Histoire du coefficient k de transmission de chaleur

Autor(en): **Weber, August P.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **111 (1985)**

Heft 25

PDF erstellt am: **25.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-75670

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Histoire du coefficient *k* de transmission de chaleur

par August P. Weber, Zurich

J. W. Goethe und Geringere, die vor uns geschrieben haben – sie rechneten mit einer Nachwelt. Das tut kein Schriftsteller heute, glaube ich, und trotzdem schreiben wir.

Max Frisch

Jusqu'à la crise du pétrole en 1973, le coefficient de transmission de chaleur *k* n'était connu que dans le monde des spécialistes.
Depuis qu'on a pris conscience de l'importance de l'énergie, il en est question non seulement dans les livres et les revues spécialisées, mais aussi lors des innombrables congrès consacrés à l'énergie, séminaires et cours, et même dans les quotidiens!
On parle du *coefficient k* sans jamais évoquer son évolution historique.
Nous nous proposons d'examiner, dans cet article l'histoire de l'équation de base de la technique du chauffage.

$$\dot{Q} = k \cdot S \cdot \Delta t$$

L'équation de base s'est constituée petit à petit, par les observations et les réflexions mathématiques de nombreux savants. Des notions telles que la surface S (exprimée en m²), la différence de température $\Delta t = ti - te$ (exprimée en K) et la puissance thermique Q, sont de nature simple et ne demandent pas de réflexion particulière. Il n'en est pas de même du coefficient *k*.

1. Qu'est-ce que la chaleur?

Le mouvement des molécules et des atomes est aujourd'hui une chose connue, ce qui n'était pas le cas lors de la première mise en équation du coefficient *k*.
Selon les lois de la mécanique, l'énergie cinétique d'une molécule est:

$$E = \frac{m\ V^2}{2}$$

E = énergie cinétique
m = masse
V = vitesse

Selon la théorie des gaz nous pouvons écrire:

$$\frac{m\ V^2}{2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{R}{N} \cdot T$$

R = constante des gaz = $= 8{,}314 \cdot 10^7$ erg/° Mole
N = Nombre du Loschmidt = $= 6{,}025.10^{23}$ Molécules/Mole
T = Température absolue K

R et N étant des constantes, nous pouvons aussi écrire:

Le philosophe I. Kant (1724-1804) a dit: «Il y a dans chaque science autant de vérité qu'il y a de mathématique.»

$$\frac{m \cdot V^2}{2} = \text{const.} \cdot T$$

Cela veut dire que plus la température est élevée, plus V est grand! Cette connaissance importante date du XVIII[e] siècle. Ce n'est qu'à ce moment que la notion du *calorique* a été définie correctement, par R. V. Lomonossow (1711-1765) et par le comte de Rumford (1753-1814). Avant cette époque régnait la théorie du *phlogiston,* qui prenait la chaleur pour une chose matérielle. Il est étonnant de constater combien de temps il aura fallu à l'humanité pour saisir, de façon correcte, la nature de la chaleur, bien que celle-ci soit partout présente. Ni les penseurs grecs, ni les architectes romains ne savaient vraiment ce qu'était la chaleur. Encore aujourd'hui beaucoup de gens instruits ne le savent pas, comme on peut parfois le constater lors de procès!
Voltaire (1694-1778) s'était intéressé non seulement à l'histoire et à la politique, mais aussi à la technique. Au château de la marquise du Châtelet il s'était occupé de la nature de la chaleur. En 1738, l'Académie des sciences fondait un prix pour des recherches sur le thème *Nature et diffusion de la chaleur.* Pour les gagnants de l'époque, un tel prix avait sans doute autant de valeur qu'un prix Nobel actuel. Voltaire arrivait à la conclusion que la chaleur n'a pas de poids. De même il constatait qu'elle se diffuse de façon régulière et dans toutes les directions. Trente ans plus tard naissait Fourier, qui fut le pionnier de la théorie de la conduction de chaleur.
Le chiffre N est immense, à savoir environ 0,6 quadrillions par Mole soit 22,4 l. de gaz en état normal.
Imaginons une bande de papier millimétré d'une longueur égale à la distance qui sépare le soleil de la terre, et mettons dans chaque mm² une molécule; elle devrait avoir 4000 km de largeur!
A la transmission de chaleur participent donc énormément de molécules, tant pour les gaz que pour les corps solides.

