

## Les bâtiments

C. -A. Roulet

### Le bâtiment moyen actuel

#### Son indice de consommation d'énergie

Dans les climats tempérés et froids, la plus grande part de l'énergie utilisée par un bâtiment sert au chauffage.

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.

L'indice de dépense d'énergie (IDE) est le rapport de la consommation annuelle d'énergie d'un bâtiment (pour le chauffage, l'éclairage, la cuisson, etc.) à la surface de plancher chauffé (donc sans les caves, escaliers et autres locaux non chauffés) brute (murs compris) <sup>1</sup>.

*Figure 1 : Les indices de dépense d'énergie de trois types de bâtiments*

L'IDE des bâtiments varie d'un facteur dépassant 10 (à prestations équivalentes) entre les plus gros et les plus petits consommateurs en Suisse, à savoir de moins de 100 à plus de 1000 MJ/m<sup>2</sup> (correspondant respectivement à une consommation annuelle de 3 et 30 litres de mazout par mètre carré de plancher chauffé !). La consommation annuelle moyenne helvétique oscille autour de 700 MJ/m<sup>2</sup>, mais les bâtiments courants construits selon les normes les plus récentes n'atteignent que la moitié, en offrant un confort thermique souvent supérieur. En apportant un soin particulier aux économies d'énergie, à l'utilisation de l'énergie solaire, et en concédant une plus-value inférieure à 10 % (par rapport à un bâtiment courant récent), on arrive encore à abaisser ce chiffre de moitié, et cela toujours en garantissant un confort thermique optimal.

Il est donc possible d'effectuer, à long terme, des économies d'énergie importantes dans le bâtiment, et les autorités communales sont très bien placées pour encourager les efforts dans ce domaine. Rappelons à ce sujet l'art. 99 de la loi vaudoise sur l'aménagement du territoire (LATC) : « *La municipalité **encourage** l'utilisation active ou passive de l'énergie solaire. Elle peut accorder des dérogations...* » et l'art. 56 de l'ordonnance d'application : « *Les bâtiments nouveaux seront conçus de manière à réduire les pertes thermiques et à augmenter les gains en énergie solaire...* » ce qui signifie en clair qu'ils ne devraient pas avoir un indice de dépense d'énergie supérieur à 200 MJ/m<sup>2</sup>K.

Ce n'est pas le cas du bâtiment moyen actuel : une basse consommation d'énergie fait rarement partie des préoccupations des maîtres d'ouvrage ou des architectes, et une grande partie du parc de bâtiments a été construite pendant les années 1960 à 1970, lorsque les préoccupations énergétiques étaient inexistantes.

#### Le bilan énergétique

Chacun sait que l'énergie ne se crée ni ne se perd. Toute l'énergie qui entre dans un bâtiment, sous forme de combustible, de rayonnement solaire, de nourriture ou d'électricité, finit par en ressortir d'une manière ou d'une autre, souvent sous forme de chaleur, qui est la forme la plus dégradée de l'énergie.

*Figure 2 : Les flux d'énergie contribuant au chauffage d'un bâtiment.*

La gestion énergétique du bâtiment consiste à utiliser au mieux l'énergie qui traverse le bâtiment, de manière à assurer les prestations nécessaires tout en freinant cette traversée.

#### Ses déperditions

La plus grande part du flux d'énergie qui traverse les bâtiments en hiver en climat tempéré sert

---

<sup>1</sup> La définition précise de l'IDE se trouve dans la norme SIA 180/4.

à maintenir un niveau de température confortable à l'intérieur, malgré les déperditions de chaleur vers l'extérieur plus froid. S'il est impossible d'éviter totalement ces déperditions, il est parfaitement possible et chaudement recommandé de les freiner, par une amélioration générale du niveau d'isolation thermique.

*Figure 3 : À niveau de prestations égal, un bâtiment mal conçu consomme beaucoup plus d'énergie.*

La chaleur quitte le bâtiment essentiellement par deux voies :

1. par transmission de chaleur au travers du sol, des murs et de la toiture ; on limite ces déperditions en isolant le bâtiment (voir *Amélioration par l'isolation thermique*) ;
2. par convection dans l'air quittant le bâtiment, qui fait la place à l'air frais indispensable à une bonne aération ; ces déperditions peuvent être limitées à un minimum, mais ne peuvent pas être éliminées. Par contre, il est possible d'en récupérer une partie importante.

### **Ses gains**

Il est possible de limiter la consommation d'énergie achetée en augmentant les gains de chaleur du bâtiment. Les sources de chaleur possible sont :

1. l'utilisation passive du rayonnement solaire (laisser le soleil entrer dans le bâtiment si nécessaire, voir *Utilisation du soleil pour le chauffage*) ;
2. la chaleur métabolique des occupants ;
3. les pertes de chaleur des appareils installées dans le bâtiment.

La première source peut être très importante et couvrir environ la moitié des besoins d'un bâtiment bien conçu. La seconde source n'est pas contrôlable, et n'est importante que dans les bâtiments à population dense (écoles, salles de réunion). La troisième peut être importante mais n'est pas contrôlable, en ce sens que les appareils ne sont pas enclenchés dans le but de chauffer le bâtiment, mais pour d'autres besoins qui ne sont pas nécessairement synchronisés avec les besoins en chaleur. Une saine gestion de l'énergie exige des appareils à haut rendement, donc à faibles déperditions de chaleur : il n'est pas sage de compter sur ces déperditions pour diminuer les besoins en chaleur.

### **Son confort et ses prestations**

Un bâtiment confortable assure à ses habitants diverses prestations : un climat intérieur agréable et peu dépendant des conditions extérieures, une atmosphère saine, un éclairage satisfaisant, des transports (ascenseur), des communications (téléphone, radio, TV) et diverses installations pour faciliter la vie, telles que cuisine, toilettes et salle d'eau. Le rôle premier d'un bâtiment est d'assurer ces prestations, et la gestion optimale de l'énergie, quoique très importante du point de vue de son impact sur l'environnement, intervient en deuxième priorité, lorsque que les conditions de confort sont satisfaites.

Cependant, toutes ces prestations nécessitent des transformations énergétiques. Il est donc insensé de fournir des prestations inutiles ou non requises, comme d'éclairer un local inoccupé, de chauffer ou climatiser à des températures inconfortables (respectivement trop haute ou trop basse), ou de maintenir prêt à l'emploi un appareil peu utilisé (TV par exemple). D'autre part, les prestations devraient être assurées de manière à consommer un minimum d'énergie et à charger l'environnement le moins possible. Une grande part de la consommation des bâtiments en Europe étant utilisée pour le chauffage, il convient de regarder d'un peu plus près le confort thermique.

### **Le confort thermique**

Le confort est une sensation de bien être liée à de nombreux facteurs, et le confort thermique est relié à la sensation de froid ou de chaleur. Cette sensation est subjective, et donc propre à chaque individu, notamment à son activité physique et son habillement. De plus, elle dépend de

divers facteurs extérieurs. Les paramètres donnés dans le tableau 1 interviennent dans le confort thermique.

*Tableau 1 : Paramètres ayant de l'influence sur la sensation de confort thermique*

<b>Conditions personnelles</b>	Activité physique Habillage État de santé
<b>Conditions thermiques</b>	Température de l'air Sources de rayonnement (radiateurs, soleil) Température des surfaces environnantes Vitesse relative de l'air par rapport au sujet Humidité relative de l'air Perméabilité thermique dynamique du sol
<b>Autres influences</b>	Degré d'occupation des locaux Ambiance, etc.

