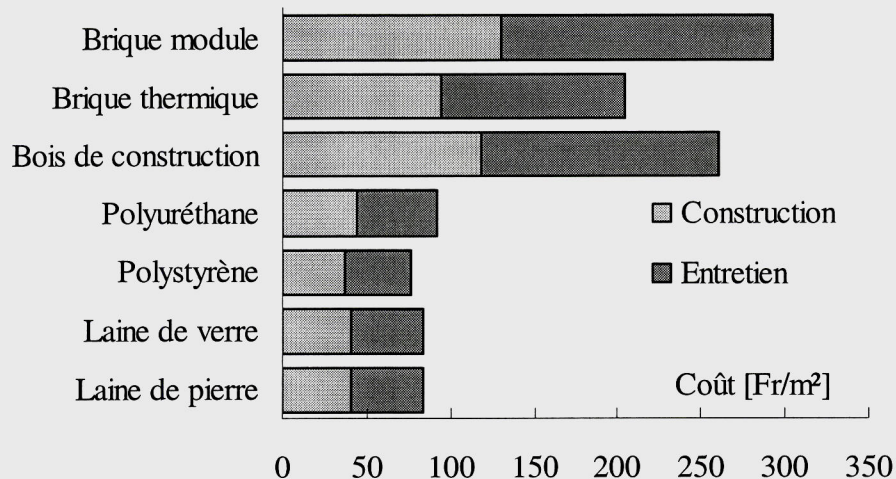


Figure 11: Coût total, financier ou énergétique, pour divers matériaux. Ce coût comprend le coût de construction et le coût du chauffage pendant une durée de vie du bâtiment de 50 ans. Ces coûts ne tiennent pas compte des variations de prix au cours du temps. Le coût supérieur de la brique est compensé par le fait que la structure du bâtiment y est incluse.

La position du bois, dans ce contexte, n'est pas très favorable. Son épaisseur économique optimale est proche de celle utilisée pour les constructions en madriers, mais le coût de construction est élevé sans pour autant diminuer suffisamment la consommation d'énergie. Au même titre que la brique ou le béton isolants, le bois ne peut pas apporter seul une solution acceptable. Il doit être utilisé en combinaison avec un isolant spécifique pour diminuer les coûts et la consommation d'énergie.

2.2.3 Isolation uniforme

Il est important de remarquer ici que l'effort d'isolation doit être réparti de manière uniforme. Il serait insensé de poser une super-isolation sur des bâtiments munis de simples vitrages, de même qu'il est irrationnel de chipoter sur l'isolant si on pose des vitrages modernes (type "confort"). Des indications concernant les épaisseurs d'isolant cohérentes avec divers vitrages sont données dans la table 2.

Table 2: *Épaisseurs approximatives d'isolant cohérentes, du point de vue financier, valables pour un isolant spécifique courant.*

Type de vitrage	Simple	Double	Triple	Confort +	HIT
Transmission thermique [W/m ² K]	6 à 8	2.5 à 3	2 à 3	1,1 à 1,6	0.6 à 0.7
Épaisseur d'isolant cohérente [cm]	1 à 3	6 à 10	10 à 15	15 à 20	Optimal

On remarque à nouveau que les épaisseurs d'isolant cohérentes avec les vitrages modernes, à savoir les vitrages doubles avec couche sélective réfléchissant le rayonnement infrarouge (type "confort +") sont de l'ordre de 10 à 20 cm.

De plus, il devient de plus en plus important d'éliminer les ponts thermiques. Si ceux-ci étaient supportables à côté d'une faible isolation, ils deviennent prépondérants, voire dangereux, s'ils court-circuitent une bonne isolation. Il est donc recommandé d'isoler à l'extérieur de la structure porteuse, et d'éliminer tout pont thermique.

2.3 Pertes par ventilation et aération optimale

Chaque mètre cube d'air qui quitte le bâtiment emporte avec lui une certaine quantité d'énergie, et chaque mètre cube d'air frais requiert aussi de l'énergie pour être conditionné au climat intérieur. Quoique le bâtiment doive absolument être aéré, cette consommation d'énergie peut être réduite de diverses manières:

1. en diminuant le débit d'air nécessaire à l'obtention d'une bonne qualité d'air (gestion des sources)
2. en contrôlant le débit d'air de manière à le maintenir au niveau strictement nécessaire (gestion des débits)
3. en récupérant l'énergie contenue dans l'air vicié pour la réintroduire dans l'air frais (ou ailleurs).

2.3.1 Gestion des sources

Pour une concentration limite fixée, le débit d'air nécessaire est directement proportionnel à l'intensité des sources de polluant:

$$\text{Débit d'air} = \frac{\text{Débit de la source de polluant}}{\text{Concentration limite} - \text{concentration dans l'air frais}} \quad (5)$$

Pour éviter de gaspiller de l'énergie dans les ventilateurs et pour le chauffage ou le conditionnement de l'air, il convient de réduire le débit des sources de polluants au strict minimum.

En principe, les seules sources de contaminants inévitables sont les occupants. Le bâtiment est construit pour eux, et il n'est pas moral de les éliminer. Par contre, toute autre source de contaminant doit être évitée dans la mesure du possible. En particulier, il faut proscrire tout matériau qui dégage des polluants (odeurs, solvants, gaz, etc.). De tels matériaux existent malheureusement. Certains panneaux de bois agglomérés et certaines mousses isolantes dégagent de l'urée formaldéhyde, irritant connu. Des produits de nettoyage, certaines moquettes ou certains mastics émettent des odeurs désagréables. Diverses peintures et colles contiennent des

solvants volatils toxiques, etc. De grand progrès ont été faits dans ce domaine, et il existe actuellement sur le marché des produits propres et non toxiques.

S'il n'est pas possible d'éviter le dégagement de gaz ou de vapeurs nuisibles, il faut d'une part circonscrire ces sources dans des zones où elles gênent le moins possible (cabines de peinture, zones fumeurs et non fumeurs, etc.), et d'autre part les éliminer aussi près de la source que possible (hotte de cuisine par exemple) et aussi vite que possible après leur dégagement (aérer fortement après les repas, au lever, après le dernier cigare, etc.).

En résumé:

- Ne pas introduire de sources de polluants dans les bâtiments.
- Éliminer les polluants résiduels près des sources.
- Aérer pendant et immédiatement après toute activité polluante.
- Ventiler régulièrement au minimum pour maintenir les polluants inévitables au-dessous de la limite acceptable.

2.3.2 Débit minimum requis

A titre d'exemple, considérons les polluants émis par une personne moyenne en activité de bureau. Les contaminants émis par cette personne sont donnés dans la Table 6. Cette table donne aussi des concentrations limite acceptables et les débits qui en résultent, en admettant que l'air extérieur soit à 4°C et 75% d'humidité relative.

Table 6: Quelques polluants émis par une personne en activité de bureau.

Polluant	Odeurs	CO ₂	Vapeur d'eau	Chaleur
Intensité de source	1 olf	18 l/h	72 g/h	120 W
Concentration limite	0,2 pol	1000 ppm	8 g/kg	21 °C
Concentration extérieure	0,1 Pol	360 ppm	4 g/kg	4 °C
Débit d'air [m ³ /h]	36 m ³ /h	28 m ³ /h	15 m ³ /h	25 m ³ /h

Le débit minimum est le plus grand des quatre, donc celui nécessaire pour éliminer les odeurs. Notez qu'en tolérant 0,2 Pol, on admet que 25% des personnes entrant dans le local trouveront l'odeur gênante.

