

chauffage continu locaux
chauffage intermittent locaux
données climatiques
énergie consommée
laboratoire de physique du bâtiment
de l'Université de Liège
ordinateur
programme de calcul

puissance de chauffage
régime thermique intermittent
régime thermique stationnaire
température de locaux

Le calcul des charges thermiques appliquées aux immeubles de logements

par Jean **LEBRUN***

1. - Introduction

On peut distinguer trois types de charges thermiques qui correspondent d'ailleurs à trois grandeurs physiques de dimensions différentes :

- les puissances (de chauffage ou de rafraîchissement) à prévoir pour maintenir constantes les températures intérieures, et ce pour certaines conditions climatiques (chaleurs "sauvages") de référence. La détermination de ce type de charge est l'objet du calcul classique des "déperditions" (en chauffage) et des "gains de chaleur" (en conditionnement d'air).

- les énergies consommées sur certaines périodes (en chauffage et/ou en rafraîchissement). Ces périodes sont couramment de l'ordre de un mois, une saison, ou une année complète.

Avant la crise de 1973-74, on ne s'intéressait que très peu à ce type de charge, sauf peut-être en chauffage électrique.

Pour le reste, il s'agissait uniquement de disposer de quelques ordres de grandeurs permettant de fixer les dimensions des réservoirs de stockage pour les combustibles et d'organiser leur réapprovisionnement systématique. Les degrés-jours de chauffage constituent l'approche traditionnelle dans ce domaine.

* Docteur en sciences appliquées, Maître de Conférences à l'Université de Liège, (Belgique) Laboratoire de Physique du Bâtiment.

ISSN 0035-3159/79/11/695/FF10 © 1979,
Editions Européennes Thermique & Industrie

- les températures "naturelles" des bâtiments, susceptibles d'apparaître par exemple au cours de la saison chaude et en l'absence de climatisation.

Dans ce domaine, il n'existe pratiquement aucun outil de calcul effectivement exploité par les concepteurs et architectes, sauf peut-être la méthode harmonique proposée depuis une dizaine d'années par l'I.H.V.E. [1] [2] [3].

On peut dire que la plupart des bâtiments conçus et réalisés un peu partout dans le monde n'ont fait l'objet d'aucune vérification sur ce point (pas même pour décider d'y installer ou non des équipements de rafraîchissement).

A ces trois types de charges doivent correspondre des différences sur les hypothèses de calcul, la méthode de résolution, et les données choisies.

Et encore faut-il aussi préciser à quel niveau de connaissance se situe le calcul :

1) Au niveau de *l'avant projet*, les caractéristiques physiques du bâtiment ne sont qu'esquissées et provisoires, on ignore encore presque tout des équipements et l'utilisation ultérieure du bâtiment est encore vague ou multiple.

2) Même au niveau de *l'étude* proprement dite, les caractéristiques de certains composants et l'utilisation du bâtiment restent souvent imprécises ou libres d'adaptations ultérieures.

3) Enfin, le *monitoring* sur une certaine période d'exploitation permet un tout autre type de calcul avec généralement une caractérisation plus globale du bâtiment et de ses équipements. Dans la même catégorie de problème, on peut ranger le diagnostic d'un

bâtiment en vue de son *retrofitting* (amélioration de l'isolation, de l'étanchéité, du rendement des équipements etc.).

Dans tous les cas cependant, le calcul débouche sur une prévision à plus ou moins long terme et affectée d'incertitudes inéluctables : on manque toujours de données, ne fut-ce qu'en raison du caractère nécessairement aléatoire de la vie du bâtiment et du climat qui lui est imposé. . .

Les méthodes de calcul *classiques* (déperditions, gains de chaleur, degrés-jours et même admittances) ne procèdent que par comparaison (avec des bâtiments connus) c'est-à-dire que ces méthodes n'offrent aucune garantie de précision absolue, et sont d'autant moins fiables que l'on s'écarte davantage de la construction traditionnelle (par exemple en améliorant l'isolation, l'étanchéité, l'orientation des bâtiments, etc.).

Depuis une trentaine d'années déjà, des méthodes plus élaborées ont été mises au point pour déterminer les *charges de rafraîchissement* (en conditionnement d'air).

Il s'agissait en effet, non seulement d'intégrer plus finement les apports solaires et les gains de chaleur internes (éclairage, occupation, etc.), mais aussi de tenir compte d'un certain amortissement de ces charges par les parois externes et internes du bâtiment.

De très importants programmes de calcul d'ordinateur ont été mis au point à cet effet avec, pour certains d'entre eux, simulation des équipements et des caractéristiques de la régulation. Le calcul dynamique est en effet très vite apparu comme indispensables dans ce domaine, afin d'éviter un coûteux surdimensionnement des installations de conditionnement d'air.

Depuis 1973-74 le besoin s'est fait sentir de développer de nouveaux outils de calculs permettant de déterminer les trois types de charges dans différents bâtiments.

Mais comme nous allons le voir, il ne suffit pas à cet effet de chercher à étendre le domaine d'application des anciens programmes utilisés en conditionnement d'air. D'ailleurs certaines réponses peuvent être obtenues par l'analyse classique de systèmes linéaires simples et ne justifient donc pas l'exploitation systématiques de programmes sophistiqués. . .

2. - Bilan thermique du bâtiment en régime stationnaire

Le bilan sur m locaux d'une zone ou d'un bâtiment, comprenant un total de n ambiances (c'est-à-dire $n-m$ ambiances extérieures à la zone considérée) peut se mettre sous la forme matricielle :

$$\mathcal{U}'_i \times \mathcal{T}_i = \mathcal{Z}_i + \mathcal{U}'_0 \times \mathcal{T}_0 + \mathcal{Z}_0, \quad (1)$$

avec

$$\mathcal{U}'_i = \begin{bmatrix} U'_{11} - U'_{12} \dots - U'_{1m} \\ - U'_{21} U_2 & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ - U'_{m1} \dots & U'_m \end{bmatrix}, \quad \text{matrice des perméances internes ;}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} U'_{jk} = A_{jk} U_{jk} + C_{kj}, \quad \text{perméance du local } j \text{ vers le local } k ; \\ U'_j = \sum_{k=1}^n U'_{jk}, \quad \text{perméances globale du local } j, \end{array} \right.$$

A_{jk} = aire de la paroi séparant le local j du local k ;

U_{jk} = coefficient de transmission moyen de la paroi (j, k) ;

C_{jk} = débit capacitif de ventilation allant de k vers j . (*uniquement positif*).