Suivant sa sensation globale, l'habitant se déclarera satisfait ou insatisfait. **Le critère fondamental de confort est donc la satisfaction des usagers.** Ce n'est en tous cas pas la seule température de l'air. Il est possible de déterminer à l'avance les conditions à réunir pour obtenir une satisfaction maximum pour le confort thermique. Cependant, le nombre moyen de personnes insatisfaites ne pourra que difficilement être inférieur au dixième des usagers concernés. Le diagramme de la figure 4 montre la température opérative optimale en fonction de l'activité et de l'habillement des individus.

La température opérative est celle ressentie par les occupants. Elle est fonction des températures de l'air et des surfaces environnantes. Une température opérative donnée (par exemple 22°C) peut être obtenue de plusieurs manières :

- l'air et toutes les surfaces vues par l'occupant sont à 22°C,
- une ou plusieurs surfaces (par exemple des fenêtres en hiver) sont plus froides que 22°C, et l'air doit alors être plus chaud que 22°C, et
- l'air est plus froid que 22°C et une ou plusieurs surfaces (plancher chauffant, paroi d'un poêle) sont plus chaudes.

L'activité métabolique peut s'exprimer en watt par mètre carré de peau ( $[W/m^2]$  échelle de droite sur la figure 4) ou en *met*. Un *met* correspond à une activité tranquille, en position assise, soit à 55  $W/m^2$ .

L'habillement correspond, du point de vue thermique, à une résistance à la perte de chaleur corporelle. Un *clo* correspond à une tenue de ville (complet veston), soit à une résistance thermique de 0,155  $m^2K/W$ .

*Figure 4 : Température opérative idéale en fonction de l'habillement et de l'activité (<sup>2</sup>). À la température optimale, le nombre d'insatisfaits est minimum (5 %). Les bandes hachurées donnent la tolérance sur cette température optimale, telle que le pourcentage d'insatisfaits ne dépasse pas 10 %.*

On remarque qu'en tenue d'hiver (1 clo), une personne assise (1 met) demande, en moyenne, une température opérative de 23±2°C. Cette température tombe à 18±3°C si cette personne a une activité plus grande (2 met), qui correspond à une activité de ménage. Une température de 20°C dans les habitations et les bureaux est raisonnable en hiver, si on admet que les occupants adaptent leur habillement à leur activité : on ajoute un pull-over si on lit dans un fauteuil, et on tombe la veste pour repasser le linge ou passer l'aspirateur...

En tenue d'été (0,5 clo), la température optimale est de 26±1,5°C pour les personnes tranquilles, et 22±2°C pour une activité courante. Il est donc inutile de refroidir (climatiser) les

<sup>2</sup> ISO 7730 Ambiances thermiques modérées, – détermination du PMV et du PPD. Voir aussi la norme SIA 180.(SIA, Zurich).

bâtiments en dessous de 24°C en été, et il est même inconfortable de les refroidir à 20°C.

## Amélioration par l'isolation thermique

### Qu'est-ce que l'isolation thermique ?

La chaleur tend toujours à quitter les endroits les plus chauds pour aller vers les endroits froids. Il est impossible de contenir la chaleur dans un récipient, aussi étanche soit-il. On ne peut que freiner sa fuite en isolant thermiquement le récipient. Dans un bâtiment, les parois du récipient sont le sol (ou la dalle sur cave), les murs (avec les vitrages) et la toiture (ou la dalle des combles).

Tous ces éléments doivent être isolés aussi bien que possible et de manière aussi continue que possible (pas de trous ou de «ponts thermiques»). La déperdition de chaleur au travers d'un élément de l'enveloppe du bâtiment est proportionnelle à sa surface et à la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Le coefficient de proportionnalité, propre à l'élément de construction, est le coefficient de déperdition thermique,  $U^3$ . Il s'exprime en  $W/m^2K$  (Watt par mètre carré et par degré). Un élément de 1  $m^2$  ayant un coefficient  $U = 1 W/m^2K$  perd un Watt pour chaque degré de différence de température entre ses faces. Sur une saison de chauffage, qui dure environ 200 jours avec une différence de température moyenne de 15 degrés, sa perte d'énergie sera de 72 kWh, soit l'équivalent de 7 litres de mazout. Des valeurs  $U$  courantes sont données dans le tableau 2.

Tableau 2 : Coefficients de transmission thermique typiques dans le bâtiment

Élément de construction	$U [W/m^2K]$
Mur ancien (par exemple, mur en «briques isolantes»)	0,8 à 1
Mur ou toit isolé selon les normes modernes	0,2 à 0,4
Limite maximum pour les murs, selon SIA 180	0,6
Niveau approximatif de rentabilité énergétique optimale	0,04
Niveau approximatif de rentabilité économique optimale	0,2
Bon vitrage moderne (type «confort»)	0,6 à 1,6
Vitrage isolant double standard	3
Vitrage simple	6

L'isolation thermique est obtenue en général en intercalant une couche de matériau fibreux ou de mousse dont le rôle est d'immobiliser une couche d'air. C'est cette couche d'air qui est en fait l'isolant thermique. Elle améliore généralement aussi l'isolation phonique et le confort d'été et d'hiver, car le climat intérieur dépend moins des conditions extérieures, et les températures des surfaces intérieures sont proches de celle de l'air intérieur.

Le coefficient de transmission thermique des murs anciens en maçonnerie de pierres assemblées au mortier de chaux ne semble pas très favorable à première vue, surtout si on le calcule comme un mur de pierre massif. Il faut savoir que ces murs contiennent de nombreux vides, notamment parce que le mortier est très poreux, et sont de ce fait souvent plus isolants qu'on pourrait le croire. D'autre part, ces murs sont très massifs, et permettent une utilisation optimale des gains internes et du rayonnement solaire entrant par les fenêtres. En cas de rénovation, il est donc déconseillé de les isoler à l'intérieur <sup>(4)</sup>, même si une isolation extérieure n'est pas possible pour des raisons d'esthétique.

### Effets sur le confort

Nous avons vu que la sensation de confort thermique est liée aussi bien à la température de l'air qu'à la température des surfaces avoisinantes. Or, en hiver, la température de la surface

<sup>3</sup>  $U$  est le nouveau symbole admis au niveau international pour ce coefficient. On l'appelait autrefois coefficient  $K$ .

<sup>4</sup> Une isolation intérieure augmente aussi les risques de condensation et de pourriture des têtes de poutres qui pourraient être encastrées dans de tels murs.

intérieure d'une paroi extérieure sera d'autant plus élevée qu'elle sera mieux isolée. Chacun connaît la sensation désagréable de froid que l'on ressent près d'une paroi ou d'un vitrage mal isolé. L'épaisseur d'isolant minimale nécessaire pour faire disparaître cet effet près des parois opaques est de 8 à 10 cm. Les vitrages actuels ne sont généralement pas aussi bien isolés que les parois opaques, mais on trouve sur le marché des vitrages trois, voire quatre fois plus isolants que le vitrage double ordinaire. Le confort près de ces vitrages est sans commune mesure avec celui que l'on ressent près d'un vitrage ordinaire.

### Effet sur la consommation

L'isolation thermique des bâtiments s'est nettement améliorée depuis 1980, suite notamment à la publication de diverses normes. Le tableau 3 montre les déperditions thermiques et les gains solaires, pendant la saison de chauffage, d'une paroi de 15 m<sup>2</sup>, munie d'un vitrage de 7 m<sup>2</sup> et placée en façade sud dans la région lausannoise.

