

THERMAL DESIGN METHOD BASED ON MODAL ANALYSIS

G. LEFEBVRE, A. NEVEU,
CENERG - ECOLE DES MINES
75732 PARIS CEDEX 06 FRANCE

1 - OBJET DE LA METHODE H2E

Le bâtiment filtre l'effet des sollicitations climatiques (soleil, air, pluie,...) sur une ambiance intérieure où évoluent des occupants. Il est le siège de phénomènes thermiques complexes résultant de mécanismes de transferts et stockages dynamiques d'énergie. A l'échelle d'un bâtiment, les modèles détaillés reposent sur un certain nombre d'hypothèses destinées à masquer les phénomènes microscopiques ou par trop fluctuants ou aléatoires. Ces modèles restent cependant très lourds et ne constituent jamais un outil d'analyse, encore moins une aide à la conception. Les effets thermiques des choix architecturaux peuvent être pris en compte au stade de la conception si ils sont bien compris et si les méthodes de calcul disponibles pour les évaluer sont suffisamment simples à mettre en oeuvre. Nous avons élaboré une telle méthode de calcul des besoins de chauffage - la méthode H2E-, dans deux cas type d'occupation de logements, dont un correspond à un chauffage intermittent. Elle répond à l'exigence de simplicité et la précision est acceptable compte tenu du niveau habituel de connaissance des caractéristiques thermophysiques et géométriques réelles des composants des structures. L'erreur possible sur les résultats est cohérente avec celles dues aux incontournables hypothèses simplificatrices de modélisation.

Nous expliquerons la méthodologie suivie pour construire la formulation mathématique de la méthode et en calculer les paramètres. Un exemple sera ensuite traité et commenté. Certains développements possibles de la méthode H2E seront enfin présentés en conclusion.

2 - ELABORATION DE LA METHODE H2E

On perçoit généralement bien l'aspect statique des phénomènes thermiques, relié à la notion simple de régime permanent. Il n'en est pas toujours de même des effets de la dynamique des échanges, affectée par la plus ou moins grande aptitude des matériaux constituant la structure à stocker et déstocker rapidement de l'énergie. Les caractéristiques du bâtiment influents sur la dynamique des phénomènes ayant lieu en son sein sont regroupées sous le terme d'inertie;

celle-ci est souvent quantifiée dans les méthodes simplifiées par un paramètre unique qui n'a pas de réel fondement physique: la masse interne par mètre carré habitable (1,2).

Il est pourtant possible de définir rigoureusement l'inertie grâce à la représentation modale des phénomènes thermiques: elle est l'entité physique décrite par l'ensemble des temps caractéristiques et modes propres du système thermique que constitue le bâtiment (3). Le modèle modal peut être réduit à un ordre très faible sans affecter exagérément la qualité de la représentation. Les paramètres du modèle réduit sont des invariants du bâtiment que l'on retrouve dans les modèles modaux plus détaillés. Cette propriété est utilisée pour déterminer le nombre minimum de paramètres principaux permettant de décrire correctement le comportement thermique d'un bâtiment pour lequel on ne s'intéresse qu'à l'évolution de la température intérieure et aux grandeurs qui y sont liées, tels les besoins de chauffage.

Une corrélation existe entre les paramètres caractéristiques du bâtiment, du site et de l'occupation d'une part, et les besoins de chauffage et l'intégrale des surchauffes d'autre part. Un grand nombre de simulations détaillées ont fourni les données à partir desquelles une expression mathématique de cette corrélation et la valeur de ses paramètres a été recherchée, pour deux types d'occupation. Les deux équations trouvées constituent des méthodes de calcul simples des besoins de chauffage des logements individuels isolés. Nous verront qu'elles fournissent des résultats d'une précision très acceptables. La place manque ici pour exposer en détail la justification théorique et argumenter le domaine de validité de la méthode, mais le lecteur intéressé pourra se reporter aux références (4,5) pour de plus amples informations.

3 - LA METHODE H2E

Deux types d'occupation sont représentées dans la méthode H2E:

- 1 - consigne fixe de température intérieure à 19°C.
 - 2 - abaissement de la consigne à 15°C de 23 h à 6 h.
- Dans les deux cas, un scénario fixe de dégagements internes d'énergie est pris en compte (fig.1).