N.B.

1) Si les circulations d'air sont orientées, $C_{kj} \neq C_{jk}$ et la matrice \mathcal{U}'_i n'est pas symétrique.

2) U'_j englobe les perméances éventuelles qui relient le local j aux ($n - m$) ambiances extérieures à la zone considérée.

$$\mathcal{T}_i = \begin{bmatrix} t_{i1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ t_{im} \end{bmatrix} \quad \text{vecteurs des températures intérieures,}$$

$$\mathcal{Z}_i = \begin{bmatrix} q_{i1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ q_{im} \end{bmatrix} \quad \text{vecteur des flux de chaleur dégagés dans les différents locaux ;}$$

$$(q_i)_j = (q_{sol})_j + (q_{occ})_j + (q)_j ;$$

$(q_{sol})_j$ = flux solaire reçu dans le local j au travers des fenêtres ;

$(q_{occ})_j$ = flux d'occupation (métabolisme des occupants, éclairage, etc.) ;

$(q)_j$ = flux de climatisation ;

$$\mathcal{U}'_0 = \begin{bmatrix} U'_{1(m+1)} \dots & U'_{1n} \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ U'_{m(m+1)} & \dots & U'_{mn} \end{bmatrix} \quad \text{matrice de perméances externes ;}$$

$$\mathcal{T}_0 = \begin{bmatrix} t_{0(m+1)} \\ \vdots \\ t_{0n} \end{bmatrix} \quad \text{vecteur des températures d'ambiances extérieures ;}$$

$$\mathcal{Q}_0 = \begin{bmatrix} q_{01} \\ \vdots \\ q_{0m} \end{bmatrix} \quad \text{vecteur des flux radiatifs (solaires et infrarouges) transmis au travers des parois opaques externes des différents locaux.}$$

Avec pour toute paroi (j, k) :

$$(q_0)_j = U_{jk} \times \sum_l \alpha_l r_{ol} q_{jk}$$

α_l = facteur d'absorption de la couche l de la paroi (j, k) ;

r_{ol} = résistance de transfert de la couche l à l'ambiance extérieure ;

q_{jk} = rayonnement (solaire et/ou infrarouge) incident à la paroi (j, k) .

Sans climatisation ni charge intérieure, le bilan (1) s'écrit :

$$U' \mathcal{T}_{sc} = \mathcal{Q}_{sol} + U'_0 \mathcal{T}_0 + \mathcal{Q}_0, \quad (1')$$

et en soustrayant (1) et (1') membre à membre,

$$U' (\mathcal{T}_i - \mathcal{T}_{sc}) = \mathcal{Q} + \mathcal{Q}_{occ}, \quad (2)$$

avec

$$\mathcal{T}_{sc} = \begin{bmatrix} t_{sc1} \\ \vdots \\ t_{scm} \end{bmatrix} \quad \text{températures sans climatisation des différents locaux ;}$$

et en vertu de (1') :

$$\mathcal{T}_{sc} = U'^{-1} (\mathcal{Q}_{sol} + U'_0 \mathcal{T}_0 + \mathcal{Q}_0)$$

l'équation (2) peut aussi être mise sous la forme :

$$\begin{aligned} \mathcal{Q} &= U'_i (\mathcal{T}_i - \mathcal{T}_{sc}) - \mathcal{Q}_{occ} \\ &= U'_i (\mathcal{T}_i - U'^{-1} \mathcal{Q}_{occ} - \mathcal{T}_{sc}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\mathcal{Q} = U'_i (\mathcal{T}_{NC} - \mathcal{T}_{sc})$$

$$\text{avec } \mathcal{T}_{NC} = \mathcal{T}_i - U'^{-1} \mathcal{Q}_{occ}$$

$$= \begin{bmatrix} t_{NC1} \\ \vdots \\ t_{NCm} \end{bmatrix} \quad \text{températures de non climatisation ;}$$

Cela veut dire en vertu de l'équation (3), que si ces niveaux de températures sont réalisés sous l'effet des apports solaires, la climatisation devient inutile.

Dans ce formalisme, on a donc reporté l'effet du soleil (et du rayonnement atmosphérique) sur les températures extérieures, alors que l'effet des charges internes est déduit des températures intérieures à réaliser. On regroupe ainsi d'une part les *effets climatiques* et d'autre part ceux qui sont *liés à l'utilisation* du bâtiment ; les premiers varient selon la saison alors que les seconds sont plus ou moins constants ou cours de l'année. Mais chacun de ces groupements est pondéré par les caractéristiques du bâtiment.

On peut évidemment ramener ces équations à la forme scalaire, en traitant chaque local séparément ou même en résolvant le bilan sur l'ensemble d'un bâtiment, ce qui revient à additionner membre à membre toutes les équations constituant le système (1) :

$$U'_0 \times t_i = q_i + U'_0 \times t_0 + q_0,$$

avec, par définition,

$$U'_0 = \sum_{j=1}^m (U'_0)_j, \quad U'_{0j} = \sum_{k=m+1}^n U'_{jk},$$

et, en l'absence de circulation orientée de l'air entre locaux,

$$t_i = \frac{\sum_{j=1}^m U'_{0j} (t_0)_j}{U'_0},$$

(t_0 est éventuellement aussi une moyenne pondérée si tous les locaux ne communiquent pas directement avec l'air extérieur ou si celui-ci n'est pas considéré comme isotherme tout autour du bâtiment) ;

$$q_i = \sum_{j=1}^m (q_i)_j, \quad q_0 = \sum_{j=1}^m (q_0)_j.$$

En calcul classique des déperditions, on suppose que

$$q_{occ} = q_{sol} = q_0 = 0,$$

et il reste :

$$q = U'_0 (\bar{t}_i - t_0) \quad (4)$$

puissance, de chauffage nécessaire pour réaliser les conditions nominales t_i et t_0

Pour calculer l'énergie consommée sur une certaine période de chauffage, on peut intégrer le système (3) :

$$\int_0^T q d\tau = \int_0^T U'_0 (t_{NC} - t_{sc}) d\tau, \quad (5)$$

avec

$$t_{NC} = t_i - U'^{-1} \times q_{occ}$$

$$t_{sc} = t_0 + U'^{-1} \times (q_{sol} + q_0)$$

et on peut aussi poser :

$$U'^{-1} \times (q_{\text{sol}} + q_0) = R \times \frac{I_{th}}{I_{th_s}}$$

avec

I_{th} = rayonnement solaire total mesuré au niveau d'une surface horizontale.