Si on ne s'intéresse pas aux odeurs (comme c'est le cas des occupants, qui s'y habituent), et qu'on admet 1500 ppm de gaz carbonique (ce qui est parfaitement tolérable pour la santé), on peut diminuer le débit jusqu'à 16 m³/h en hiver, où la chaleur est utilisée pour le chauffage et n'a pas besoin d'être évacuée.

Si l'air extérieur est plus chaud, il contiendra plus d'eau (à humidité relative constante). Il pourra donc évacuer moins de chaleur et moins de vapeur d'eau. La Figure 12 montre que le débit d'air nécessaire est régi par les odeurs en hiver, et par l'humidité en mi-saison et en été.

2.3.3 Contrôle des débits

Le débit de ventilation doit être suffisant pour assurer la qualité de l'air, mais réduit au minimum pour éviter le gaspillage d'énergie. Il doit donc être contrôlé en fonction de la demande.

Ce contrôle peut être manuel, par l'ouverture des fenêtres et des grilles de ventilation, ou par l'enclenchement d'un ventilateur (hotte de cuisine par exemple).

Il peut être piloté par une horloge, dans les cas où la demande a un horaire fixe connu (par exemple dans les bureaux).

Il peut enfin être contrôlé par des capteurs de polluants, qui règlent le débit de manière à maintenir la concentration de ce polluant en-dessous d'une valeur de consigne.

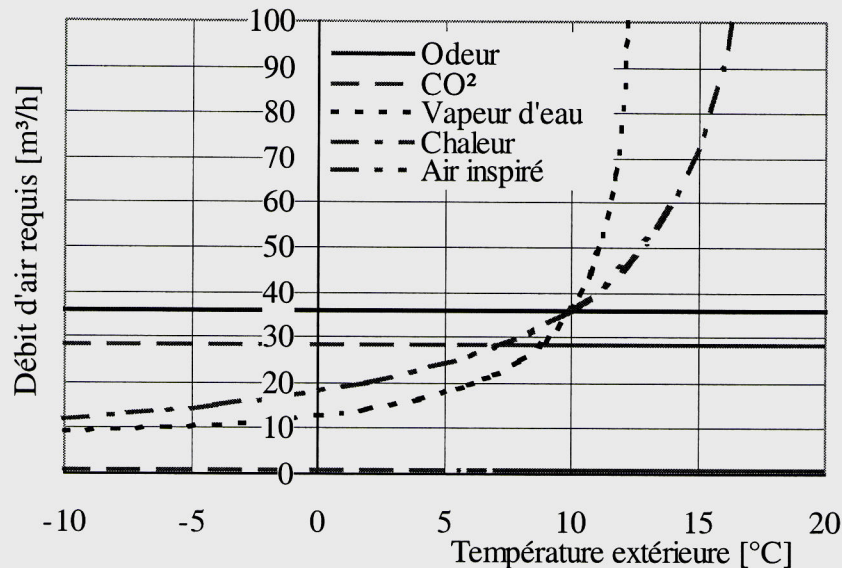


Figure 12: Débit d'air nécessaire pour évacuer les polluants d'une personne en activité de bureau, en fonction de la température extérieure. Humidité relative constante de 75%.

2.3.4 Gestion des ouvertures et suppression des fuites

La Palisse aurait pu dire que, pour contrôler les débits d'air, il faut éviter que l'air n'entre ou ne sorte par des fuites incontrôlées. Le débit d'air ne doit pas être contrôlé par les défauts de construction que sont les fuites, mais par des ouvertures aménagées exprès dans l'enveloppe (grilles de ventilation, fenêtres, impostes, etc.), ou par un système de ventilation (canaux, ventilateurs, etc.). En dehors de ces ouvertures, l'enveloppe du bâtiment doit être raisonnablement étanche.

Selon SIA 180, la valeur caractérisant la perméabilité à l'air globale de l'enveloppe d'un bâtiment est la perméabilité spécifique de l'enveloppe, à savoir le débit d'air sous conditions normales et 4 Pa de pression différentielle, rapporté à l'aire de l'enveloppe.

$$v_{a,4} = \frac{\dot{V}_4}{A_e} \quad \text{m}^3/(\text{h m}^2) \quad (6)$$

où:

\dot{V}_4 est le débit d'air en m³/h, sous 4 Pa de pression différentielle, aux conditions normales (101 325 Pa et 0°C)

A_e est l'aire de l'enveloppe de la zone chauffée, sans tenir compte du terrain.

Les valeurs limites et valeurs cibles du tableau 6 s'appliquent pour juger de l'étanchéité à l'air d'une enveloppe de bâtiment, les ouvertures de ventilation étant fermées.

Table 7 Étanchéité à l'air d'une enveloppe de bâtiment: valeurs limites et valeurs cibles [4]

catégorie	$v_{a,4,max} [\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)]$	
	valeur limite	valeur cible
bâtiments neufs	0.75	0.5
bâtiments rénovés ou transformés	1.5	1

Les bâtiments équipés de ventilation mécanique à double flux doivent respecter les valeurs cibles.

Une concentration des fuites dans une zone particulière (par exemple attique) est à éviter. La perméabilité spécifique de l'enveloppe ne doit dépasser $2 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ dans aucune zone particulière (pièce, groupe de pièces, étage).

Il est donc faux de dire que les bâtiments modernes sont trop étanches. En fait, ils ne le sont en général pas assez, si on les compare aux normes modernes. Par contre, en Suisse, ils manquent systématiquement d'ouvertures de ventilation. La plupart des bâtiments sont équipés d'un ou plusieurs ventilateurs d'extraction d'air, mais d'aucune entrée, comme si l'air était généré à l'intérieur du bâtiment. Comme le montre la Figure 12, le débit nécessaire est plus faible en hiver qu'en été, alors que le débit effectif au travers d'une fissure est nettement plus élevé par froide bise que par temps lourd.

2.4 Optimisation des gains solaires

Le rayonnement solaire entrant par les fenêtres et le cas échéant par d'autres éléments de captage spéciaux est transformé en chaleur à l'intérieur du bâtiment, et contribue ainsi au chauffage des locaux. Cette contribution représente au moins le 10 à 15 % des besoins en chaleur hivernaux dans un bâtiment moyen, mais peut atteindre la moitié des besoins dans un bâtiment bien conçu.

L'utilisation passive du rayonnement solaire présente de nombreux avantages, et en particulier la source d'énergie est gratuite et non polluante. Par contre, il présente quelques inconvénients auxquels il est nécessaire de pallier.

Le rayonnement solaire est relativement diffus, en particulier en hiver, où il ne dépasse pas quelques centaines de watts par mètre carré. Pour capter une quantité de chaleur appréciable, il faut de **grandes surfaces de captage**, orientées vers les directions les plus ensoleillées (du sud-est au sud-ouest dans l'hémisphère nord).

Pour que cette chaleur, toujours limitée, représente une part importante des besoins, il faut limiter ces besoins au minimum par une **isolation thermique soignée**: fortes épaisseurs d'isolation et vitrages à hautes performances (type confort, $U < 1,6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$).

Lorsque la température extérieure est clémente et qu'il fait beau, ces surfaces apportent trop de gains. Il est donc indispensable de munir les surfaces de captage de dispositifs de contrôle. En particulier, il faut munir les fenêtres de **protections solaires efficaces**, donc extérieures.

Pour augmenter l'efficacité du chauffage solaire passif, il faut répartir sur la journée les gains reçus pendant quelques heures seulement. **L'inertie thermique du bâtiment doit donc être élevée**, pour limiter les surchauffes en période ensoleillée, et restituer la chaleur accumulée pendant la nuit. Le bâtiment est donc massif et l'isolation est posée à l'extérieur de la structure.