Ce tableau montre, dans chaque colonne:

- le type de norme appliqué ;
- le coefficient  $U$  de transmission thermique des parois et des vitrages ;
- le coefficient  $g$  de transmission énergétique totale des vitrages, à savoir le rapport entre l'énergie traversant le vitrage sous forme de chaleur et de rayonnement à l'énergie du rayonnement solaire incident ;
- les déperditions thermiques brutes pendant la saison de chauffage ;
- les gains solaires par les vitrages ;
- le facteur d'économie par rapport aux anciennes normes.

L'effet de l'isolation seule se remarque en colonne 5, qui donne les déperditions thermiques brutes pendant la saison de chauffage. Elles ne baissent que d'un facteur 1,7 entre les anciens bâtiments et les exigences de la norme SIA 180 : 2000, qui ne vise qu'à éviter les dégâts et à apporter un confort acceptable. Les exigences de la norme SIA 380/1 : 2001 diminuent les déperditions d'un facteur 2,5 et une isolation économiquement optimale permet de les diminuer d'un facteur 6 au moins !

[TABLEAU 3 ?]

L'avant-dernière colonne montre les besoins de chaleur nécessaires pour compenser les déperditions thermiques de la paroi, déduction faite des gains solaires passifs utilisables. On notera la réduction impressionnante de ces besoins nets, encore mieux mise en évidence dans la dernière colonne, qui donne le facteur d'économie, ou le rapport des besoins nets correspondant à la norme considérée aux besoins nets des anciens bâtiments.

Le tableau 3 n'est qu'une illustration, et ne doit pas être considéré comme représentatif de la moyenne des bâtiments. Il ne tient pas compte des déperditions des installations de chauffage et des besoins de chaleur pour l'aération et la préparation de l'eau chaude.

### Isolation optimale

La question de l'épaisseur optimale est souvent posée : jusqu'où doit-on isoler ? N'y a-t-il pas une épaisseur au-delà de laquelle l'énergie consommée pour produire le matériau isolant dépasse l'économie de chauffage ?

La figure 5 montre le coût d'une isolation et du chauffage en fonction de l'épaisseur d'isolant. Le coût annuel (intérêt et amortissement) de l'isolant augmente avec son épaisseur, alors que le coût annuel du chauffage diminue en proportion inverse. La consommation d'énergie totale, qui est la somme des deux, présente un optimum qui dépend du type de matériau, de son prix et du climat. La figure 5 vaut pour un isolant fibreux de densité moyenne dans le climat du Plateau suisse, le coût de l'énergie étant celui du mazout en 1996.

*Figure 5 : Coût total sur 50 ans 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.*

NOTE IMPORTANTE: Les épaisseurs d'isolant optimales du point de vue économique sont comprises entre 10 et 20 cm, suivant les matériaux et le climat. Ces épaisseurs sont cinq fois plus grandes si on recherche l'optimum énergétique. Par exemple, il faut dépasser 1 mètre d'épaisseur de laine de verre pour que la consommation d'énergie pour la fabrication de cette laine dépasse les économies dues à l'isolation.

Il faut reconnaître que les habitudes actuelles en matière d'isolation thermique sont encore loin de l'optimum, même si elles se sont nettement améliorées depuis 1960.

## **Pour une meilleure aération**

### **Pourquoi aérer ?**

Le but de l'aération est d'assurer un environnement intérieur confortable, maintenant les occupants en bonne santé. Un air sans cesse renouvelé à l'intérieur des bâtiments est nécessaire avant tout pour éliminer les divers polluants générés dans le bâtiment et qui rendent l'atmosphère malodorante et toxique. En l'absence d'aération, l'oxygène est la dernière chose qui manque. Les occupants seront incommodés en premier lieu par une concentration trop élevée en contaminants divers (figure 6).

*Figure 6: Débit d'air requis pour évacuer les divers contaminants produits par une personne assise ayant une activité de bureau.*

Ces nuisances sont essentiellement générées par l'activité des occupants. Elles sont notamment :

- les odeurs, auxquelles les personnes entrant dans les locaux sont très sensibles,
- la vapeur d'eau, qui augmente l'humidité relative, donc le risque de moisissures,
- le gaz carbonique, qui, en trop grande concentration, rend les occupants léthargiques, et qui, à moindre concentration, est un indicateur du taux d'occupation des locaux,
- les poussières, aérosols et gaz toxiques provenant des activités et du bâtiment lui-même,
- la chaleur en excès, provenant des activités humaines, qui augmente la température et doit donc être évacuée.

En principe, le bâtiment (les matériaux de construction et les installations techniques) ne devrait pas être source de nuisances. Ce n'est malheureusement pas toujours le cas.

### **Comment aérer ?**

Une aération optimale, assurant une bonne qualité de l'air intérieur tout en consommant un minimum d'énergie nécessite :

- une bonne gestion des sources de polluants ;
- un contrôle des débits d'air ;
- une stratégie de ventilation appropriée.

### **Gestion des sources**

À concentration limite fixée pour un polluant donné, le débit d'air nécessaire est directement proportionnel à l'intensité de la source de polluant. Pour éviter de gaspiller de l'énergie pour le conditionnement et le transport de l'air, il convient de réduire le débit des sources de polluants au 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.). Des produits de nettoyage,

certaines moquettes ou certains mastics émettent des odeurs désagréables ; diverses peintures et colles contiennent des solvants volatils toxiques ; etc. De grands progrès ont été faits dans ce domaine, et il existe actuellement sur le marché des produits propres, inodores 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.

#### **Contrôle des débits d'air**

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 au-dessous d'une valeur de consigne.

#### **Gestion 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 fissures ou autres défauts d'étanchéité incontrôlés. Le débit d'air doit être contrôlé 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. Ce principe est repris dans le projet de norme SIA 180, en révision en 1997, et qui donne des valeurs limites maximales pour la perméabilité à l'air des enveloppes des bâtiments.

#### **Effet d'un contrôle de l'aération sur la consommation**

Des mesures effectuées dans le cadre d'un programme de recherches européen<sup>5</sup> ont montré que la plupart des immeubles de bureaux européens sont sur-ventilés. En amenant tous les bâtiments mesurés à un débit de ventilation correct, une économie de 20 % sur la consommation d'énergie pour la ventilation aurait pu être réalisée, sans porter préjudice à la qualité de l'air<sup>6</sup>.

Ce résultat ne peut certes pas être extrapolé à tous les types de bâtiments, mais il apparaît de plus en plus que des économies non négligeables peuvent être faites dans cette direction.

#### **Possibilités d'amélioration**

Une économie importante peut être réalisée par la récupération de chaleur. Il est en effet possible de récupérer tout ou partie de la chaleur contenue dans l'air vicié pour la redonner au bâtiment d'une manière ou d'une autre. Plusieurs stratégies sont possibles :

1. Dans les installations de ventilation mécanique à double flux, installer un échangeur de chaleur entre l'air vicié et l'air frais. Ce type d'installation est maintenant standard et permet des rendements de récupération dépassant 60 % si le bâtiment est étanche et l'installation bien conçue.

<sup>5</sup> Programme Joule 2, projet « Indoor Air Quality Audit ».

<sup>6</sup> Roulet et al. : *Ventilation performance and energy consumption in European office buildings*. Proc. of Healthy Buildings '95 conference, p. 1299, Milan, 1995.