$I_{th_s} = I_{th}$ par ciel serein.

R = coefficient de "récupération" du rayonnement solaire par le bâtiment [4].

On pourrait en principe aussi utiliser les mêmes équations pour calculer le troisième type de charge, c'est-à-dire les *températures naturelles* du bâtiment, mais ici, l'approximation stationnaire n'est plus suffisante, comme nous le verrons plus loin. . .

3. - Régimes transitoires

Le bâtiment n'est jamais en régime stationnaire, mais les calculs précédents se révèlent néanmoins assez précis, tant que l'on peut ramener toutes les variables à des moyennes temporelles sur une période suffisamment étendue. Cela veut dire que l'on assimile le système à un filtre "passe-bas" dont la fréquence de coupure correspond précisément à l'inverse de cette période.

Dans les méthodes classiques de déperdition et consommation, on raisonne sur des *moyennes journalières*. Cette approximation est relativement bonne en raison du fait que la constante de temps du bâtiment (assimilé à un système du premier ordre) est le plus souvent de l'ordre de un ou deux jours et que l'on ne désire pas connaître les consommations sur des périodes inférieures à quelques dizaines de jours.

Tant qu'on en reste au calcul statique, il est illusoire de pousser plus loin la finesse de discrétisation temporelle et de passer par exemple à un bilan heure par heure ; ceci revient en effet à attribuer au bâtiment une constante de temps toujours bien inférieure à la réalité. De toute façon, l'intégration de l'équation (5) en "mise-à-jour" (avec inversion des flux) pourrait conduire à des erreurs importantes en raison de l'irréversibilité de la climatisation (à moins que le bâtiment ne soit pourvu d'un stockage à long terme).

Dans la méthode des "degrés-jours" l'équation (5) est remplacée par une somme discrète sur des moyennes journalières. A condition de définir correctement les températures t_{NC} et t_{sc} , on arrive ainsi à évaluer à quelques % près la consommation de chauffage continu sur une année-type (cf. § 5.3).

Outre le dimensionnement des installations de rafraîchissement, certains calculs de charges imposent la prise en compte de régimes transitoires :

1) Variations de températures intérieures au cours d'une vague de froid, lorsque la capacité de l'installation de chauffage est dépassée ;

2) puissance requise et consommation d'énergie en chauffage intermittent ;

3) températures intérieures en été (sans climatisation).

Au système algébrique (1) on devrait, en principe, substituer un système d'équations aux dérivées partielles représentant le comportement dynamique de chacune des couches qui constituent l'ensemble des parois du bâtiment. La résolution *analytique* de ce problème est absolument impraticable à moins de recourir à une schématisation très simplifiée du bâtiment et des sollicitations. La résolution par voie *numérique* est par contre très accessible, au moyen d'un programme d'ordinateur.

On peut distinguer deux types de méthodes numériques très largement utilisés :

- les *différences finies* qui, par discrétisations spatio-temporelles permettent de revenir à un système d'équations algébriques (autant que l'on distingue de sous-couches élémentaires dans les bâtiment) résolues pas à pas sur de petits intervalles de temps ;

- la *convolution* qui consiste à calculer la réponse du système en superposant les réponses à des signaux simples, qui, juxtaposés dans le temps, reproduisent au mieux les sollicitations réelles.

Les différences finies conviennent surtout pour des analyses approfondies de petits bâtiments, sur des périodes climatiques restreintes. La convolution permet de passer économiquement à des systèmes relativement complexes et de les analyser sur de très longues périodes. En général les signaux élémentaires sont des rectangles (cf. § 5.1) ou des triangles [5] [6] [7] [8] [9], étalés sur une base temporelle de une heure. Les *facteurs de réponses* sont calculés une seule fois, pour des signaux d'amplitude unitaire (températures et densités de flux appliqués de part et d'autre des différentes parois).

Ce sont pratiquement les mêmes hypothèses, et donc aussi le même modèle physique de base, qui sous-tendent la plupart des programmes de calcul actuellement disponibles.

Les principales différences portent sur le traitement informatique et sur les performances accessibles (simulation de bâtiments plus ou moins étendus ; avec ou sans leurs équipements, prise en compte d'infiltrations d'air, etc.).

Mais, sans entrer dans plus de détail, on peut dire que ces programmes sont beaucoup trop "déterministes" par rapport à la pauvreté de définition physique des problèmes à traiter : on arrive rarement à un niveau de connaissance du problème qui permette de choisir ou de vérifier tous les paramètres intervenant dans le calcul.

Un avant-projet peut être orienté au moyen de sollicitations très stylisées, par exemple des sinusoides pures (les fondamentales des variations réelles supposées périodiques) :

Le système (1) reste toujours d'application pour le calcul des moyennes journalières. Il s'y ajoute un système d'équations vectorielles correspondant aux oscillations sinusoïdales autour de ces moyennes et si, en première approche, on néglige même les déphasages, le nouveau système peut être réduit à la forme scalaire :

$$\tilde{U}_i \tilde{\Theta}_i = \tilde{Q}_i + \tilde{U}_0 \tilde{\Theta}_0 + \tilde{Q}_0 - \tilde{Q}_a,$$

portant sur les amplitudes (\sim) d'oscillation des températures et des flux, avec :

\mathcal{U}' et \mathcal{U}'_0 , matrices des perméances alternatives ;

$$\tilde{Q}_a = \begin{bmatrix} \tilde{q}_{a_1} \\ \vdots \\ \tilde{q}_{a_m} \end{bmatrix}$$

$$(\tilde{q}_a)_j = \tilde{A}_j(t_{ij})$$

\tilde{A}_i = admittance du local j ,

$$= \sum_k [A_{jk} \tilde{A}_{jk} + C_{kj}].$$

Remarque — En réalité la plupart des parois opaques du bâtiment imposent des déphasages et atténuations tels que l'on peut tout simplement négliger les perméances alternatives qui leur correspondent.