2. Loi de refroidissement de Isaac Newton

Les lois régissant le flux de chaleur au travers d'une paroi homogène n'étaient

Isaac Newton (1643-1727)

pas encore connues au XVII[e] siècle. Le physicien et mathématicien anglais Isaac Newton (1643-1727) a écrit en 1701 un traité pour le Royal Society au sujet des températures, dans lequel il développait une formule mathématique pour définir la déperdition de chaleur, par exemple le refroidissement d'une plaque. Elle est connue comme *la loi de refroidissement de Newton.* Dans la littérature, elle est présentée sous différentes formes et pour nos besoins nous l'écrivons de façon suivante:

$\dot{Q} = \alpha \cdot S \cdot (\vartheta - t)$;
α = coefficient de transmission thermique superficielle;
S = surface;
ϑ = température de la surface;
t = température ambiante.

Newton n'était pas en mesure de préciser le coefficient α, puisqu'à l'époque les théories sur le rayonnement et la convection étaient encore inconnues.
Maintenant nous savons que:
α total = α rayonnement + α convection.
C'est au début de notre siècle que les coefficients α ont été déterminés de façon précise.
Newton a cependant trouvé une solution au problème du refroidissement par une autre voie. Il s'agissait de déterminer le temps de refroidissement d'un corps chaud par rapport à la température ambiante. Il développa l'équation différentielle suivante:

$$\vartheta - t = (\vartheta_i - t) \cdot e^{az}$$

avec

ϑ, t = *température*;
z = temps;
$e = 2 \cdot 718$ = base du logarithme naturel;
a = constante de refroidissement.

3. Loi de la conduction de la chaleur de Jean-Baptiste Fourier

Conseiller de Napoléon lors de la conquête de l'Egypte, Jean-Baptiste Fourier (1768-1830), également membre de l'Académie des sciences, composa son traité *Théorie analytique de la chaleur,* dans lequel il formulait pour la première fois une hypothèse quantitative sur la conduction de la chaleur, à savoir:

Jean-Baptiste Fourier (1768-1830)

$$\dot{Q} = \lambda \cdot S \cdot \frac{dt}{dx} \cdot dz$$

avec

λ = coefficient de conduction.

Cette loi dit que la conduction de chaleur dans une paroi est directement proportionnelle à la surface *F*, à la différence de température *dt* et du temps *dz* et inversement proportionnelle à l'épaisseur de la paroi *dx*. Le facteur de proportionnalité est maintenant appelé *coefficient de conduction.*

Cette loi empirique a fait ses preuves et aujourd'hui encore elle est connue sous le nom de loi de la conduction de la chaleur de Fourier.

Pour un flux de chaleur constant et pour une paroi homogène d'une épaisseur *a*, nous pouvons établir:

$$\dot{Q} = \lambda \cdot S \int_{o_i}^{\delta} \frac{1}{dx} \cdot dt = \lambda \cdot \frac{F \cdot \vartheta_i - \vartheta_e}{\delta}$$

selon le théorème de radiation nous avons:

$$\frac{dt}{dx} = tg\beta = \frac{\vartheta_i - \vartheta_e}{\delta}$$

où ϑ_i et ϑ_e sont les températures de surface de la paroi.

Nous pouvons alors écrire:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot S \cdot (\vartheta_i - \vartheta_e)$$

où comme nous l'avons dit, $\dot{Q}$ a été choisi comme valeur constante[1].

Sa présentation simplifiée devient:

$$\frac{d\vartheta}{dz} = \frac{\lambda}{\gamma c} \cdot \frac{d^2\vartheta}{d\,x^2}$$

γ = poids spécifique;
c = chaleur spécifique.

Cette équation est valable pour une plaque, par exemple pour une paroi extérieure. Elle est linéaire et homogène et il faut chercher assez de solutions pour répondre aux conditions posées.

On obtient un premier résultat si on pose:

$\frac{d\vartheta}{dz} = 0 \rightarrow \vartheta = \vartheta_k$ et

$\frac{d^2\vartheta}{d\,x^2} = 0$, d'où l'on obtient $\vartheta = bx + c$

Les solutions zéro déterminent l'état stationaire, c'est-à-dire que:

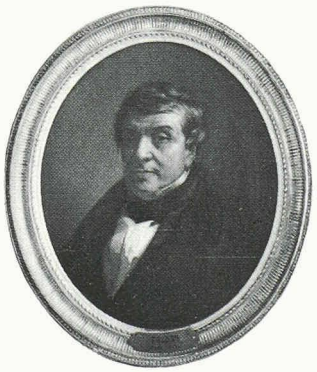
$\dot{Q}$ = constante et $\vartheta = bx + c$ correspond à une droite. Dans ce cas la chute de la température à travers la paroi est constante[2].