2. Dans les installations mécaniques à extraction seulement, extraire la chaleur dans l'air vicié à l'aide d'une pompe à chaleur, et céder cette chaleur au chauffe-eau ou au circuit de chauffage.
3. Préchauffer l'air frais en le faisant passer dans des conduites enterrées (puits canadiens). Cette technique a notamment été appliquée aux immeubles solaires de Plan-les-Ouates (GE).
4. Préchauffer l'air frais en le faisant passer le long ou au travers des parois du bâtiment. L'air frais se préchauffe par les déperditions des parois. Ce dispositif, appelé « isolation pariéto-dynamique », a été appliqué à plusieurs bâtiments en France.
5. Évacuer l'air vicié le long ou au travers des parois du bâtiment ou dans des doubles vitrages. La chaleur de l'air compense, voire annule ainsi les déperditions par transmission des parois. Un prototype de façade de ce type a été testé au LESO.

## Refroidissement passif

### Principe du refroidissement passif

Le refroidissement passif consiste à mettre à profit tout phénomène abaissant la température intérieure et ne consommant pas d'énergie. Il permet d'assurer sous nos climats, un excellent confort estival tout en évitant l'installation de coûteux systèmes de conditionnement d'air.

En premier lieu, on cherche à réduire les gains de chaleur solaires et internes, en installant des protections solaires efficaces et en évitant d'utiliser des appareils à faible rendement.

Dans la mesure où le climat le permet, on évacue l'excédent de chaleur en ventilant fortement. Cette technique d'usage général est applicable dans tout type de bâtiment (lourd ou léger), mais ne fonctionne que lorsque la température extérieure est plus basse que la température de confort.

Si ce n'est pas le cas, on peut appliquer le refroidissement passif par ventilation nocturne. Celui-ci 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: la période de refroidissement et la 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** : Tant que la température de l'air extérieur est plus élevée que celle de l'air intérieur, la ventilation est réduite au minimum nécessaire pour assurer une bonne qualité de l'air. Les gains de chaleur résiduels chauffent le bâtiment mais, la structure étant froide et massive, ce réchauffage est relativement lent. Dans de bonnes conditions, on évite de dépasser les limites d'un bon confort thermique.

Le refroidissement passif par ventilation nocturne permet généralement d'atteindre des températures plus basses ou d'éliminer plus de chaleur que la ventilation diurne (figure 8). Il n'est cependant applicable qu'aux bâtiments ayant une inertie thermique suffisante.

*Figure 8: Température dans deux bureaux identiques. L'un est aéré pendant la journée, l'autre pendant la nuit. L'abaissement de la température maximale dépasse 4 degrés ! La ligne fine est la température extérieure.*

### Règles de conception pour le refroidissement passif

L'utilisation de la ventilation pour abaisser la température intérieure et diminuer les besoins en réfrigération ne peut fonctionner que si certaines conditions sont satisfaites. Notons qu'il n'est pas toujours possible de les satisfaire pour des bâtiments existants qui n'ont pas été conçus pour cela. Ces conditions sont données ci-dessous.



*Figure 9: Les protections solaires efficaces sont à l'extérieur du bâtiment. Le rayonnement solaire inévitablement absorbé par le dispositif de protection se transforme en chaleur. Si le dispositif est à l'intérieur, la chaleur y est aussi !*

### *Conditions générales*

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 et l'utilisation adéquate de protections solaires efficaces, donc extérieures;
    - un équipement (machines, éclairage, etc.) à faible consommation d'énergie,
    - la généralisation de l'éclairage naturel, contrôlé par des dispositifs rejetant la lumière en excès à l'extérieur du bâtiment.
 Si les gains sont trop importants pour assurer le confort par la seule ventilation naturelle, il est possible d'assister celle-ci par un refroidissement artificiel.
  2. La température extérieure moyenne, sur 24 heures, ne doit pas être trop élevée.
  3. Le climat doit être tel que la déshumidification de l'air ne soit pas nécessaire.
  4. Pour le refroidissement par ventilation nocturne, l'amplitude des variations circadiennes<sup>7</sup> de la température de l'air extérieur doit être importante (minimum 5 degrés).
- Ces conditions sont facilement remplies en Suisse, en tous cas au nord des Alpes.

### *Règles constructives pour l'inertie thermique.*

1. 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.
2. Il faut limiter autant que possible les surfaces recouvertes de matériau isolant (faux plafonds, moquettes, lambrissages, tapisseries épaisses). Il convient toutefois de tenir compte des exigences acoustiques et esthétiques. Une solution de compromis consiste à laisser apparente une partie importante (au moins 50 %) de la structure massive.

*Figure 10 : Configurations de ventilation naturelle : a) ventilation à deux ouvertures ; b) ventilation traversante ; c) ventilation à ouverture unique ; d) ventilation avec cheminée.*

3. Une isolation suffisante doit être placée à l'extérieur. Il importe en effet que la masse intérieure de la paroi ne soit pas chauffée de l'extérieur. Ce critère est satisfait pour les murs doubles ou à isolation extérieure, si le coefficient de transmission thermique  $U$  est conforme aux exigences actuelles pour la protection thermique d'hiver.
4. Pour des locaux qui ne sont occupés que la nuit, une faible inertie thermique peut être avantageuse, car elle permet un abaissement rapide de la température ambiante.

Il est avantageux de répartir la capacité de stockage sur toutes les surfaces de la structure. À contrario, il est erroné de concentrer cette masse sur un seul élément épais. Ce n'est donc pas la masse par mètre carré de plancher qui est déterminante, mais la masse par mètre carré de surface en contact avec l'air intérieur.

### *Règles constructives concernant la ventilation*

Plusieurs configurations sont possibles pour la ventilation nocturne (figure 10). Les ouvertures de ventilation doivent être correctement dimensionnées et leur position doit être adaptée à la configuration prévue.

1. Le haut des ouvertures assurant la ventilation dans chaque local doit se situer le plus haut possible. En effet, pour un transfert de chaleur maximal avec les parois, la surface

<sup>7</sup>

ou nycthémérales (jour / nuit)

d'échange convective doit être la plus grande possible (figure 11).

2. Les ouvertures doivent être orientées autant que possible de façon que les entrées d'air soient exposées au vent dominant en période de refroidissement et que les sorties d'air se trouvent sous le vent.

*Figure. 11: Au-dessus du haut de l'ouverture, l'air chaud piégé est à la température des parois et aucun échange convectif ne peut avoir lieu.*

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 séparés par 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. Le rapport entre la surface des ouvertures d'entrée et de sortie doit être calculé pour avoir un niveau neutre au-dessus du dernier niveau ventilé.
5. Une surélévation du bâtiment facilite la construction des grandes sorties d'air. S'il n'est pas possible de satisfaire cette condition, on peut ventiler le niveau supérieur indépendamment, ou l'équiper d'un ventilateur d'extraction (figure 12).
6. Si la ventilation mécanique est utilisée pour le refroidissement passif, le ventilateur doit fonctionner de préférence en extraction pour éviter d'échauffer l'air.
7. Il n'est pas possible d'utiliser une installation de ventilation mécanique à double flux à haute pression pour le refroidissement passif.

Grande ouverture haute	Ventilation autonome du dernier étage	Ventilateur d'appoint
---------------------------	--	--------------------------

*Figure. 12: Moyens disponibles pour refroidir les derniers étages. Voir aussi Figure 10, d.*

### *Règles de sécurité*

1. Prévoir des protections contre les tempêtes, 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. 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 refroidie ou panneaux radiants (par ex. plafonds froids).
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 doit aussi être envisagée.
4. Veiller à satisfaire les règles de protection incendie. Les exutoires de fumée peuvent être utilisés comme ouvertures de ventilation, mais doivent pouvoir être manœuvrés 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.