D'autre part, pour les cloisons légères, les vitrages et la ventilation, on peut assimiler des transmittances alternatives aux transmittances continues. . .

Ce formalisme permet d'évaluer très rapidement la réponse dynamique d'une paroi, d'un local, ou d'un bâtiment :

$$\tilde{q}_{\text{sol}} + \tilde{q}_{\text{occ}} + \tilde{q} + \tilde{U}' t_0 + \tilde{q}_0 = \tilde{A} \cdot \tilde{t}_i. \quad (1)$$

On peut ainsi directement mesurer l'effet utile de toutes les parois, c'est-à-dire voir comment leurs admittances cumulées permettent de réduire l'amplitude de température interne, pour une certaine amplitude du flux de chaleur total imposé au bâtiment.

Cette méthode a été conçue pour évaluer le troisième type de charge mentionné précédemment, c'est-à-dire la température maximale atteinte dans un local non climatisé [2] [10].

On peut aussi en tirer une estimation grossière de la puissance de climatisation maximale à prévoir, selon l'oscillation de température intérieure qui est tolérée, et inversement [1].

On arrive même à définir ainsi un ordre de grandeur de l'économie d'énergie réalisable en chauffage intermittent [11] [12].

Dans ces différentes d'applications, l'effet d'amortissement dû à l'inertie du bâtiment peut être mesuré par le rapport :

$$U'_0 / \tilde{A}_\tau < 1.$$

L'abaissement de ce paramètre architectural correspond à une augmentation de l'inertie (intérieure), donc est favorable à la stabilité des températures sans climatisation, mais défavorable au chauffage intermittent. Le concepteur peut ainsi mesurer les effets utiles de ces options architecturales au cours d'un avant-projet, pour autant qu'on lui fournisse des valeurs numériques ou des informations simples sur les admittances de tous les composants du bâtiment [10].

Les principales limitations de la méthode des admittances proviennent de ce que les charges réelles ne sont évidemment jamais sinusoïdales, ni même périodiques, et de ce que les déphasages ne sont pas non plus négligeables (on pourrait, bien sûr, dans certains cas, repasser au calcul vectoriel et même à l'analyse harmonique. . .).

Une approche similaire et qui permet aussi de bien caractériser le bâtiment est la méthode des absorbances : on y considère la réponse en température intérieure $(\Delta t_i)_\tau$ à un échelon de flux intérieur Δq_i ,

$$\Delta q_i = A_\tau (\Delta t_i)_\tau, \quad (7)$$

(pour un local ou l'ensemble du bâtiment)

A_τ = adsorbance du local ou du bâtiment,

= \sum des absorbances de tous les composants ;

$(\Delta t_i)_\tau$ = élévation de température au bout d'un temps τ après application de l'échelon.

NB. Si l'on décompose les sollicitations réelles en échelons élémentaires, la juxtaposition de ceux-ci revient à appliquer la méthode de *convolution*.

Telle quelle, la méthode des absorbances est très complémentaire à celles des admittances.

En effet, alors que l'analyse sinusoïdale peut être suffisante pour l'avant-projet, les sollicitations du type "échelon" sont plus appropriées à la caractérisation expérimentale ou théorique d'un bâtiment : la réponse à un échelon fait apparaître très directement la ou les constantes de temps du système.

Ainsi, dans le cas de l'approximation du premier ordre, on peut poser :

$$A_\tau = \frac{U'_0}{1 - e^{-\tau/\tau_0}}$$

avec

τ_0 = constante de temps du local ou du bâtiment,

$$= \frac{U'}{C}$$

$$C = \sum_j C_j \theta_j,$$

C_j et θ_j capacités et échauffements relatifs stationnaires des différentes couches constituent les parois.

$$\theta_j = \frac{R_j}{R},$$

R_j résistance reliant la couche j à l'ambiance extérieure,
 R résistance globale de la paroi dans laquelle la couche j est incluse [13] [14].

Cette approche très simple est utilisable aussi bien au niveau d'un avant-projet que pour "filtrer" les résultats d'un monitoring :

— dans le premier cas, on pourra par exemple évaluer l'effet utile d'une intermittence de chauffage avec plus de précision que par la méthode des admittances ;

— dans le second cas, on peut exploiter le premier ordre par convolution ou par différences finies. Bien entendu, si la richesse des données théoriques ou expérimentales le justifie, on passera éventuellement à un modèle d'ordre supérieure ; celui-ci pourrait d'ailleurs être généré par un programme d'ordinateur plus sophistiqué. . .

4. — Principales causes d'incertitudes dans les calculs

Ce sont en premier lieu, les caractéristiques du bâtiment et son utilisation (comportement des occupants) qui limitent la précision des calculs. Mais il subsiste d'autres incertitudes physiques, même dans les programmes de calcul les plus sophistiqués.

1) Certaines données climatiques sont encore mal définies : ce sont notamment le rayonnement solaire diffus, le rayonnement infrarouge échangé avec la voûte céleste et surtout le vent [15].

2) Mais les effets de site ajoutent encore à ces incertitudes, surtout en ce qui concerne le vent, fortement altéré par la rugosité du sol et des obstacles environnant le bâtiment [15] [16].

3) Même si le microclimat extérieur est connu, son effet sur l'enveloppe du bâtiment n'est pas facile à décrire : variations des coefficients d'échanges convectifs et surtout des pressions dynamiques correspondantes [17] [18].

4) Enfin, partant de ces conditions aux limites extérieures, on ne peut encore calculer que très grossièrement les échanges intérieurs correspondants : convection entre surfaces intérieures et infiltrations d'air [19] [20].

Actuellement, c'est sans doute la perte par infiltration d'air qui est la plus incertaine dans le bilan thermique du bâtiment : ce terme cumule en effet les quatre niveaux d'incertitudes mentionnés ci-dessus : climat, microclimat, pression sur l'enveloppe, étanchéité et circulation d'air correspondante. . .