L'équation de Fourier joue aujourd'hui un grand rôle dans la science et la technique. Elle est également utilisée pour le traitement de problèmes analogues, par exemple la propagation du son et la diffusion de la vapeur. La loi de A. Fick, basée pour l'essentiel sur la méthode de Fourier joue actuellement un rôle capital, bien qu'elle ait été postulée il y a plus de 100 ans:

$$dG = k \frac{dc}{dx} \cdot ds;$$

k = constante de diffusion;
c = concentration de la vapeur.

4. La loi de Péclet



Jean-Claude-Eugène Péclet (1793-1857)

Le physicien français J. C. E. Péclet était professeur de physique au lycée de Marseille, avant de fonder l'*Ecole des arts et manufacture* à Paris. Dans son *Mémoire sur la détermination des coefficients de conductibilité des métaux par la chaleur,* il a été le premier à formuler l'équation de base de la technique du chauffage.

Nous disposons jusqu'à présent de trois relations pour la valeur $\dot{Q}$:

a) passage de la chaleur du milieu intérieur à la surface intérieure,
$\dot{Q}_1 = \alpha_1 \cdot S \cdot (ti - \vartheta i)$;

b) passage de la chaleur de la surface extérieure au milieu extérieur,
$\dot{Q}_2 = \alpha_e \cdot S \cdot (\vartheta_e - t_e)$;

c) passage de la chaleur au travers de la paroi,
$\dot{Q}_3 = \frac{\lambda}{\delta} \cdot S \cdot (\vartheta_i - \vartheta_e)$;

δ = épaisseur de la paroi.

Pour $\dot{Q}$ = constant, il faut que:
$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 = \dot{Q}_3$.

Par l'addition des trois formules nous voyons que les températures de surface ϑ_i et ϑ_e s'annulent.

Il suit alors la relation bien connue, nommée *Formule de Péclet*:

$$\dot{Q} = \frac{S \cdot (ti - te)}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_e}}$$

Péclet a obtenu par la suite de grands honneurs, il est devenu inspecteur de l'Académie et directeur général des études, ce qui correspondrait chez nous à la fonction de président du Conseil des Ecoles polytechniques. Plus tard, avec l'introduction des constantes sans dimension, Péclet a eu l'honneur de voir son nom donné à une unité:

$$Pe = \frac{w \cdot d}{\alpha} \qquad \text{avec} \qquad a = \frac{\lambda}{\gamma \cdot c}$$

ou

$Pe = Re \cdot Pr.$

5. Formulation de la demande de chaleur

La version définitive de l'équation de base est due à Franz Grashof (1826-1893), pionnier de la construction de machines. Grashof était professeur à la Haute école technique de Karlsruhe et cofondateur du Verein Deutscher Ingenieure VDI (Société des ingénieurs allemands). Dans son manuel *Theoretische Maschinenlehre,* il fut le premier, en 1875, à présenter la formule de Péclet dans la forme que nous utilisons aujourd'hui:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_e}}$$

et d'écrire

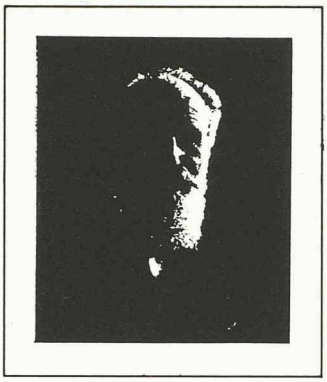
$$\dot{Q} = k \cdot s \cdot (ti - te)$$

qui est l'équation de base de la technique du chauffage. Du temps de Grashof les valeurs de transmission de chaleur n'étaient toujours pas connues. C'est finalement l'ingénieur Hermann Rietschel (1847-1914), qui a donné dans ses

Franz Grashof (1826-1893)

[1] Fourier a formulé sa loi de la conduction de chaleur de façon très générale; je l'ai développée dans la *Technische Rundschau,* Berne, nº 5, 1947.

[2] Les détails ont été exposés dans la *Schweizerische Bauzeitung,* nº 17, 1945.