### *Règles de comportement*

Les meilleures mesures constructives peuvent être inutiles sans un comportement approprié, qui ne peut être obtenu des occupants qu'au moyen d'une information claire et répétée. Deux points importants :

1. Il est essentiel que les protections solaires soient utilisées.
2. Un refroidissement efficace n'est atteint que si les ouvertures de ventilation sont fermées pendant la journée et ouvertes la nuit.

## **Utilisation du soleil pour le chauffage**

### Effet des gains solaires passifs

Les pertes thermiques d'un bâtiment comprennent les déperditions au travers de l'enveloppe et les pertes par ventilation. La quantité de chaleur nécessaire pour maintenir une température confortable dans le bâtiment est néanmoins inférieure à ces pertes, car tout bâtiment reçoit sa part du rayonnement solaire, qui se transforme en chaleur.

Les gains solaires des parois opaques (murs, toits) ne représentent, en moyenne sur l'hiver, qu'une faible part de leurs pertes thermiques. Il est notamment illusoire et inconfortable de diminuer l'isolation thermique de ces éléments sous prétexte d'augmenter les gains solaires. Si on y gagne pendant quelques instants privilégiés, on y perd sur l'année.

L'essentiel des gains solaires provient du rayonnement entrant dans le bâtiment par les vitrages. En particulier, dans notre climat, les vitrages isolants modernes, à couche sélective (type « confort ») présentent un bilan positif pour toutes les orientations allant du sud-est au sud-ouest. Ceci signifie que, sur la saison de chauffage, ces vitrages gagnent plus qu'ils ne perdent.

*Figure 13 : Caractéristiques d'un bâtiment solaire passif.*

Les gains solaires sont toutefois très variables, et, pour pouvoir bien les utiliser, il faut réunir plusieurs conditions importantes (figure 13) :

1. Les gains solaires ne peuvent apporter une part importante des besoins en chauffage que dans les bâtiments bien isolés. Cette part est non négligeable: dans un bâtiment ordinaire, elle avoisine 10 % des besoins, mais elle peut atteindre 50 % dans les bâtiments bien conçus.
2. Les grands vitrages bien orientés (sud-est à sud-ouest) apportent de grands gains, mais ces gains peuvent être excessifs en mi-saison et en été.
3. Des protections solaires extérieures mobiles et efficaces (stores) sont donc indispensables. Des arbres à feuilles caduques sont souvent proposés, car ils apportent une ombre plus fraîche que des stores. Toutefois, ce type de protection n'est pas réglable, et ne peut pas être diminué pour améliorer l'éclairage naturel par mauvais temps en belle saison.
4. Les excès de chaleur momentanés doivent pouvoir être accumulés dans la structure du bâtiment. Celui-ci doit donc être de construction lourde (construction usuelle dans nos contrées) et isolée à l'extérieur.
5. Le chauffage d'appoint doit réagir rapidement aussi bien lorsque le soleil disparaît que lorsqu'il apparaît. Toutefois, des systèmes de contrôle prévisionnels (voir *Techniques d'utilisation de l'énergie*) peuvent pallier les défauts des chauffages à grande inertie, comme le chauffage par le sol.

### Comment améliorer l'utilisation de ces gains ?

#### *Par une meilleure conception architecturale*

Un bâtiment solaire bien conçu doit tout à la fois:

- garantir un confort élevé ;
- offrir un éclairage naturel de qualité ;
- être économe en énergie (ce dernier point est en fait une conséquence des précédents).

Le « style solaire » n'est ni nécessaire, ni suffisant à garantir ces qualités. Un bon bâtiment se distingue moins par son aspect que par le soin particulier avec lequel l'architecte a intégré dans le projet les multiples éléments qui le composent : implantation, enveloppe, structure, installations techniques.

Si l'architecte pense au soleil pendant l'élaboration de son projet, s'informe sur les techniques constructives et la démarche architecturale à suivre pour les bâtiments solaires<sup>8</sup> et collabore dès le début avec un ingénieur thermicien, le succès est assuré.

#### *Par une meilleure utilisation*

<sup>8</sup>

Voir à ce sujet « Le soleil, chaleur et lumière dans le bâtiment », Documentation SIA D056.

Le comportement des habitants a une grande influence sur l'utilisation des gains solaires. Le comportement idéal vis à vis du soleil, en période de chauffage consiste à :

- laisser le soleil entrer dans le bâtiment au travers des fenêtres tant que la température intérieure n'est pas trop élevée ;
- abaisser les protections solaires dès que nécessaire ;
- éviter de chauffer quand les gains solaires sont suffisants ; couper le chauffage avant qu'il fasse trop chaud.

## Installations techniques

*Figure 14 : Schéma de principe d'une chaudière à combustible*

### Chaufferie

#### État actuel

La chaufferie comprend toutes les installations techniques nécessaires pour assurer le chauffage du bâtiment et, éventuellement, de l'eau chaude sanitaire.

La plupart des chaufferies comprennent une ou plusieurs chaudières à combustible (mazout, gaz, charbon, bois), dont la figure 14 illustre le principe.

La flamme du brûleur ou le foyer, ainsi que les gaz chauds qui s'en échappent, cèdent leur chaleur à un fluide caloporteur (de l'eau ou de l'air) au travers d'un échangeur de chaleur. Le fluide caloporteur transmettra cette chaleur au bâtiment par le réseau de distribution. Les gaz de combustion s'échappent par la cheminée.

L'idéal serait que toute la chaleur générée par la combustion se retrouve dans le fluide caloporteur. Ce n'est malheureusement pas le cas, et de la chaleur est perdue par plusieurs chemins (figure 15).

1. Une partie de la chaleur quitte la chaudière au travers des parois et chauffe la chaufferie. Cette déperdition peut être réduite par une bonne isolation thermique de la chaudière.

*Figure 15 : Déperditions de chaleur d'une chaudière. (voir texte)*

2. Les gaz de combustion qui quittent la chaudière contiennent encore de la chaleur qui serait utile, s'ils sont plus chauds que l'air ambiant. On diminue la température de ces gaz en dimensionnant correctement l'ensemble chaudière-brûleur, et en enlevant régulièrement la suie qui peut se déposer sur l'échangeur.
3. Si le brûleur est mal réglé, les gaz de combustion contiennent encore des produits combustibles qui non seulement sont perdus du point de vue énergétique, mais qui contribuent à la pollution atmosphérique.
4. Ces gaz brûlés contiennent aussi de la vapeur d'eau, et une certaine quantité d'énergie peut être récupérée en condensant cette vapeur en eau (chaudières à condensation).
5. Pendant les périodes d'arrêt du brûleur, et surtout pendant la première phase du démarrage, de l'air froid circule dans le foyer et refroidit l'échangeur. On diminue ces déperditions en limitant le nombre de démarrages (chaudière non sur-dimensionnée) et en installant un clapet d'air sur le brûleur.
6. A niveau d'isolation égal, la chaudière perd d'autant plus de chaleur qu'elle est plus grande. D'autre part, un brûleur sur-dimensionné devra être souvent arrêté (donc redémarré) pour éviter la surchauffe. Il s'ensuit que le rendement annuel moyen de la chaudière diminue avec le taux de surdimensionnement (Figure 16).