5. — Développements récents

5.1. — Adaptation des moyens de calcul et ajustements expérimentaux

Le développement actuel des systèmes informatiques interactifs donne l'avantage à l'exploitation de petits

programmes très spécialisés plutôt que d'un programme "géant" théoriquement susceptible de traiter tous les problèmes. Plusieurs approches très complémentaires sont disponibles au Laboratoire de Physique du Bâtiment (L.P.B.) de l'Université de Liège :

— le programme "étalon" LPB-1 traite par convolution sur signaux rectangulaires tous les locaux d'un bâtiment complet, sans limitation quant à l'organisation de celui-ci et quand à la durée de la période climatique (version Fortran, IBM 370) [21].

— Le programme "conversationnel" LPB-2 traite par différences finies implicites, un seul local sur des périodes ne dépassant pas quelques journées (version Basic, Tektronix 4051) [21] [22].

— Le programme LPB-3 permet de calculer en moyenne journalière, le coefficient de récupération au rayonnement solaire d'un seul local ou d'un bâtiment pris globalement. En passant par les degrés-jours équivalents, on évalue ainsi très simplement la consommation d'énergie de chauffage sur une période donnée. Utilisé initialement en Fortran sur IBM 370, puis en Basic sur Tektronix 4051, le programme a même pu être réduit à la taille d'une calculatrice programmable HP-97 [4] [21].

— Une généralisation de la méthode précédente a été tentée sous la forme du programme LPB-4. Celui-ci effectue le même calcul (en régime stationnaire) sur tous les locaux (chauffés ou non), qui constituent le bâtiment. Ceci revient, en fait, à résoudre directement l'équation matricielle (1) (version BASIC, Tektronix 4051) [23].

— D'autres programmes spéciaux sont encore à l'étude, notamment pour évaluer les charges en régime harmonique (calcul vectoriel sur les admittances) et pour exploiter par convolution des modèles simplifiés globaux du premier ou du second ordre.

En principe, n'importe quel calcul de charge est réalisable avec LPB-1, y compris la simulation d'un système de climatisation complet. Mais, pour autant qu'ils soient bien choisis en fonction du problème à traiter, les autres programmes sont plus efficaces, plus économiques et plus fiables aussi car le nombre de paramètres y est fortement réduit (donc aussi le risque d'erreur à l'introduction des données et à l'interprétation des résultats). . .

Les nombreux essais réalisés sur différents systèmes de chauffage en chambre climatique permettent un certain réajustement du modèle de calcul classique des échanges intérieurs :

— En régime stationnaire déjà, on a pu définir les températures de références et coefficient d'échanges significatifs pour différentes parois et différents modes de chauffage [24] [25].

Mais, même en séparant la convection du rayonnement, la représentation reste conventionnelle et ne tient pas compte de l'anisothermie de l'air intérieur.

— En régime transitoire, on sous-estime ainsi la constante de temps intérieure. Pour retrouver celle-ci sans encore recourir à un modèle plus complexe des échanges convectifs, il semble que l'on puisse affecter la capacité de l'air intérieur d'un facteur multiplicatif de l'ordre de 4 à 6 selon le système de chauffage [14] [21].

D'autres études expérimentales sont encore nécessaires pour améliorer la précision des calculs. Les essais en chambre climatique n'ont permis que d'analyser les échanges intérieurs, à la faveur de conditions aux limites extérieures très strictement définies.

Pour mieux définir les relations avec le climat extérieur, il faut évidemment passer à des essais "in situ" sur "bâtiments réels et sur modèles simplifiés où les conditions intérieures sont plus rigoureusement définies. . .

5.2. — Sélection des données climatiques

Tout comme le choix des outils de calculs, la sélection des données climatiques dépend du type de charge considéré (et du niveau de connaissance générale : cf. § 1).

1) Pour calculer la puissance de chauffage maximale requise et donc dimensionner les équipements, le calcul classique des déperditions fait usage d'une journée de référence. On considère par exemple la température moyenne journalière qui risque d'être atteinte ou dépassée un jour par an.

Bien entendu, une approche plus rationnelle de ce problème pourrait être réalisée par calcul dynamique sur une "vague de froid" réelle. On calculerait ainsi l'évolution de la température intérieure et donc le risque d'inconfort correspondant à chaque puissance disponible.

2) Pour calculer les consommations d'énergie d'un système de chauffage on peut recourir à des périodes-types présentant une évolution séquentielle réelle des données climatiques considérées. La longueur de ces séquences doit en principe dépasser la constante de temps du système étudié, mais cette condition n'est pas toujours critique.

Pour la plupart des problèmes qui se posent actuellement, l'utilisation d'une année composite, constituée de 12 mois-types semble très suffisante.

On peut sélectionner ces 12 mois selon une statistique à plusieurs variables : chacun des mois retenus est celui qui restitue le mieux à la fois les moyennes et variances (éventuellement aussi les corrélations sérielles) sur les variables climatiques significatives : température, rayonnement solaire, vent et humidité [26].

Mais pour alléger le calcul on peut aussi, dans bien des cas, se contenter d'une sélection réduite à 36 journées moyennes, soit 3 par mois, correspondent respectivement à trois niveaux d'ensoleillement relatif (clarté du ciel) [27].

Pour restituer l'année complète, il suffit d'attribuer à chacune de ces journées un poids qui corresponde à sa fréquence moyenne d'apparition. . .

3) Ces journées moyennes peuvent aussi suffire pour une approche purement comparative sur les risques de surchauffe du bâtiment en été. Dans certains cas jugés critiques, on pourra aussi recourir à la vérification sur une "vague de chaleur réelle". . .

5.3. — Exemples de calcul des consommations d'énergie de chauffage

On dispose déjà actuellement de nombreux exemples de calcul des besoins de chauffage pour des maisons unifamiliales conventionnelles [21].

Pour faciliter la comparaison entre différentes approches et aussi pour caractériser l'effet des apports solaires on peut (mois par mois) calculer une moyenne fictive de la température sans chauffage :

$$\bar{t}_{sc} = \bar{t}_{NC} - \frac{\bar{q}}{U'_0}$$

avec \bar{q} = puissance moyenne de chauffage requise au cours du mois.