Hermann Rietschel (1847-1914)

Règles pour la demande de chaleur les valeurs α, qui sont maintenant universellement acceptées.

Les mérites de F. Grashof ont été honorés par la création d'une *médaille Grashof* que la société allemande des ingénieurs attribue à des chercheurs méritants. Il existe aussi un *nombre de Grashof* sans dimension.

$Gr = d^3 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta t / V^2$, qui est utilisé pour les écoulements libres.

L'exposé ci-dessus nous montre que notre équation de base est étayée par des travaux préliminaires de scientifiques célèbres, dont surtout Newton et Fourier. Ces deux savants, mis à part la théorie de chaleur, ont aussi découvert d'autres lois naturelles importantes. Newton, par exemple, a trouvé celle de gravitation et les lois cinématiques. Sans ces dernières, il n'y aurait pas de vols spatiaux! De même il a développé les bases du calcul intégral et différentiel, ce qui était en soi déjà une prestation capitale.

Fourier est encore aujourd'hui connu des mathématiciens; les *séries de Fourier* sont une des importantes branches des sciences mathématiques; Fourier était professeur à l'*Ecole Polytechnique* et en 1798, il avait accompagné, comme on l'a mentionné plus haut, Napoléon en Egypte. C'est lui qui découvrit Jean-François Champollion, considéré comme le déchiffreur des hiéroglyphes. Péclet et Grashof par contre sont pratiquement oubliés aujourd'hui.

6. Le rayonnement et la convection

Pour déterminer les valeurs α on devait être en mesure de connaître l'importance du rayonnement et de la convection. Cependant les lois du rayonnement de la chaleur n'ont fait l'objet de recherches approfondies qu'à la fin du XIXe siècle, spécialement de la part de Ludwig Boltzmann (1844-1906). Il développa, à l'aide de la deuxième loi de la thermodynamique et du processus du cycle de Carnot, l'équation fondamentale:

$\dot{Q}_s = \sigma \cdot T^4$;

T = Température absolue de la surface rayonnante;

σ = constante de rayonnement.

Pour les calculs on utilise les valeurs de rayonnement C, valant pour le corps noir:

$Cs = 10^3 \cdot \sigma = 4{,}96$ kcal/m² $h\,°C^4$ ou maintenant avec les nouvelles unités:

$Cs = 5{,}67$ W/m² $\cdot K^4$.

Ludwig Boltzmann (1844-1906)

Max Planck (1858-1947)

La loi fondamentale du rayonnement est due au physicien berlinois Max Planck (1858-1947).

Elle fut fondamentale pour le développement de la physique, puisqu'elle est à la base de la théorie des quanta. Le *quantum d'activité* de Planck est aujourd'hui en physique aussi important que la constante de Boltzmann ou la vitesse de la lumière. Le transfert de chaleur par convection n'a été étudié de façon approfondie qu'il y a cinquante ans, spécialement pour les parois et les plaques. On se contente aujourd'hui de formules empiriques, par exemple, pour une paroi intérieure:

$\alpha_r = 3{,}26 \cdot \sqrt[4]{i - ti}$;

$\alpha_c = 6{,}2 + 4{,}2\ V$;

V = vitesse du vent.

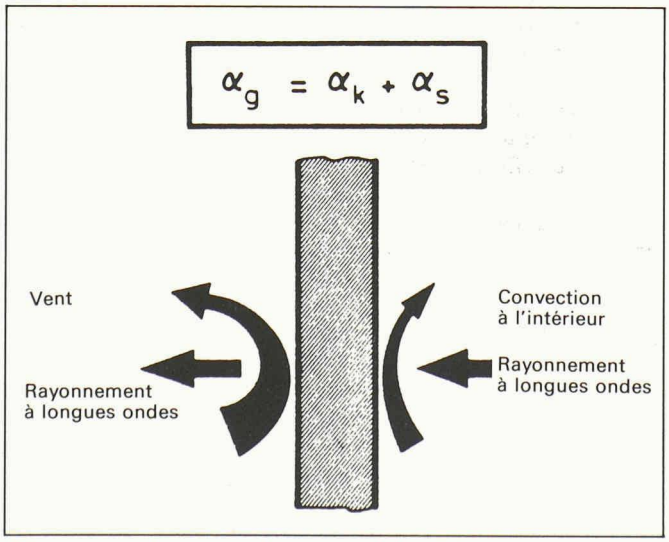
Dans la pratique, on a adopté depuis longtemps:

$\alpha_i = 7$ et $\alpha_e = 20$ (kcal/m² $\cdot h \cdot °C$)

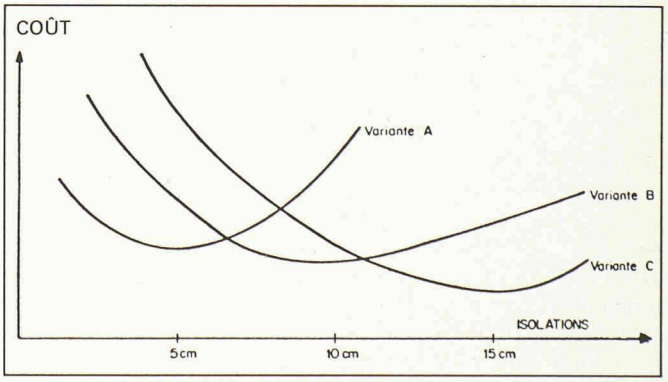
soit donc

$\alpha_i = 8$ et $\alpha_e = 23$ (W/m² $\cdot K$).

En Allemagne, lors de la récente révision des normes DIN 4701, on a essayé de différencier les valeurs pour de nombreux cas particuliers, par exemple pour le chauffage par le plafond ou par le sol.



Présentation schématique du passage de la chaleur par convection et rayonnement.
A l'extérieur: forte convection à cause du vent. Rayonnement à ondes longues relativement faible.
A l'intérieur: les parts de convection et de rayonnement sont sensiblement égales.



Optimalisation du coût de l'isolation pour un prix fixe de l'énergie. L'optimum se trouve, par expérience, selon l'épaisseur de la paroi, entre 5 et 18 cm d'isolation thermique.

$$k\ opt = \sqrt{\frac{\lambda \cdot a \cdot P_l \cdot \eta \cdot 10^6}{24 \cdot DJ \cdot \gamma \cdot Pe \cdot 3{,}6}}$$

λ = *coefficient de conductibilité thermique de l'isolant W/mK*
a = *annuité*
Pl = *coût de l'isolant en (Fr/m³)*
Pe = *coût de l'énergie en (Fr/GJ)*
η = *coefficient de rendement annuel*
DJ = *degré-jours*
$K_{opt} = 0{,}6 \div 0{,}8$ *(selon élément de construction)*

7. La valeur du coefficient *k* moderne

Jusqu'à la crise du pétrole en 1973, l'isolation d'une paroi était choisie en fonction de l'expérience, de l'altitude et du type de la construction.
La plupart du temps, l'architecte choisissait la construction, et le technicien du chauffage déterminait les coefficients *k* résultants. Ceux-ci se situaient en général autour de $1{,}0 < K < 2{,}0$ (kcal/m² · *h* · °*C*).
Après qu'on ait pris conscience de la valeur de l'énergie, on a commencé à parler d'*un coefficient k maximum admissible.*
Par exemple:
k adm. = 0,5 W/m²*K*.
Dans de nombreuses publications le coefficient *k* a été traité comme problème d'optimalisation et de nombreuses formules ont été développées, (Ges. Ing. H. 4, 1982).

Extrait de «Heizung und Klima», nº 3, 1983. — Traduit par H. Leist et O. Barde. Notre sincère gratitude va tant à nos confrères, pour leur autorisation de reprendre cet article, qu'à ses traducteurs.

8. Conclusion

L'importance de l'équation de base du chauffage a progressé ces dernières années, et comme relaté ci-dessus, tout le monde s'en occupe! Dans la situation énergétique actuelle on peut évoquer la balade de Goethe: «Seigneur, que la détresse est grande! Les esprits que j'invoquai, je n'arrive plus maintenant à m'en débarrasser.»
Dans notre cas, les *esprits* sont nos dévoreurs d'énergie, c'est-à-dire les immeubles mal construits, et surtout mal chauffés. Une étude de Plenar, qui analyse la consommation d'énergie de 1300 écoles, démontre qu'il faut 300 l. de mazout et 200 kWh d'électricité par élève et par année.
L'auteur de ces lignes a passé devant un grand magasin un dimanche matin du mois de décembre et a constaté que le rideau d'air fonctionnait et dégageait sans raison de grandes quantités de chaleur dans la nature. Depuis peu l'intelligence est considérée comme «demi-produit», et l'informatique est enseignée dans les hautes écoles. Mais si un grand magasin laisse en fonction un rideau d'air pendant tout un week-end, ce n'est pas uniquement l'intelligence et l'informatique qui font défaut, mais une conscience élémentaire des problèmes d'énergie.
Depuis peu la Suisse a une chaire pour *les systèmes d'énergie* à l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich. C'est le professeur Pierre Suter qui en est chargé. Il est connu comme président de la commission pour l'utilisation de l'énergie solaire. Petit à petit les choses s'améliorent mais le chemin est encore long.