*Figure 16 : Rendement annuel de chaudières en fonction de leur taux de surdimensionnement.*

L'ensemble de ces déperditions ne devrait représenter qu'une petite partie du combustible consommé. Or, il arrive qu'elles constituent la moitié de la consommation dans les cas les plus

défavorables, par exemple dans une ancienne chaudière à charbon sur-dimensionnée, non isolée et reconvertie au mazout.

Il faut savoir que jusqu'à très récemment, le surdimensionnement des chaudières était la règle, si bien qu'en moyenne les chaudières suisses d'avant 1980 étaient deux fois trop grandes !

### **Possibilités d'amélioration**

L'Ordonnance fédérale pour la protection de l'air (OPair) exige un contrôle périodique du rendement de combustion et du réglage des brûleurs. Ceci a incité de nombreux propriétaires à remplacer les vieilles chaudières par de nouvelles plus performantes et à entretenir plus soigneusement leurs chaudières. Ainsi, non seulement la pollution de l'air mais aussi la consommation d'énergie ont été réduites.

Le surdimensionnement des chaudières est en voie de disparition. De plus, les chaudières modernes, à faibles déperditions, sont moins sensibles au surdimensionnement.

Une meilleure utilisation des combustibles peut être obtenue par le couplage chaleur-force ou cogénération: un moteur à combustion fait tourner une génératrice, produisant de l'électricité de haute valeur énergétique, et les pertes thermiques du moteur sont utilisées pour le chauffage (voir *Techniques d'utilisation de l'énergie*).

Des cellules à combustible, tirant directement l'électricité de la combustion sont en développement dans plusieurs laboratoires industriels. Leur généralisation permettrait de simplifier grandement la cogénération.

L'installation de chauffage est destinée à fournir de la chaleur en quantité juste suffisante dans une partie limitée du bâtiment. Toute chaleur fournie en excès, ou 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:

1. installer des chaudières efficaces, ce qui signifie :
  - dimensionnement correct,
  - bonne isolation thermique de la chaudière,
  - basse température des fumées, donc basse température d'utilisation,
  - si possible, chaudière à condensation,
  - fonctionnement à plusieurs allures (chaudières modulantes) ;
2. distribution à faibles pertes, donc :
  - conduites bien isolées (4 cm d'épaisseur au moins),
  - placer les conduites de préférence dans la zone chauffée,
  - basse température de distribution ;
3. 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.

### **Régulation et contrôle**

#### *État actuel*

La puissance de chauffage de la plupart des chaufferies suisses est réglée en fonction de la température extérieure seulement. Ce type de régulation ne peut pas tenir compte des gains solaires ou d'autres gains internes (par exemple feu de cheminée ou sapin de Noël), et diminue nettement le profit que l'on peut tirer de ces gains.

De nombreux radiateurs ne sont pas munis de vannes thermostatiques, empêchant ainsi l'habitant de contrôler efficacement la température. Il en résulte des surchauffes fréquentes que l'occupant compense naturellement en ouvrant les fenêtres...

Si le radiateur est muni de vannes thermostatiques, l'habitant est souvent mal renseigné et utilise cette vanne comme un robinet : Il l'ouvre en grand lorsqu'il a un peu trop froid, et la ferme s'il a trop chaud. Il est nécessaire de considérer ces vannes comme des thermostats, que l'on tourne d'un cran seulement vers la droite ou vers la gauche suivant que l'on a trop chaud ou trop

froid.

### *Possibilités d'amélioration*

Une instruction des habitants est essentielle à une bonne utilisation des installations techniques. Tout appareil se livre avec un mode d'emploi. Pourquoi pas les bâtiments, les appartements et les chaufferies ?

On trouve sur le marché des régulations plus « intelligentes » qu'un simple thermostat (voir le chapitre « *Techniques d'utilisation de l'énergie* »).

## **Chauffe-eau**

### **État actuel**

On peut classer les chauffe-eau en quatre grandes catégories :

1. Les chauffe-eau à accumulation, généralement électriques mais aussi à bois ou à autres combustibles, dont la seule application est de chauffer une certaine quantité d'eau, souvent égale à la consommation journalière. Leur puissance est relativement faible, car le temps de chauffage peut être nettement plus long que la durée de soutirage de l'eau chaude.
2. Les chauffe-eau directs, généralement à gaz, qui chauffent l'eau au passage en fonction de la consommation. Ces chauffe-eau ne contiennent qu'une quantité minimale d'eau, et leur puissance doit être importante pour assurer un débit d'eau chaude suffisant: il faut 2 kW pour chauffer 1 litre par minute de 10 à 40°C. Une douche nécessite donc une puissance d'environ 10 kW.
3. Les chaudières mixtes, dont la mission principale est d'assurer le chauffage, et qui produisent accessoirement l'eau chaude sanitaire. Cette solution est bonne en hiver, mais le rendement de la chaudière peut s'avérer catastrophique en été, car la chaudière peut alors être largement sur-dimensionnée.
4. Les chauffe-eau solaires, utilisant en priorité la chaleur produite par des capteurs solaires pour chauffer un ballon d'eau, et un des moyens décrits ci-dessus pour assurer l'appoint en cas d'insuffisance du soleil.

Tous ces chauffe-eau présentent des déperditions que l'on doit limiter à un minimum admissible. Les chauffe-eau à accumulation peuvent souffrir de pertes particulièrement élevées, car l'accumulateur est maintenu en permanence à température élevée. Or, pour des raisons d'encombrement, l'épaisseur d'isolation est souvent limitée à quelques centimètres, et cette isolation est souvent traversée par des pièces métalliques créant des ponts thermiques entre le ballon et la carrosserie. Il est curieux de constater que le chauffe-eau est l'endroit le plus chaud du bâtiment, et souvent le moins bien isolé !

L'eau est distribuée dans le bâtiment par un réseau, qui comprend souvent une ou plusieurs boucles de circulation pour éviter une attente trop longue après l'ouverture du robinet.

Les déperditions des réseaux sans boucle de circulation se limitent approximativement à la chaleur contenue dans l'eau chaude restant dans le réseau après soutirage. Si les soutirages sont peu fréquents, l'isolation des conduites ne sert pratiquement à rien : l'eau chaude se refroidit plus lentement, mais finit quand même par être froide.

Il en est tout autrement des boucles de circulation, maintenues chaudes en permanence. Il est essentiel que ces conduites soient bien isolées, car elles peuvent représenter une surface de déperditions nettement plus grande que celle du chauffe-eau. Ce n'est malheureusement pas le cas partout. On voit même des boucles de circulation dont l'isolation insuffisante est compensée par une résistance électrique plaquée contre la conduite !

Il faut enfin remarquer qu'il est doublement nuisible de surchauffer l'eau chaude : d'une part, le chauffage au-dessus de 60°C favorise le dépôt de calcaire dans le chauffe-eau et, d'autre part, les déperditions de chaleur sont augmentées d'autant. N'est-il pas ridicule de chauffer de l'eau à 70°C pour la mélanger ensuite à de l'eau froide pour l'utiliser ?

### *Possibilités d'amélioration*

Il est maintenant admis que l'isolation des chauffe-eau et des conduites maintenues en température doit être renforcée. Il est aussi bien connu et généralement admis que la température de l'eau chaude ne doit pas dépasser 55°C, température suffisante pour la plupart des usages ménagers.