Ainsi, la figure 1, permet de comparer, dans le cas d'une petite maison très légère, sans charge interne ($t_i = t_{NC} = 20^\circ\text{C}$), les résultats du calcul dynamique (LPB-1) et du calcul statique en moyenne journalière (LPB-3) sur 12 mois-types. On constate que le calcul dynamique ne fait pratiquement rien gagner en précision (quelques % au plus) mais qu'il était essentiel de tenir compte de l'apport solaire pour définir les besoins de chauffage :

$$\delta_1 = t_{SC} - t_0 = 2,6 \text{ K}$$

sur l'ensemble de la saison de chauffe, avec

$$\bar{t}_0 = \bar{t}_i - \frac{\bar{q} \text{ sans soleil}}{U'_0} = 10,6^\circ\text{C},$$

c'est-à-dire que les apports couvrent ici plus de 25 % des besoins de chauffage. . .

La figure 2 permet de comparer les résultats obtenus par LPB-1, respectivement avec les 12 mois-types et avec seulement 36 journées moyennes pondérées. Il s'agit d'une maison assez semblable à la précédente, mais plus lourde (hypothèse plus défavorable pour cette comparaison) et légèrement plus sensible au soleil. Ici, non plus, les écarts ne dépassent pas quelques % et la sélection "réduite" est donc bien suffisante.

Enfin, la figure 3 donne une idée de l'importance relativement croissante des apports gratuits, au fur et à mesure que l'on améliore l'isolation du bâtiment.

On a considéré 3 hypothèses d'isolation des parois opaques :

$$U'_0 = 350,301 \text{ et } 276 \text{ WK}^{-1};$$

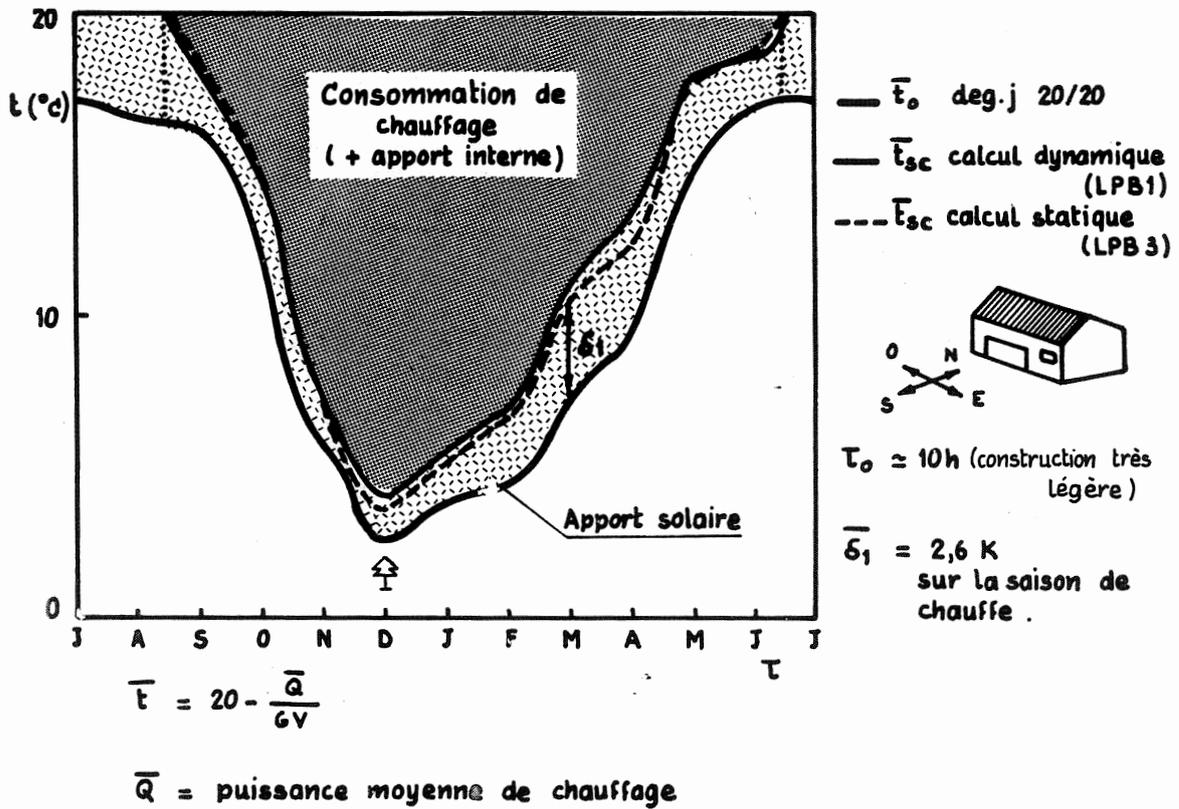


Fig. 1. — Moyenne fictive de la température sans chauffage. Comparaison du calcul dynamique (LPB 1) et du calcul statique en moyenne journalière sur 12 mois-types (LPB 3)