Enfin, il faut éviter que l'installation de chauffage fonctionne plus que nécessaire. La régulation du chauffage doit donc tenir compte des gains solaires. Un thermostat intérieur ou des vannes thermostatiques sont recommandés. On trouve de plus en plus sur le marché des centrales de contrôle "intelligentes" qui tiennent compte des gains solaires ainsi que de l'inertie du bâtiment et de l'installation de chauffage.

Pour plus d'information sur ce sujet, consulter la référence [8].

2.5 Production et émission de chaleur

L'installation de chauffage est destinée à fournir de la chaleur en quantité juste suffisante dans une partie limitée du bâtiment. Toute chaleur fournie soit en excès, soit ailleurs que dans la zone de confort est de la chaleur perdue. Les précautions suivantes doivent être prises pour améliorer l'efficacité de la production et de la distribution de chaleur:

- installer des chaudières efficaces, ce qui signifie:
 - dimensionnement correct (la majorité des chaudières de Suisse sont largement surdimensionnées)
 - bonne isolation thermique de la chaudière
 - basse température des fumées, donc basse température d'utilisation
 - si possible, chaudière à condensation
 - fonctionnement à plusieurs allures
- distribution à faibles pertes, donc:
 - conduites bien isolées (4 cm d'épaisseur ou plus)
 - placer les conduites de préférence dans la zone chauffée
 - basse température de distribution
- distribution de chaleur efficace, donc:
 - contrôle thermostatique dans chaque pièce, pour éviter les surchauffes,
 - chauffage radiatif, qui réchauffe les occupants, plutôt que convectif qui réchauffe d'abord l'air

3 PROTECTION THERMIQUE D'ÉTÉ ET INERTIE THERMIQUE

3.1 Protections solaires

Le rayonnement solaire varie fortement au cours de la journée et au fil des saisons. Il est aussi très utile pour contribuer au chauffage et à l'éclairage des locaux. Toutefois, ces besoins ne sont pas synchrones avec l'intensité du rayonnement solaire. Des dispositifs de contrôle sont donc nécessaires, pour ajuster l'offre du soleil aux besoins des occupants.

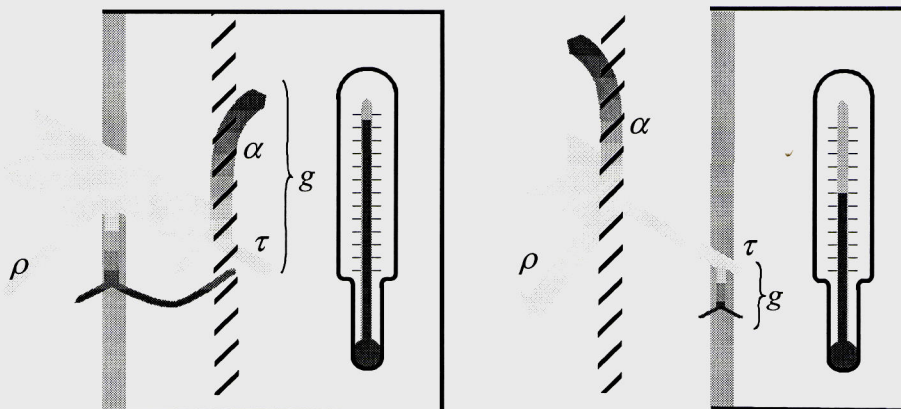


Figure 13: Effets de la disposition des protections solaires. À gauche, protection intérieure, à droite, protection extérieure.

Les protections solaires font partie de ces dispositifs. On peut caractériser ces protections solaires par leur transmission lumineuse τ et leur transmission énergétique g . Ce dernier coefficient donne la part de l'énergie solaire incidente qui traverse la protection solaire, que ce soit sous forme lumineuse ou thermique. En effet, le rayonnement solaire absorbé par la protection est transformé en chaleur, et cette chaleur peut, du moins en partie, pénétrer à l'intérieur du bâtiment. Une bonne protection solaire présente une faible transmission énergétique. Ce n'est pas le cas des stores et rideaux intérieurs, qui peuvent présenter un coefficient de transmission énergétique relativement élevé, même s'ils sont peu transparents (Figure 13).

Il est essentiel de pouvoir moduler une protection solaire. Elle doit être absente ou très transparente par jour couvert, lorsque l'éclairage naturel est nécessaire, et ne laisser passer qu'une infime partie du rayonnement solaire lorsqu'il tape en plein.

En résumé:

Proscrire les vitrages absorbants ou réfléchissants: ils ne sont pas assez efficace par grand soleil et trop peu transparents par ciel couvert.

Admettre que les seules protections solaires d'été efficaces sont à l'extérieur du bâtiment, car la chaleur générée reste à l'extérieur. Ce sont les volets, les persiennes à projection, les stores vénitiens, etc. Éviter les protections qui enferment une lame d'air entre elles et le vitrage.

Réserver l'usage des protections intérieures à l'hiver, où elles servent à éviter l'éblouissement tout en laissant entrer la chaleur.

Les protections mobiles (stores, volets, persiennes, jalousies) sont plus confortables que les protections fixes (surplombs, écrans), car elles permettent une modulation.

Notez qu'il faut investir moins de 500 Fr. pour éviter, avec un store, de laisser entrer 1 kW d'énergie solaire, alors qu'il faut plus de 2'000 Fr. pour évacuer cette chaleur par un groupe frigorifique!

3.2 Refroidissement passif

3.2.1 Principe

Le refroidissement passif consiste à refroidir la structure du bâtiment à l'aide de la ventilation naturelle, de manière à permettre à cette structure d'accumuler la chaleur générée dans le bâtiment pendant la journée. Il comprend donc deux périodes (Figure 14):

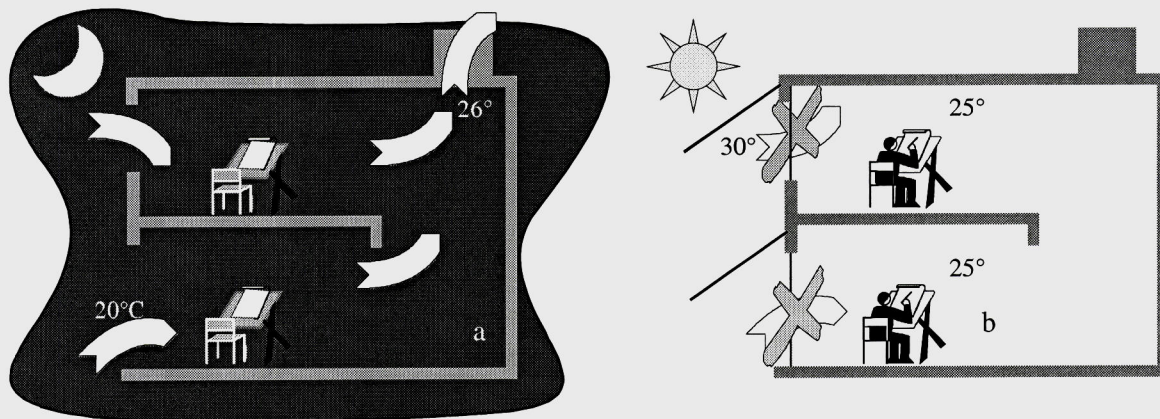


Figure 14: Principe du refroidissement passif: a) période de refroidissement, b) période de protection

Période de refroidissement: Tant que la température extérieure est inférieure à la température intérieure, (en général pendant la nuit) des ouvertures sont pratiquées dans le bâtiment de manière à permettre à l'air chauffé par la structure du bâtiment de s'échapper, et à l'air frais extérieur de s'infiltrer. Le bâtiment est ainsi aéré et refroidi pendant cette période.