Une nette diminution de la consommation d'énergie est obtenue grâce au chauffe-eau solaire, représenté schématiquement à la figure 17. Un chauffe-eau solaire correctement dimensionné permet sur le Plateau suisse une économie d'énergie annuelle dépassant 50 %. En d'autres termes, la moitié de la chaleur nécessaire pour chauffer l'eau chaude consommée en une année vient des capteurs solaires. En été, les performances sont nettement meilleures, et la quasi-totalité de l'eau chaude est solaire. Le prix de l'eau chaude ainsi fournie est égal ou inférieur à celui des chauffe-eau classiques pour autant que le chauffe-eau soit monté à la construction du bâtiment.

*Figure 17 : Schéma d'un chauffe-eau solaire classique.*

Une combinaison intéressante pour les bâtiments modernes est le calobus. Partant de l'idée que, dans un bâtiment moderne et bien conçu, la puissance moyenne de chauffage est du même ordre de grandeur que la puissance moyenne nécessaire à la préparation de l'eau chaude, B. Saugy propose de distribuer l'eau chaude de manière classique, avec une boucle passant dans chaque appartement. Le chauffage est obtenu localement en puisant la chaleur dans cette boucle au moyen d'un petit échangeur. On n'a ainsi qu'un circuit de distribution à installer, ce qui diminue les coûts et les déperditions. Le contrôle et la facturation du chauffage sont aussi plus faciles à exécuter pour chaque utilisateur.

## Éclairage

### État actuel

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 (tableau 4) et sa répartition.

L'union suisse pour la lumière (USL) recommande les valeurs du tableau 4 pour l'éclairement artificiel des locaux

*Tableau 4 : Éclairements recommandés*

Type de locaux et d'activité	Éclairement requis [lux]		
	Min.	Moyenne	Max.
Circulation, corridors, théâtres, salle de concert	50	100	200
Ateliers, halles de montage, magasins	200	300	400
Écoles, bureaux, travaux courants, lecture, écriture, travail sur écran, etc.	300	400	500
Travaux délicats, dessins, tracés, travaux techniques, etc.	500	750	1000
Ateliers de précision, mécanique fine, contrôle des couleurs, contrôle visuel de qualité, etc.	1000	??	5000

D'autres paramètres que l'éclairement 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) pour bien rendre les couleurs, et adapté au niveau d'éclairement : température de couleur basse (jaune) aux faibles éclairements, et haute (blanc-bleu) aux forts éclairements.
- La localisation et la répartition des sources de lumière ; éviter l'éblouissement et les contrastes trop prononcés dans le champ visuel.
- 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 et un environnement plus lointain (parois, sols, etc.).

$L/L' < 50$  entre l'endroit le plus clair et l'endroit le plus sombre 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.

### Possibilités d'amélioration

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 artificielle),
- d'accroître la productivité du personnel.

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 des bâtiments. 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 18, par exemple, montre des exemples de distribution du FLJ dans une pièce.

*Figure 18 : Exemples d'éclairage naturel.*

*Courbe (a) sans éclairage zénithal, coefficient de réflexion interne de 40 % ; (b) le coefficient de réflexion est abaissé à 25 % ; (c) avec éclairage zénithal et coefficient de réflexion de 40 %.*

Il est possible de déterminer le FLJ, et même l'aspect du local placé sous le ciel, avant la construction. 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.

Des dispositifs prometteurs sont actuellement en développement. Citons notamment les miroirs anidoliques développés au LESO. Ces dispositifs permettent de diriger la lumière provenant d'un demi ciel vers le fond d'un local.

*Figure 19: Principe de l'éclairage anidolique : une partie de la lumière frappant la façade est renvoyée vers l'arrière de la pièce par un jeu de miroirs de forme particulièrement étudiée.*

Le rendement de l'éclairage artificiel peut encore être nettement amélioré. Les tubes fluorescents et leurs ballasts ont vu leur efficacité s'améliorer nettement ces dernières années. L'introduction des lampes fluorescentes compactes a permis de diminuer facilement la



consommation d'énergie pour l'éclairage artificiel en de nombreux endroits. L'invasion du marché par ces lampes a été grandement facilitée par leur grande durée de vie, qui est une qualité souvent plus appréciée que la consommation d'énergie.

Il reste encore beaucoup à faire dans les luminaires. Nombreux sont en effet les luminaires qui cachent la source lumineuse au lieu de la mettre en valeur. Beaucoup d'autres renvoient mal la lumière vers la place à éclairer, et rares sont les luminaires qui sont dessinés pour assurer une haute efficacité lumineuse, jointe à une esthétique sûre et un confort optique optimale.

## Description du bâtiment à basse consommation

En premier lieu, 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 lui-même.

Un bâtiment devrait assurer, sans aucune consommation d'énergie, donc sans chauffage ni refroidissement artificiels, 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 21). 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 extrêmes sont des hôtels de grandes chaînes internationales 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 souvent juste acceptable.

Le bâtiment à basse consommation doit donc d'abord être conçu et construit pour fonctionner sans chauffage ni refroidissement la plupart du temps. Pour cela on utilise les techniques décrites dans les sections « *Refroidissement passif* » et « *Utilisation du soleil pour le chauffage* ».

Des installations techniques adaptées à ce type de bâtiment permettent alors d'assurer facilement et à moindre frais un confort agréable en tout temps (voir *Installations techniques*). Sans prendre de mesures exceptionnelles et coûteuses, moyennant donc un surcoût minime par rapport à un bâtiment ordinaire, il est possible d'abaisser l'indice de dépense d'énergie total au-dessous de  $160 \text{ MJ/m}^2$ . Ces techniques sont maintenant connues et de nombreux bâtiments existants en démontrent la réalité. On arrive ainsi à un **facteur 4** d'économie d'énergie par rapport au bâtiment suisse moyen.

*Figure 21 : Évolution de la température à l'extérieur, dans un bon bâtiment et dans un bâtiment inadapté, en absence de chauffage ou de climatisation des bâtiments.*

Il est possible d'aller plus loin, en utilisant l'énergie solaire de manière plus intensive, notamment à l'aide du stockage saisonnier pour la chaleur et de cellules photovoltaïques pour l'électricité. On peut ainsi réaliser des bâtiments autonomes du point de vue de l'énergie. Plusieurs exemples existent maintenant en Suisse. **Le facteur d'économie est alors infini !**

Il est important de remarquer que ces économies d'énergie ne se font pas au détriment du confort. Bien au contraire :

- Une meilleure isolation thermique permet de diminuer les déperditions de chaleur par l'enveloppe du bâtiment tout en améliorant le confort.
- Un bâtiment propre, étanche à l'air mais muni d'ouvertures ou d'installations de ventilation adéquates, présente une excellente qualité de l'air intérieur. De plus, on évite les courants d'air et on diminue les déperditions de chaleur par aération.
- Un bâtiment conçu en fonction des habitants et du soleil présente un confort optimal et un contact agréable avec l'environnement extérieur. Sa consommation d'énergie est réduite de moitié par rapport à un bâtiment dessiné sans tenir compte du soleil.
- Une installation de chauffage adaptée au bâtiment et munie d'une régulation intelligente

permet d'amener la chaleur au bon moment et au bon endroit. Le confort est donc amélioré, tout en évitant le gaspillage de chaleur.

- Dans notre climat, des protections solaires efficaces et une stratégie d'aération adéquate dans un bâtiment bien conçu permettent d'assurer sans frais un excellent confort d'été.
- Un éclairage bien étudié, faisant la part belle à l'éclairage naturel, permet d'améliorer le confort tout en diminuant la consommation d'électricité.