Adresse de l'auteur:
August Paul Weber
Ing. méc. SIA
Case postale 438
8034 Zurich

Le solaire passif: mode passagère ou technique d'avenir?

par André Faist, Lausanne

Dans nos climats, le chauffage des bâtiments représente près de la moitié de la consommation totale d'énergie. Une politique dynamique d'économie d'énergie et d'utilisation des gains solaires pourrait à long terme conduire à une réduction de 15 à 20% de la consommation des bâtiments, sans baisse de confort des habitations. Ceci nécessiterait toutefois un effort soutenu, étendu à l'ensemble du parc immobilier neuf ou existant.

L'utilisation directe des apports solaires pour le chauffage des maisons remonte à fort loin en Suisse: l'architecture traditionnelle fournit en effet de nombreux exemples d'une approche solaire passive. Certains types de fermes aux façades protégées du vent et largement ouvertes vers le sud, des maisons typiques tessinoises aux loggias (vitrées ou non) peintes de couleur foncée, ainsi que des maisons grisonnes aux embrasures de fenêtres biseautées témoignent d'une préoccupation réelle de l'utilisation des gains solaires à des fins de chauffage et d'éclairage. Durant ces quarante dernières années, ces préoccupations ont été souvent oubliées, toutefois différentes analyses (menées en particulier dans le cadre du premier programme d'impulsion de l'Office fédéral des questions conjoncturelles) permettent d'estimer qu'actuellement les gains solaires passifs couvrent environ 10% des besoins bruts en chaleur de l'ensemble du parc immobilier. Ceci n'est pas négligeable puisque cette fraction est équivalente à 850000 tonnes de mazout, soit environ 4% de la consommation brute en énergie de notre pays.
Quel est dans une perspective à moyen et à long terme le potentiel réel du passif en Suisse? Cette approche n'est-elle qu'une mode passagère ou mérite-t-elle un effort soutenu?
Pour répondre à ces questions, nous considérons deux situations distinctes: les constructions neuves et les bâtiments existants.

1. Les constructions neuves

Pour des questions de structure de marché, l'application du solaire passif à l'habitat s'est jusqu'ici essentiellement concentrée au *logement individuel.* Dans ce secteur nous disposons maintenant d'un échantillonnage appréciable, ainsi que d'une série d'analyses détaillées. Celles-ci montrent qu'il est effectivement possible de construire des maisons solaires passives présentant des indices énergétiques globaux compris entre 200 et 400 MJ/m² de surface brute de plancher chauffé et par an. (La moyenne suisse actuelle est de 950 MJ/m² par an.)
Dans ces réalisations la part du solaire passif représente de 40 à 50% des besoins bruts. Les systèmes utilisés peuvent être des gains directs (systèmes de fenêtres), des gains indirects (vérandas, serres...) ou des systèmes hybrides généralement à air.
Une part plus importante des gains solaires peut être atteinte dans certains cas particuliers, elle s'accompagne toutefois d'une infrastructure plus coûteuse (système de stockage).
La réalisation d'*immeubles locatifs* solaires passifs pose quelques problèmes supplémentaires: Quel sera le comportement de l'habitant? Quelle sera sa motivation à obtenir une faible consommation d'énergie?
Les premières réalisations faites en Suisse permettent d'y répondre partiellement: elles montrent que des solutions sont possibles à condition d'être simples, de demander une intervention minimale de l'utilisateur et de lui permettre d'apprécier les économies qu'il réalise (grâce à un comptage individuel de chaleur par exemple). Les systèmes utilisés actuellement sont surtout des gains directs, ainsi que des loggias à double vitrage. Là également des indices de 200 à 400 MJ/m² par an sont atteints. Le problème le plus délicat à résoudre est celui de l'adéquation du système de chauffage auxiliaire et de sa régulation au profil de charge thermique propre à un logement solaire.
L'utilisation du solaire passif, conjugué à des mesures indispensables d'économie d'énergie, peut jouer un rôle important