Période de protection: Quand la température de l'air extérieur est plus élevée que celle de l'air intérieur, la ventilation et les gains de chaleur solaires sont réduits au minimum. Le solde de ces gains chauffe le bâtiment mais, la structure étant froide, ce réchauffage est relativement lent. Dans de bonnes conditions, on évite de dépasser les limites d'un bon confort thermique

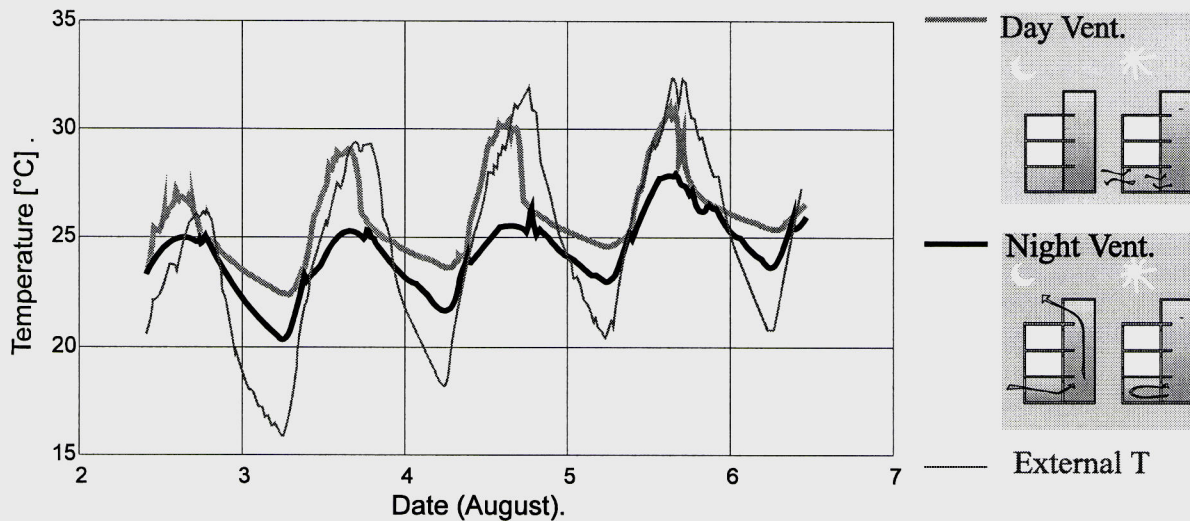


Figure 15: Application du refroidissement passif sur deux bureaux identiques du bâtiment LESO-EPFL. La courbe fine montre la température extérieure, et la courbe grasse la température intérieure obtenue avec une stratégie adéquate. Si l'on ventile de jour seulement (stratégie couramment adoptée dans les bureaux), on obtient la courbe grise.

L'utilisation de la ventilation nocturne pour abaisser la température intérieure de jour et diminuer les besoins en réfrigération ne peut fonctionner que si les conditions de base sont satisfaites. Notons qu'il est difficile de les satisfaire pour des bâtiments existants qui n'ont pas été conçus pour cela. Les règles essentielles pour un système de refroidissement passif efficace sont données ci-dessous.

3.2.2 Règles et recommandations pour l'application du refroidissement passif

Conditions générales et limites d'application

1. Les gains de chaleur doivent être limités de manière à éviter la surchauffe et à ne pas dépasser la quantité de chaleur qu'il sera possible d'évacuer pendant la période de refroidissement suivante. Ceci signifie:
 - la présence de protections solaires efficaces (stores extérieurs vénitiens ou à projection),
 - équipements (machines, éclairage, etc.) à faible consommation d'énergie,
 - la généralisation de l'éclairage naturel, contrôlé par des dispositifs (par ex. les protections solaires) rejetant la lumière en excès à l'extérieur du bâtiment,
 - placer les sources de chaleur inévitables près des sorties d'air.
2. L'amplitude des variations journalières de la température de l'air extérieur doit être importante (minimum 5 degrés).
3. Le climat doit être tel que la déshumidification de l'air ne soit pas nécessaire. Plus précisément, le point de rosée de l'air extérieur doit rester inférieur à la température minimale atteinte dans les locaux. Il est en effet inconfortable d'avoir une humidité relative supérieure à 60% si la température est élevée.

Ouvertures de ventilation .

1. Les ouvertures doivent être orientées de façon que les entrées d'air soient exposées au vent dominant en période de refroidissement, et les sorties d'air sous le vent.

2. En cas d'intempéries, les ouvrants extérieurs doivent être fermés ou protégés. En cas d'incendie, tous les ouvrants intérieurs et en façade doivent être fermés. Ces exigences nécessiteront souvent une automatisation des ouvertures.
3. Si le volume à ventiler est d'une faible hauteur, il faut favoriser la ventilation naturelle traversante. Si ceci n'est pas possible, les ouvertures doivent comprendre deux éléments semblables à une distance verticale maximale.
4. Pour un bâtiment à plusieurs niveaux, les sorties d'air doivent être beaucoup plus grandes que les entrées et se situer le plus haut possible dans le bâtiment. Il faut en effet éviter que l'air préchauffé par le bas du bâtiment sorte par les locaux habités supérieurs. L'aire des ouvertures d'entrée doit être supérieure à celle des ouvertures de sortie. Rappelons ici que c'est la position du niveau neutre qui détermine la fonction des ouvertures.
5. Une surélévation du bâtiment facilite la construction des grandes sorties d'air. S'il n'est pas possible de satisfaire la condition 4, on peut ventiler le niveau supérieur indépendamment, ou l'équiper d'un ventilateur d'extraction (Figure 16).

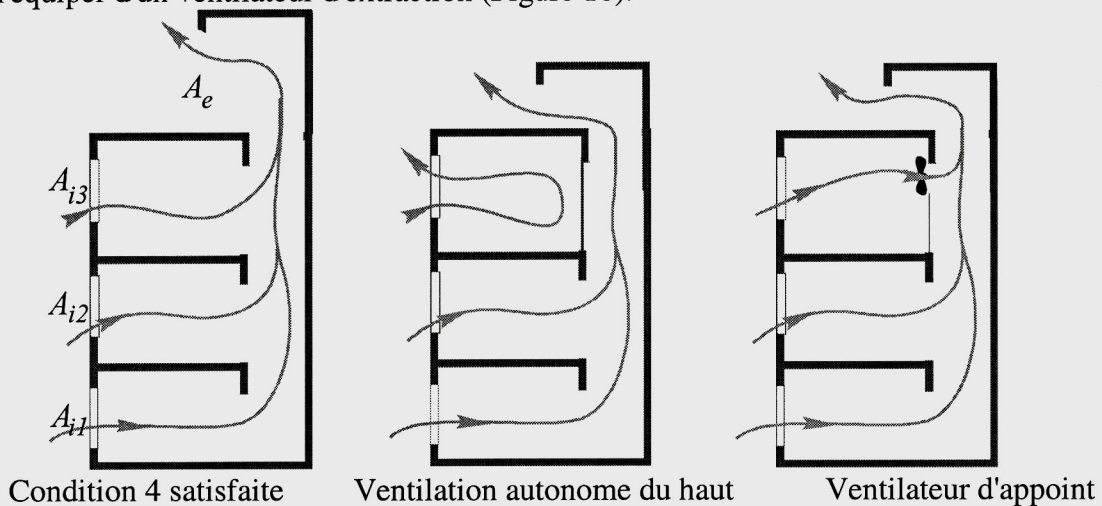


Figure 16: Moyens disponibles pour respecter la condition 4.