Nous sommes donc loin de devoir nous priver de confort pour assurer une meilleure gestion de l'énergie dans le bâtiment. À 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 !

## Quelques chiffres

L'effet des mesures d'amélioration thermique des bâtiments dépend fortement de l'état initial du bâtiment, de sa localisation et de ses caractéristiques. Un centimètre d'isolation supplémentaire aura plus d'effet sur un bâtiment non isolé, et l'augmentation de la surface vitrée au sud n'améliorera les gains solaires que dans un bâtiment de construction lourde.

Aussi, afin de donner une idée de l'effet de quelques mesures d'amélioration thermique des bâtiments, considérons un appartement typique de 100 m<sup>2</sup> occupé par 2 adultes et un enfant, situé dans un coin sud-est d'un immeuble locatif à Lausanne. Cet appartement est entre deux autres étages habités, il n'est ni sur les caves ni sous les combles. Les façades sont également réparties entre le Sud et l'Est, et la construction est lourde, sauf pour une variante.

Nous avons considéré plusieurs variantes, dont les besoins en énergie pour le chauffage sont illustrés dans la figure 202. On remarquera l'effet important de l'isolation thermique. entre l'immeuble ancien (années avant 1970) et la variante 3, il y a un facteur presque égal à 9! On diminue encore la consommation de cette variante 3 d'un facteur dépassant 2 en l'orientant principalement au sud (80% des vitrages au sud). La récupération de chaleur sur l'air de ventilation permet presque d'annuler les besoins. La variante 4, munie de la meilleure isolation possible, présente une consommation nulle dans sa variante lourde, mais une construction légère pénalise l'utilisation des gains solaires et augmente donc les besoins en énergie.

*Figure 22 : Indice de dépense d'énergie pour le chauffage d'un appartement typique. Chaque barre représente les besoins en chauffage, la partie claire étant la partie couverte par les gains solaires.*

D'autres grandeurs chiffrant l'effet de diverses mesures que l'on peut prendre sont les suivantes:

Chauffe eau solaire correctement dimensionné et utilisé: 50% de la consommation d'énergie pour le chauffage de l'eau chaude, soit environ 40 MJ/m<sup>2</sup> de plancher chauffé

Chaudière d'excellente qualité plutôt que chaudière respectant juste les limites OPAIR:

économie de 10 à 20% de la consommation de combustible. Par contre, une chaudière surdimensionnée d'un facteur 2 peut gaspiller jusqu'à 40% du combustible (voir figure 16).

Contrôle de l'aération, en la maintenant au niveau nécessaire mais non superflu: l'économie dépend du taux d'aération superflu. On a mesuré une économie potentielle de 20 à 50% de la chaleur nécessaire à conditionner l'air dans des immeubles administratifs européens.

Récupération de chaleur sur l'air extrait: économie pouvant aller jusqu'à 70% de la chaleur nécessaire à conditionner l'air intérieur. Mais attention: pour que la récupération soit efficace, il faut que l'air extrait passe à travers l'échangeur, et donc que le bâtiment soit bien étanche à l'air. On a mesuré des taux de récupération pratiquement nuls dans des installations inadéquates. Dans les meilleurs cas, le taux effectif de récupération peut atteindre 80% du rendement nominal de l'échangeur de chaleur.

Fermeture nocturne des stores ou volets: économie significative (10 à 20% des besoins de

chaleur) pour les vitrages simples, mais moins importante pour les vitrages doubles, et pratiquement négligeable pour les vitrages à haute performance.

Baisse de un degré de la température intérieure: l'économie dépend des caractéristiques du bâtiment. Elle est d'autant plus grande que le bâtiment est mal isolé ou sur-ventilé. Il faut réserver ce genre de mesure aux temps de crise, car elle diminue le confort et augmente les risques de dégâts dus à l'humidité.

Utilisation de lampes économiques: à éclairage équivalent, ces lampes permettent une économie d'un facteur 5 par rapport aux lampes à incandescence.

## Effet du comportement de l'occupant

Le comportement des habitants a une influence majeure sur le confort intérieur et sur la consommation d'énergie. L'habitant peut exercer son influence de plusieurs manières:

- en ouvrant ou fermant les stores ou les volets ;
- en ouvrant et en fermant les ouvertures de ventilation et les fenêtres ;
- en agissant sur les appareils de contrôle des installations techniques ;
- en adaptant sa consommation d'eau à ses besoins ; etc.

L'observation d'ensembles de villas identiques a montré que la consommation varie de 50 % à 150 % de la moyenne suivant le comportement des occupants, donc d'un facteur 3 !

Pour tenir compte de cette dure réalité, il faut concevoir les bâtiments de manière à diminuer l'effet que les occupants peuvent avoir par un comportement inadéquat. Il ne s'agit évidemment pas d'empêcher l'occupant d'agir. Il faut au contraire imaginer les actions possibles de l'occupant et adapter le bâtiment pour limiter l'effet de ces actions. Un exemple classique est la véranda : bien utilisée (c'est-à-dire non chauffée et séparée du logement par une paroi close la plupart du temps), c'est un dispositif de captage solaire efficace, et un lieu souvent nettement plus confortable que l'extérieur. Mal utilisée (donc chauffée en permanence à la température intérieure), c'est un élément de déperdition thermique important. Une véranda munie de vitrages et de cadres à haute isolation thermique est beaucoup moins sensible à cet effet.

Les règles de comportement idéal sont connues et ont été ressassées maintes fois depuis 1973. Il nous semble toutefois utile de les répéter ci-dessous.

**Chauffage** : contrôler la température en hiver à l'aide de thermostats plutôt qu'avec l'ouverture des fenêtres. Suivre la consommation d'énergie. Soigneusement entretenir les installations. Ne pas chauffer les locaux inoccupés qui sont distincts de la zone chauffée.

**Stores et volets** : Les ouvrir pour profiter d'un climat extérieur favorable pour chauffer ou refroidir, fermer lorsque l'on veut s'en protéger par temps trop froid ou trop chaud. Fermer la nuit, afin d'assurer une isolation thermique supplémentaire.

**Fenêtres** : Ouvrir en grand lorsque le climat est clément, ouvrir au minimum par grandes chaleur ou grands froids.

**Aération** : Aérer en permanence pour éliminer les odeurs, les polluants ou la chaleur accumulées dans la structure du bâtiment, mais aérer rapidement pour changer l'air. Aérer pendant et après toute activité polluante (cuisine, fumée, bricolage).

**Eau chaude** : Préférer les douches solaires aux bains ordinaires. Réparer rapidement les robinets qui fuient. Éviter de surchauffer l'eau chaude.

**Éclairage** : utiliser au maximum l'éclairage naturel. Installer des luminaires efficaces. Éviter d'éclairer des locaux inoccupés.

**Électricité** : éviter les consommateurs permanents (appareils en stand-by). À l'achat d'un appareil, consulter l'étiquette énergétique et comparer les consommations.

Le propriétaire peut (et doit) aussi agir, même s'il n'occupe pas son propre logement. Il a intérêt à penser à l'aspect énergétique lors de chaque rénovation ou transformation de son immeuble. Il devrait en particulier demander conseil à un énergéticien compétent lors de modifications de l'enveloppe du bâtiment (isolation thermique, étanchéité à l'air), des interventions sur les installations techniques (changement de chaudière ou de chauffe-eau,

remplacement de pompes et de régulateurs), etc.