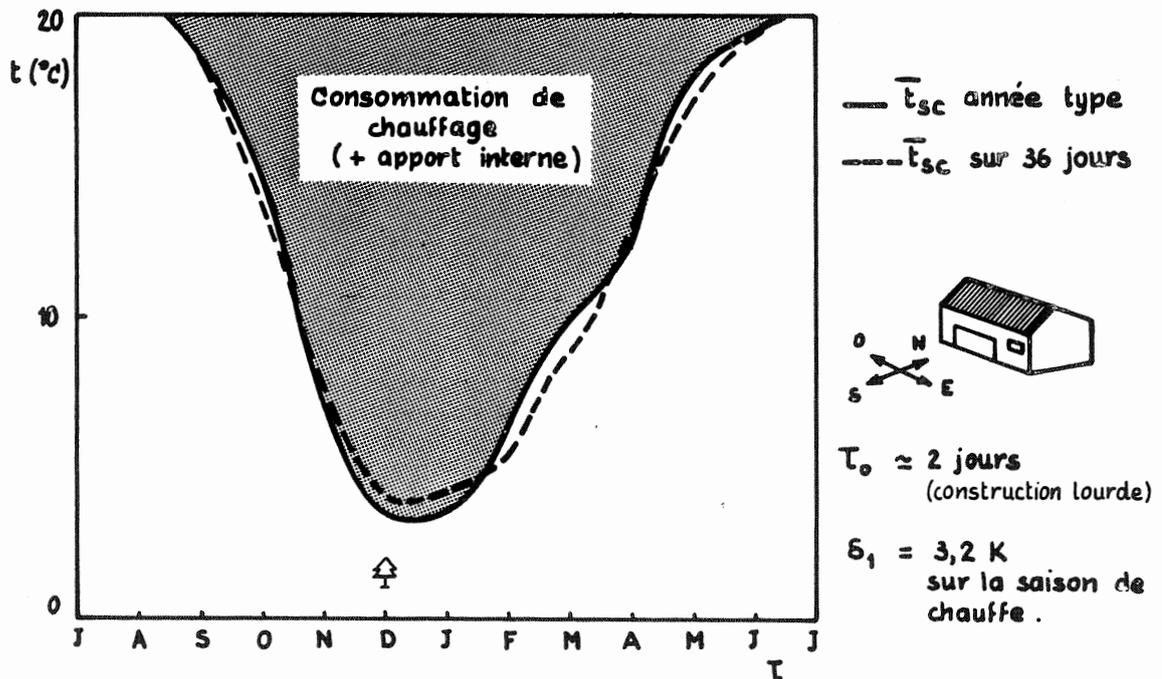


Fig. 2. — Moyenne fictive de la température sans chauffage. Comparaison du calcul sur l'année-type (LPB 1) avec les 12 mois-types et avec seulement 36 journées moyennes pondérées

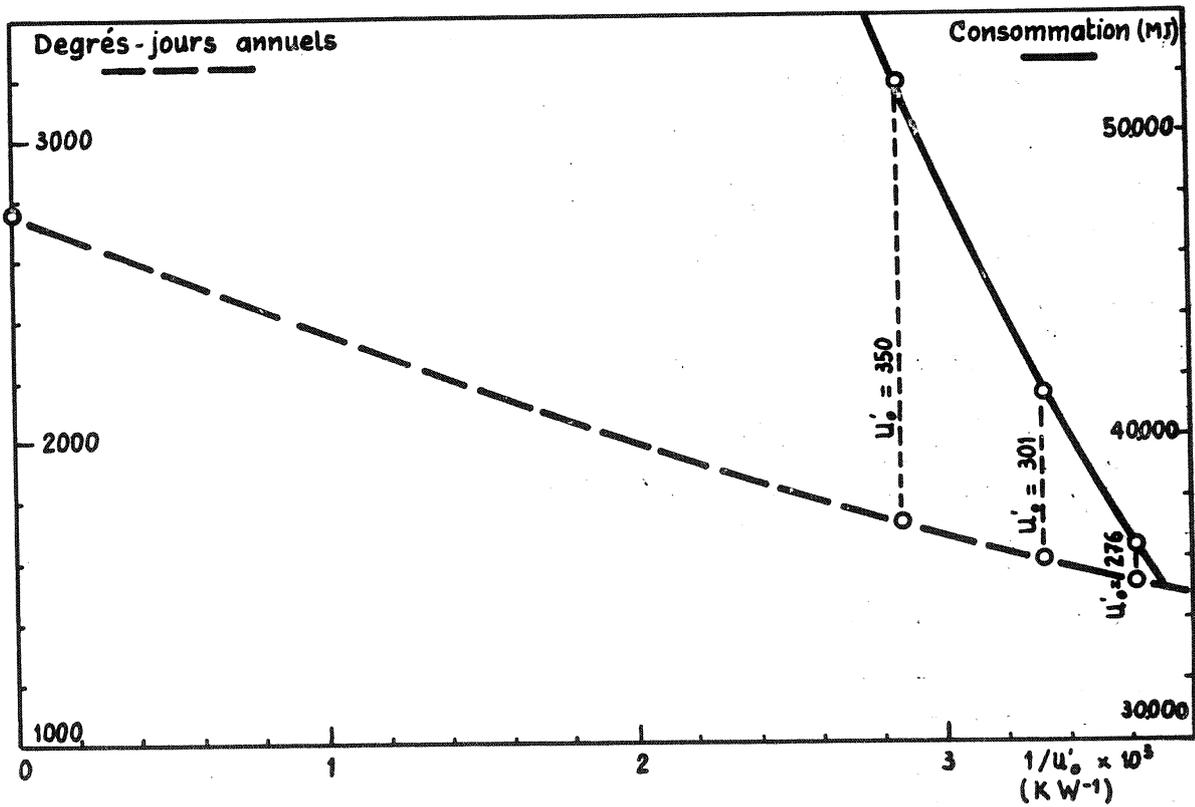
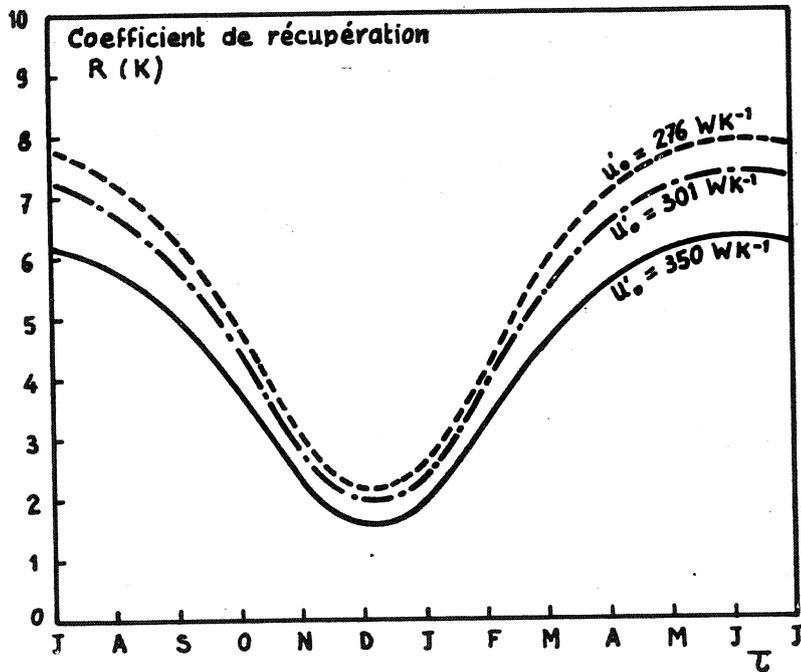