L'efficacité d'une ventilation nocturne mécanique augmente avec la différence de température et donc avec l'inertie thermique du local. Le ventilateur doit fonctionner à basse pression (<1000 Pa) et il doit fonctionner en extraction pour éviter l'échauffement de l'air.

Règles de conception pour l'inertie thermique.

1. Les entrées d'air frais de chaque local, doivent se situer le plus haut possible. En effet, pour un transfert de chaleur maximal, la surface d'échange convective doit être la plus grande possible.
2. Pour des locaux qui ne sont occupés que la nuit (chambre à coucher par ex.), une faible inertie thermique est avantageuse, car elle permet un abaissement rapide de la température ambiante.
3. Pour des locaux occupés de jour, l'inertie thermique du local doit être grande; elle est maximale si un matériau dense (béton, maçonnerie) d'au moins 10 cm d'épaisseur est apparent sur toutes les parois (plafond, plancher, murs). Des épaisseurs trop grandes (plus de 20 cm depuis la surface) sont par contre inutiles. Le bois massif est presque équivalent à la brique module, mais nettement inférieur au béton ou à la pierre:

Matériau	Béton	Brique	Bois
Capacité maximale [MJ/(m ² ·K)]	530	200	210
Capacité journalière [MJ/(m ² ·K)]	260	95	69

La construction en cadres et planches, par contre, est trop légère et manque d'inertie thermique. Le confort d'été doit être assuré par un soin particulier apporté à l'isolation thermique et aux protections solaires.

4. Une isolation suffisante doit être placée à l'extérieur. Pour pouvoir utiliser la capacité d'accumulation thermique des parois extérieures pour la durée d'une journée, il importe que la constante de temps de la paroi soit d'au moins 1 jour. Ce critère est satisfait pour les murs en maçonnerie double ou à isolation extérieure (bardée ou périphérique), si le coefficient de transmission thermique k est conforme aux exigences actuelles pour la protection thermique d'hiver.

Règles de sécurité.

1. Prévoir des protections contre les tempêtes, telles que les auvents et avant-toits, les ouvrants à fermeture automatique par pluie ou vent ou les vantelles et autres ouvertures laissant passer l'air sans laisser entrer la pluie.
2. Il est pratiquement impossible d'éviter la pénétration de bruit et de contaminants par les grandes ouvertures requises pour la ventilation naturelle. La façade double peau offre des possibilités limitées. Toutefois, si l'environnement est trop bruyant ou trop contaminé, examiner la possibilité de construire ailleurs ou d'utiliser la ventilation mécanique ou d'autres moyens de refroidissement, tels que structure froide, dalle active ou panneaux radiants. L'installation de l'air conditionné en climat tempéré devrait être réservée aux cas où la ventilation naturelle est impossible (extérieur trop pollué ou charges thermiques internes dépassant 50 W/m²).
3. Diminuer les risques d'effraction en plaçant les ouvertures hors de portée et en multipliant de petites ouvertures. L'installation de stores à lamelles, de moustiquaires, de grilles et de systèmes d'alarme peut aussi être envisagée.
4. Veiller à satisfaire les règles de protection incendie. En particulier, automatiser la fermeture en cas d'incendie des ouvertures de ventilation placées dans des parois coupe-feu. Les exutoires de fumée peuvent être utilisés comme ouvertures de ventilation, mais doivent pouvoir être manoeuvrés (ouverts et fermés) depuis un endroit facilement accessible en cas d'incendie. L'air de refroidissement peut être transporté dans les couloirs et escaliers, mais ces flux d'air doivent être bloqués en cas d'incendie.

Comportement des habitants

Les occupants d'un bâtiment dans lequel le recours au refroidissement passif est prévu doivent être informés de la stratégie de ventilation à utiliser. Cette stratégie tient en trois points très simples:

1. Les entrées d'air doivent être fermées tant que la température extérieure est supérieure à la température intérieure (en général pendant la journée), et ouvertes dans le cas contraire.
2. Il faut abaisser les protections solaires à temps pour éviter les surchauffes.
3. Il faut éviter autant que possible de recouvrir la structure massive par des couches isolantes telle que des moquettes, des tentures ou des meubles.

3.2.3 Avantages et inconvénients

Le refroidissement passif est en général bien accepté et assure un confort d'été remarquable. Il est efficace et ne requiert qu'un investissement minime, voire nul. Il ne consomme pas d'énergie fossile.

Il pose toutefois quelques problèmes de sécurité. Il demande aussi un engagement certain des occupants, car il est difficile à automatiser.

Table 8: Critères de choix pour l'application de la ventilation naturelle, en relation avec les gains de chaleur totaux (gains solaires et gains internes).

Condition	Gains de chaleur [W/m ²]			
	10	20	30	40
Impact sur l'architecture	faible			fort
Hauteur de chambre minimale	2,5	2,7	2,9	3,1
Ouverture des fenêtres possible et contrôlable	☞	☞	☞	☞
Ouvertures de ventilation contrôlables (400 mm ² /m ²)	☞	☞	☞	☞
Contrôle possible par les occupants	☞	☞	☞	☞
Éclairage naturel pour diminuer les gains de chaleur	☞	☞	☞	☞
Contrôle automatique de l'éclairage artificiel	☞	☞	☞	☞
Protections solaires efficaces à 95 % et réglables	☞	☞	☞	☞
Refroidissement naturel de jour seulement	☞	☞	☞	☞
Refroidissement naturel diurne et nocturne	☞	☞	☞	☞
Inertie thermique accessible	☞	☞	☞	☞

☞ indispensable ☞ recommandé ☞ inefficace

4 HUMIDITÉ, ISOLATION ET AÉRATION

4.1 Risques relatifs à l'humidité

Une trop forte humidité favorise la croissance de moisissures et d'autre micro-organismes, qui peuvent nuire à la santé du bâtiment et de ses occupants. Ce risque est particulièrement élevé dans les constructions en bois. Il faut notamment éviter:

- Les fuites dans l'enveloppe (surtout toiture) et dans les conduites d'eau ou d'égout.
- Qu'il y ait condensation sur les surfaces intérieures des parois extérieures des bâtiments, pendant les périodes les plus froides
- Que l'humidité relative locale dépasse 80% sur les surfaces susceptibles de favoriser la croissance de moisissures (plâtre, bois, papier, peintures, etc.)
- Que de la vapeur d'eau puisse condenser en trop grande quantité à l'intérieur des parois. La norme SIA 180 tolère une teneur en eau d'au maximum de 3% en masse dans le bois.

4.2 Causes de dégâts dus à l'humidité

Les dégâts dus aux fuites et aux défauts d'étanchéité sont suffisamment connus et facilement évitables pour que l'on en parle pas ici. Les problèmes liés à la condensation et aux moisissures sont moins connus, et sont donc développés plus avant ci-dessous.

En hiver, les parois donnant sur l'extérieur présentent une température de surface d'autant plus basse que l'isolation est moins forte. Si l'isolation est faible et que l'humidité de l'air intérieur est relativement élevée, deux types de dégâts peuvent apparaître:

- a) Dès que la température de surface intérieure est égale ou inférieure au point de rosée de l'air intérieur, l'humidité de l'air condense sur la surface, rendant celle-ci humide. A l'extrême, des coulures et des taches se produisent.
- b) Si l'humidité relative de l'air dépasse environ 80% près de la surface pendant une longue période, alors des moisissures peuvent croître sur cette surface, sans qu'il y ait condensation.

Ces dégâts apparaissent lorsque l'isolation est trop faible pour une aération donnée, ou lorsque l'aération est trop faible pour une isolation donnée.

4.3 Humidité de l'air

L'humidité de l'air peut s'exprimer de plusieurs autres manières: pression partielle, rapport de mélange, humidité relative et point de rosée.

A chaque température correspond une pression partielle de vapeur d'eau maximum, appelée pression de vapeur saturante. En effet, l'air ne peut "diluer" qu'une quantité limitée d'eau, et cette quantité limite, ou teneur à saturation, dépend de la température. La part d'eau en excès se condense sous forme de liquide ou de glace, suivant la température. La pression de vapeur saturante est donnée dans les diagrammes psychrométriques (Figure 17). Elle peut se calculer à l'aide des formules approchées suivantes, qui sont applicables de - 40 à + 150 °C:

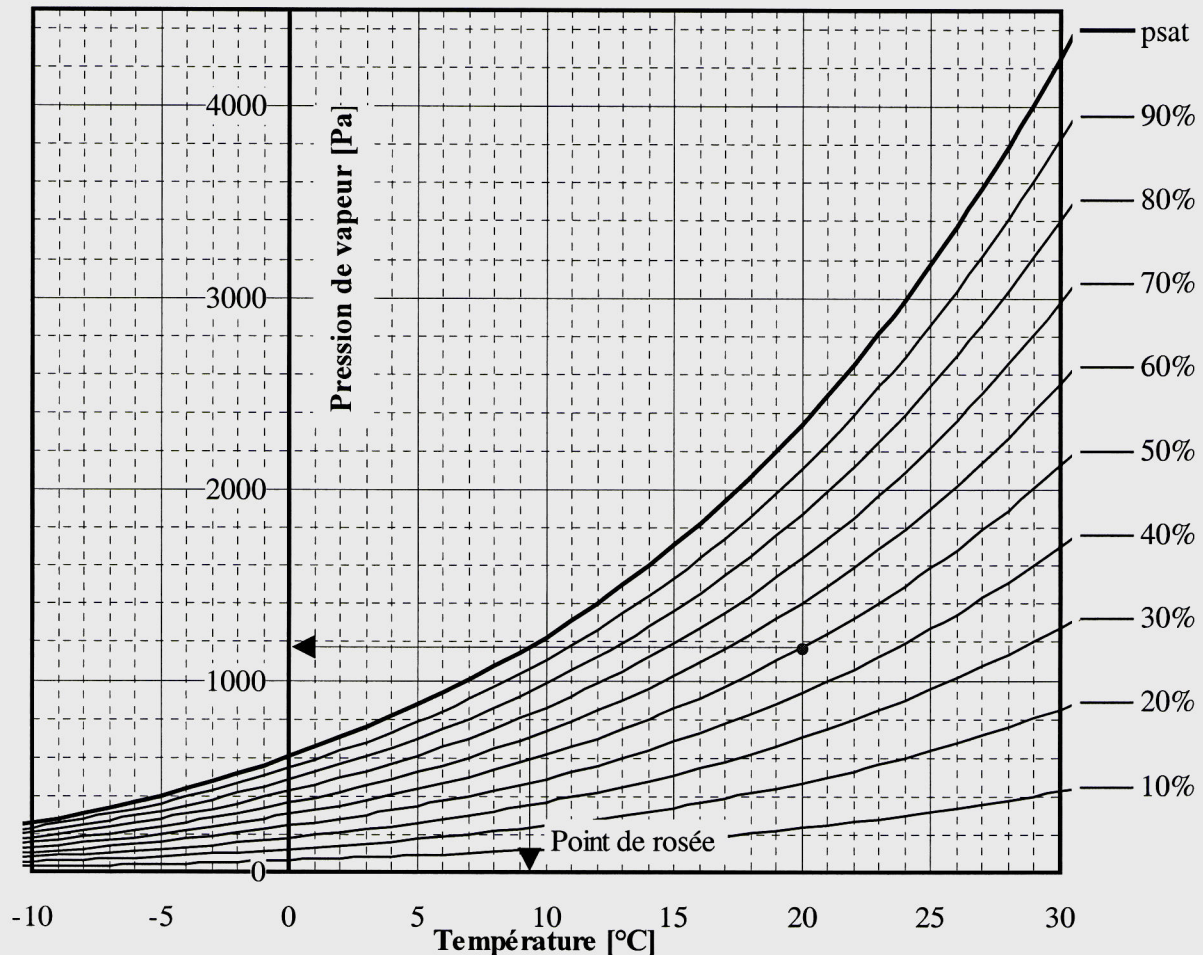


Figure 17: Diagramme psychrométrique

$$\theta < 0 \quad p_{sat} = 610.5 \exp\left(\frac{22,5 \cdot \theta}{273 + \theta}\right) \quad (7)$$

$$\theta \geq 0 \quad p_{sat} = 610.5 \exp\left(\frac{17,27 \cdot \theta}{237,3 + \theta}\right) \quad (8)$$

Le point de rosée θ_r (°C) ou T_r (K) est la température à laquelle la pression partielle de vapeur d'eau existant dans l'air serait égale à la pression de vapeur saturante. Son nom provient du fait qu'une surface en contact avec l'air et refroidie à cette température se couvre de rosée.

Le point de rosée peut être obtenu en inversant les formules (7) et (8) et en remplaçant p_s par la pression partielle p_e :

$$\text{si } p_e < 610,5 \text{ Pa} \quad \theta_r = \frac{273 \cdot \ln\left(\frac{p_e}{610,5}\right)}{22,5 - \ln\left(\frac{p_e}{610,5}\right)} \quad (9)$$

$$\text{si } p_e \geq 610,5 \text{ Pa} \quad \theta_r = \frac{237,3 \cdot \ln\left(\frac{p_e}{610,5}\right)}{17,27 - \ln\left(\frac{p_e}{610,5}\right)} \quad (10)$$

L'humidité relative φ est le rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau de l'air examiné à la pression de vapeur saturante à la température de cet air. L'humidité relative est exprimée généralement en pour-cent:

$$\varphi = 100 \frac{p_e}{p_s} \quad (11)$$

Réciproquement, la pression de vapeur peut être obtenue à partir de l'humidité relative à partir de

$$p_e = 0,01 \varphi p_s \quad (12)$$

où φ est exprimé en pour-cent.

Le **rapport de mélange**, x , est le rapport de la masse de vapeur d'eau à la masse d'air sec contenues dans un volume d'air.

Le rapport de mélange x et la pression partielle de vapeur d'eau sont liés par:

$$x = \frac{M_e}{M_a} \frac{p_e}{p_a - p_e} = 0,62198 \frac{p_e}{p_a - p_e} \quad (13)$$

où p_a est la pression atmosphérique, et 0,62198 est le rapport de la masse molaire de l'eau M_e à la masse molaire moyenne de l'air M_a .

La masse volumique de l'air humide peut se calculer par:

$$\rho = \frac{(p_a - p_e) \cdot (1 + x)}{287,055 \cdot T} \quad (14)$$

L'air sec en conditions normales (0 °C et 101,32 kPa) présente une masse volumique de 1,292 kg/m³.

Enfin, on utilise parfois l'humidité absolue v , qui est la masse d'eau contenue dans un volume d'air donné. Elle est liée à la pression de vapeur par:

$$v = \frac{M_e p_e}{R T} \quad (15)$$

Le rapport R/M_e vaut 461,64 [Pa m³/(K kg)].