Fig. 3. — Importance des apports gratuits lorsque l'on améliore l'isolation des bâtiments.

avec des gains de chaleur interne constante :

$$q_{occ} = 650 \text{ W.}$$

Ces gains additionnés aux apports solaires représentent ici $\sim 1/3$ des besoins de chauffage. Il en résulte que toute modification du coefficient de déperdition U'_0 entraîne une modification de la consommation qui, en valeur relative, est de 50 % plus élevée. En effet il est facile de voir que :

$$\frac{\Delta q}{q} = \left(1 + \frac{q_{sol} + q_{occ}}{q} \right) \times \frac{\Delta U'_0}{U'_0}$$

avec, dans le cas présent,

$$\frac{q_{sol} + q_{occ}}{q} \cong 0,5.$$

Cet ordre de grandeur recoupe bien celui déjà trouvé par d'autres auteurs [28] ; on voit bien ainsi combien il est important de tenir compte des "apports gratuits" dans toute recherche sur l'isolation économiquement optimale d'un bâtiment. . .

REFERENCES

- [1] I.H.V.E. Guide 1970.
- [2] LONDON A.G. - Summertime temperatures in buildings *Building Research Station Current Papers*, May 1968.
- [3] DAVIES M.G. - The thermal admittance of layered walls, *Building Sciences*, 8, 207-220, Pergamon, 1973.
- [4] BADOT J. - Utilisation d'un coefficient de récupération au rayonnement solaire pour le calcul des besoins de chauffage des bâtiments, *CIB Symposium*. Nov. 78.
- [5] STEPHENSON S.D., MITALAS G.P. - Cooling load calculations by thermal response factors. *A.S.H.R.A.E. Paper N° 2108*, 1967, 73, Part 1.
- [6] MITALAS G.P. STEPHENSON D.C. - Room thermal response factors, *A.S.H.R.A.E. Paper N° 2109* 1967, 73, Part 1.
- [7] AITTO MAKI A. - A model for calculating heat balance of room and building. *Publication 168 of the State Institute for Technical Research*, Helsinki, Finland 1971.
- [8] LOKMANHEKIM M. - Procedure for determining heating and cooling load for computerized energy calculations. *A.S.H.R.A.E.* New York 1971.
- [9] PEAVY B.A. - Determination and verification of thermal response factors for thermal conduction application, *N.B.S.I.R.*, 77 1405, *U.S. Department of Commerce*, April 1978.
- [10] MILBANK N.O., PETHERBRIDGE P. - Do computers provide suitable material for architects at the early stages of environmental design ? Use of Computers for Thermal Environmental Engineering, 1, D.9, *SEDIT*, Paris 1978.
- [11] BILLINGTON N.S. - Thermal insulation and thermal capacity of buildings, *B.S.E.* 43, February 1976.
- [12] The domestic space heating field trials at Kennay, Aberdeenshire, *Interim Report of Electricity Council Research*, London, February 1978.
- [13] A proposed conception for determining the need for air conditioning for buildings base on building thermal response and human comfort. *N.B.S. Building Science Series 71*, *U.S. Department of Commerce*, August 1975.
- [14] LEBRUN J. - Etude expérimentale des régimes transitoires en chambres climatiques, ajustement des méthodes de calcul, *Journée INSA Lyon*, Septembre 1978.
- [15] LEBRUN J. - Utilisation optimale de données météorologiques pour la conception et l'exploitation des bâtiments et de leurs équipements. Quelques aspects physiques du problème. *CIFOP-ATIC Charleroi*, septembre 1976.
- [16] SINGER I.A. and SMITH M.E. - A summary of the recommended guide for the prediction of the dispersion of airborne effluents, *W.M.P.* Brussels, october 1968.
- [17] TORRANCE V.B. - Wind profiles over a suburban site and wind effects on a hal full-scale model building. *Building Science*, 7, Pergamon 1972.
- [18] EATON K. - Wind effects on buildings and structures, *V.K.I. Lecture Series*, 89, Brussel, April 1976.
- [19] Air infiltration in buildings : littérature survey and proposed research agenda. *International Energy Agency*. US Department of Energy May 1978.
- [20] NUSGENS P., CALUWAERTS P. - Determination of the ventilation rate in a serie of social houses CIB-S-17, Holzkirchen, septembre 1977.
- [21] *Programme National R-D Energie*, Contrat n° E/B/1.1.6. 1975-78. Rapport Scientifique Final (sous presse).
- [22] CONSTANT Ph. et SOHET H. - Etude de la validité d'un programme de calcul par différences finies (LPB-2). *Rapport d'avancement. Programme National R-D Energie*, Contrat E/VI/1. Janvier 1979.
- [23] LORENZ F. - Basic characteristic for low-cost houses in order to reduce the energy consumption for heating. Static computation of thermal loads. *Rapport d'avancement*. Décembre 1978.
- [24] LEBRUN J. et MARRET D. - Confort thermique et consommation d'énergie dans les conditions d'hiver : analyse de nouvelles données expérimentales en régime stationnaire. *Collection des Publications de la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Liège*, N° 56, 1975.
- [25] LARET L., LEBRUN J., MARRET D. et NUSGENS P. - Microclimat intérieur et déperditions en chauffage par rayonnement. Comparaison avec d'autres systèmes. *Collection des publications de la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Liège*, N° 71, 1978.
- [26] DOGNIAUX R. et SNEYERS. - Méthodologie d'analyse statistique des données météorologiques en vue de la constitution de périodes-types, pour l'application à des problèmes spécifiques. *Colloque A.I.M. Liège*, septembre 1977.
- [27] DOGNIAUX R. - Recueil de données climatologiques exigentielles pour le calcul des gains solaires dans l'habitat et l'estimation de la consommation d'énergie pour le chauffage des bâtiments, *Compilation pour la C.E.E.*, I.R.M. Bruxelles, janvier 1978.
- [28] SPINDLER B. et CHOUARD Ph. - Apports de chaleur gratuits dans un bâtiment : Etude par ordinateur des différents paramètres, *E.D.F. Département Application de l'Electricité*, *HE 112 NS 1008*, septembre 1978.