Il est important de noter que de l'air contenant une certaine quantité d'eau, donc ayant un rapport de mélange x , une humidité absolue v , ou une pression partielle de vapeur d'eau p_e donnés, voit son humidité relative varier fortement en fonction de la température, comme on peut s'en rendre compte en suivant une ligne horizontale dans la Figure 17. Lorsque la tempé-

rature s'abaisse en un endroit, l'humidité relative croît, peut atteindre 80% (risque de moisissure), ou la saturation (condensation) dans cet endroit.

4.4 Risques de moisissures sur les parois extérieures des bâtiments

Il est généralement admis que le risque de croissance de moisissures sur les parois augmente fortement lorsque l'humidité relative locale dépasse 80%. Cette humidité dépend de plusieurs facteurs:

- la température de surface de la paroi
- le taux de ventilation
- la production de vapeur d'eau à l'intérieur.

Le modèle simple développé ci dessous permet d'estimer ce risque.

La température de surface intérieure de l'élément est donnée par:

$$\theta_{s,i} = \theta_e + f_{Rsi}(\theta_i - \theta_e) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (16)$$

où:

θ représente les températures. L'indice i désigne l'intérieur et e l'extérieur.

f_{Rsi} est le coefficient de température superficiel (voir 2.2.1), qui peut se calculer en tout endroit et en tout temps en résolvant l'équation de la chaleur.

Pour éviter que l'humidité relative à la surface dépasse 80%, la pression de vapeur de l'air intérieur ne doit pas dépasser 80% de la pression de vapeur saturante à la température de surface intérieure:

$$p_{i,max} = 0,8 \cdot p_s(\theta_{s,i}) \quad [\text{Pa}] \quad (17)$$

La pression de vapeur à l'extérieur est :

$$p_e = \varphi_e p_{sat}(\theta_e) \quad [\text{Pa}] \quad (18)$$

En admettant que l'humidité relative extérieure varie linéairement avec la température extérieure, ce qui est approximativement le cas en Suisse:

$$\varphi_e [\%] = 75 - 0,25 \cdot \theta_e \quad [\%] \quad (19)$$

la pression partielle de vapeur d'eau de l'air extérieur ne dépend plus que de sa température. On en déduit le rapport de mélange:

$$x_e = \frac{M_w}{M_a} \frac{p_e}{p_a - p_e} = 0,62198 \frac{p_e}{p_a - p_e} \quad [\text{kg/kg}] \quad (20)$$

où:

M est la masse molaire (indice e pour l'eau, a pour l'air)

p_a est la pression atmosphérique (101'300 Pa en condition normale au niveau de la mer).

Le débit d'air minimum \dot{V}_{\min} permettant d'éviter le risque de croissance de moisissures est:

$$\dot{V}_{\min} = \frac{S_{e,i}}{\rho_a (x_i - x_e)} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (21)$$

où:

$S_{e,i}$ est le débit de production de vapeur d'eau à l'intérieur [kg/h]

ρ_a est la masse volumique de l'air intérieur [kg/m³]

en résolvant cette équation, on obtient le rapport de mélange de l'air intérieur pour un débit d'air et un débit de production d'humidité donnés:

$$x_i = \frac{S_{e,i}}{\rho_a \dot{V}} + x_e \quad [\text{kg/kg}] \quad (22)$$

D'où la pression de vapeur à l'intérieur:

$$p_i = \frac{M_a p_a x_i}{M_a x_i + M_e} = \frac{p_a x_i}{x_i + 0.62198} \quad [\text{Pa}] \quad (23)$$

cette pression doit être au maximum égale à $p_{i,max}$.

Ce modèle a permis de tracer la Figure 18. A gauche, on montre le débit d'air minimum nécessaire pour évacuer la vapeur d'eau produite par une personne et éviter le risque de moisissure en Suisse¹. Le débit d'air peut être réduit en saison froide, lorsque l'air extérieur est particulièrement sec, mais doit être fortement augmenté en mi-saison.

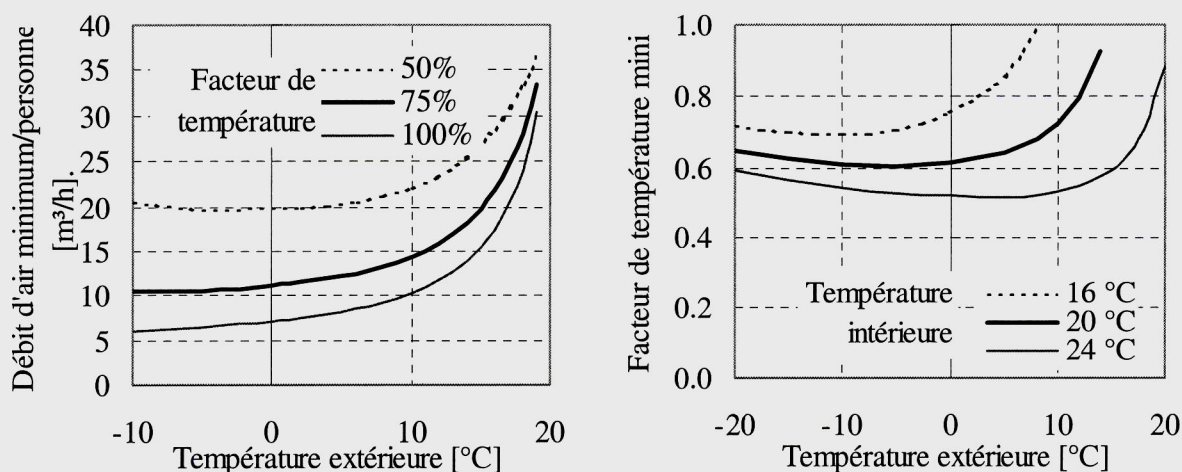


Figure 18: Conditions permettant d'éviter les moisissures sur les parois extérieures.

Gauche: Débit d'air minimum par personne, à 20°C de température intérieure.

Droite: Facteur de température minimal à 15 m³/h et par personne.

Notons que le facteur de température en pleine paroi isolée selon les normes modernes ($U < 0,3$ W/m²K) vaut au moins 0,85. C'est près des ponts thermiques que ce facteur peut diminuer et atteindre des valeurs critiques.

Lors d'apparition de moisissures dans les appartements, il arrive souvent que le propriétaire accuse le locataire de produire trop d'humidité ou de ne pas assez aérer, et le locataire attribue les moisissures au manque d'isolation de l'immeuble.

La norme SIA 180:1999 permet de départager facilement entre ces deux opinions contradictoires. Il est en effet admis dans cette norme que l'humidité dans les logement ne devrait pas dépasser une valeur limite, dépendant de la température (Figure 19). Cette limite est telle que le risque de moisissure est nul si le bâtiment est correctement isolé, c'est à dire si, en aucun endroit de l'enveloppe, le facteur de température est inférieur à 0,75.

¹

Un débit d'air plus important peut être nécessaire pour éliminer la vapeur d'eau provenant d'autres sources (cuisine, lessive, etc.).

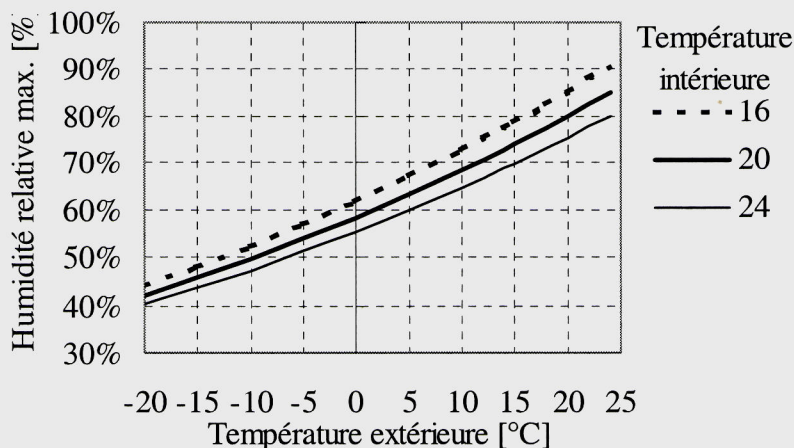


Figure 19: Humidité maximale admissible dans les bâtiments en fonction de la température extérieure [4]

Ainsi, si, en moyenne journalière, l'humidité relative intérieure dépasse régulièrement cette limite, on peut attribuer à l'habitant la responsabilité des moisissures. Si, par contre, les moisissures apparaissent en des endroits où le facteur de température superficielle est inférieur à 0,75, les moisissures résultent d'une isolation insuffisante.

4.5 Condensation interstitielle

La plupart des matériaux de construction, et notamment le bois, sont perméables à la vapeur d'eau. D'autre part, la présence de sources de vapeur d'eau à l'intérieur a pour résultat qu'en général, la pression de vapeur d'eau (ou l'humidité absolue) est plus grande à l'intérieur qu'à l'extérieur. La vapeur d'eau tend donc à sortir du bâtiment pour rétablir l'équilibre. Les passages possibles sont

- la convection au travers des fissures ou autres ouvertures
- la diffusion au travers des matériaux poreux.

Pendant la saison froide, la vapeur allant vers l'extérieur se trouve dans un environnement de plus en plus froid et l'air environnant peut se trouver à une température égale ou inférieure à son point de rosée: la vapeur d'eau en excès condense soit en brouillard en suspension dans l'air, soit en gouttelettes sur les surfaces proches.

Cette eau de condensation peut entraîner des dégâts (taches, moisissures, gel). Il est donc important que la structure de l'enveloppe du bâtiment soit conçue de manière à éviter un excès d'eau de condensation.

Pour éviter le transport de vapeur d'eau par convection, il est essentiel que l'enveloppe soit étanche, et que la couche d'étanchéité se trouve dans une zone suffisamment chaude pour que la vapeur d'eau ne condense pas sur cette couche. Cette "barrière à air" est essentielle dans les constructions en bois, où le travail du bois peut facilement créer des fissures entre les éléments de construction.

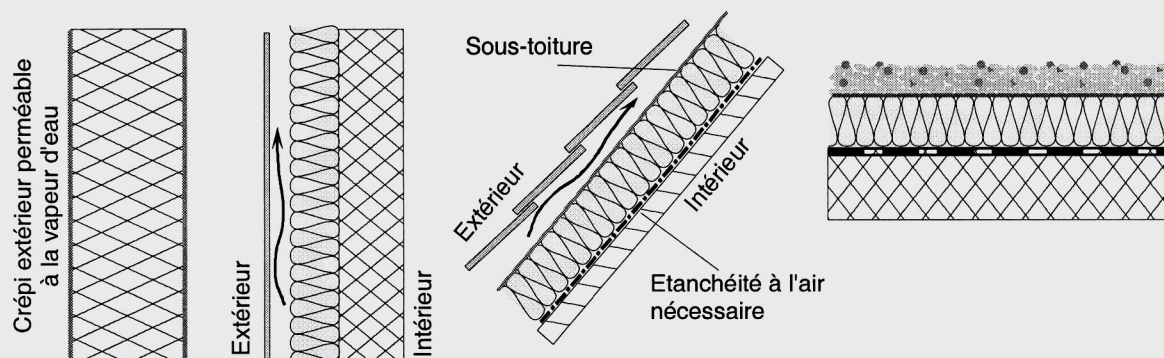


Figure 20: Détails de construction présentant une diffusion acceptable[4].

Pour éviter que la diffusion de vapeur au travers des matériaux poreux entraîne une quantité d'eau condensée inacceptable, il on peut utiliser les trois méthodes suivantes, seules ou en combinaison:

1. Maintenir une température élevée dans tout l'élément de construction, donc poser l'isolation à l'extérieur.
2. Faciliter la diffusion de la vapeur d'eau à l'extérieur de la couche d'isolation thermique.
3. Limiter la diffusion de la vapeur d'eau à l'intérieur de la couche d'isolation thermique.

La procédure de calcul simplifiée, dite "de Glaser", décrite dans la norme EN ISO 13788 permet d'évaluer le transport d'humidité par diffusion et donc le risque de condensation exagérée. La Figure 20 montre des structures ne présentant aucun risque de condensation interstitielle.

5 CONCLUSIONS

Au vu de ce qui précède, on peut remarquer qu'il est parfaitement possible de satisfaire de nombreuses exigences apparemment contradictoires:

- Une meilleure isolation thermique permet de diminuer les déperditions de chaleur au travers de l'enveloppe du bâtiment tout en améliorant le confort.
- Un bâtiment propre, ayant une enveloppe étanche à l'air, mais munie d'ouvertures de ventilation adéquates, ou en conjonction avec une bonne installation de ventilation mécanique, améliore la qualité de l'air intérieur et évite les courants d'air, tout en diminuant les déperditions de chaleur par aération.
- Un bâtiment conçu en fonction des habitants et du soleil présente un confort optimal tout en consommant moitié moins d'énergie qu'un bâtiment dessiné sans tenir compte du soleil.
- Une bonne installation de chauffage permet d'amener la chaleur au bon moment et au bon endroit, donc d'améliorer le confort tout en diminuant les pertes techniques.
- Des protections solaires efficaces, ainsi qu'une stratégie d'aération adéquate dans un bâtiment bien conçu, permettent d'assurer pratiquement sans frais, dans notre climat, un très bon confort d'été.
- Un éclairage naturel bien étudié permet d'améliorer le confort tout en diminuant la consommation d'électricité.
- Les précautions à prendre pour éviter les dégâts dus à l'humidité sont compatibles avec les autres mesures propres à assuré santé, salubrité et basse consommation.

Nous sommes donc loin de devoir se priver de confort pour assurer une meilleure gestion de l'énergie dans le bâtiment. A condition d'examiner les différents aspects de cette gestion de

manière globale et intelligente, il est possible d'avoir le beurre, l'argent du beurre, et la laitière en prime!

6 RÉFÉRENCES

1. Fanger, P.O., *Thermal Comfort*. 1982, Florida, USA: R. E.Krieger.
2. *EN-ISO-7730: Ambiances thermiques modérées. Détermination des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique.*, . 1993, CEN et ISO: Bruxelles et Genève.
3. Fanger, P.O., *et al.*, *Air turbulence and the sensation of draught*. Energy and Buildings, 1988. **12**: p. 21-30.
4. *SIA 180: Isolation thermique et protection contre l'humidité dans les bâtiments*, . 1999, SIA: Zurich.
5. Fanger, P.O., *Introduction of the olf and decipol units to quantify air pollution perceived by human indoors and outdoors*. . Energy and Buildings, 1988. **12**: p. 1-6.
6. *EN 832 - Thermal performance of buildings - Calculation of energy use for heating - Residential buildings*, . 1999, CEN: Brussels.
7. Roulet, C.-A., *Energétique du Bâtiment*. 1987, Lausanne: Presses Polytechniques Romandes. 226 + 134.
8. Ganz, C., *et al.*, *Le Soleil - Chaleur et lumière dans le bâtiment*. Vol. Documentation SIA D 056. 1990, Zürich: SIA.