METHODE H2E

CAS 1

$$\xi = (-0,0957 + 0,581 \cdot X) \exp[-(0,0279 - 0,0195 \cdot X) \zeta / 3600] \quad (1)$$

et = 0 si l'expression fournit un résultat négatif.

$$\underline{Bch} = GV \cdot DH19 \cdot (1 - X + \xi) \quad (2)$$

CAS 2

$$\theta = (-303,93 \cdot \beta + 58,47) / (-303,93 \cdot \beta + 58,47 + \zeta / 3600) \quad (3)$$

$$\underline{Bch} = \underline{Bch} - \theta \cdot GV \cdot N \cdot \Delta t \cdot \Delta T \quad (4)$$

avec

- ξ (.) : indice de surchauffe, rapport de l'intégrale des surchauffes aux degré-heures de la période.
- θ (.) : rendement d'intermittence égal au rapport de l'économie réalisée à l'économie maximum possible.
- DH19 (°.s) : degré-heures en base 19 de la période et du site considérés, ou mieux $\int_{T_{ex} < 19} (T_{ex} - 19) dt$ dont les degré-heures ne sont qu'une approximation.
- $S\Phi$ (J) : énergie solaire utile disponible sur le site pour le bâtiment étudié, qui est classiquement calculée comme étant le produit d'une surface transparente verticale sud équivalente S et d'une densité d'énergie solaire incidente sur plan vertical sud (1,2).
- Λ (J) : énergie totale ayant été dissipée dans le bâtiment sous forme d'apports internes.
- GV (W/°C) : coefficient de déperdition statique du bâtiment.
- ζ (s) : constante de temps principale du bâtiment. Une méthode simplifiée pour son calcul est exposée succinctement en annexe.
- β (.) : facteur d'intermittence, égal au rapport de l'économie maximale réalisable par intermittence aux déperditions. Soit en notant N, Δt et ΔT , le nombre, la durée et la hauteur du "créneau" d'intermittence:

$$\beta = \frac{N \cdot \Delta t \cdot \Delta T}{DH19} \quad (5)$$

- X (.) : facteur de site égal au rapport de l'énergie gratuite disponible aux déperditions:

$$X = \frac{S \cdot \Phi + \Lambda}{GV \cdot DH19} \quad (6)$$

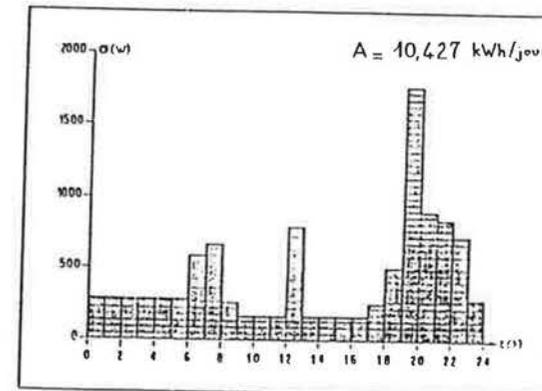


fig.1: scénario d'apports internes

Dans le cas 2, l'intégrale des surchauffes au dessus de la consigne haute est calculée comme dans le cas 1. On suppose que les surchauffes ont lieu en dehors des périodes de ralenti et que les phénomènes de récupération des apports gratuits peuvent être considérés découplés de l'intermittence, avec une bonne approximation.

Les besoins de chauffage se calculent donc dans le cas 2 en retirant des besoins du cas 1 ce que l'intermittence fait économiser, d'où l'expression 4.

En résumé, on peut assurer que moyennant certaines précautions d'emploi telles - température extérieure presque toujours inférieure à la consigne, apports solaires non excessifs et bâtiment formé d'une seule zone habitable - les besoins reconstitués sont au plus distants de 5% de ceux que l'on évalue avec une simulation détaillée (code MINERVE)(5). Cependant lorsque les besoins sont très faibles, l'erreur peut dépasser cette limite et atteindre 20% (fig. 4). Dans le cas 2, ces valeurs passent à 10% et 25% (fig. 5). Observons que les besoins importants sont mieux reconstitués que les faibles. Les figures 2 et 3 montrent la qualité de la reconstitution des besoins mensuels de 54 maisons différentes sur 3 sites distincts, pour lesquels les recommandations énoncées ci-dessus ont été respectées.

L'étude détaillée mise en oeuvre pour élaborer la méthode H2E fait apparaître tous les termes intervenant dans les bilans; par ailleurs, nous avons pu ordonner les paramètres adimensionnés selon l'importance de leur effet sur le résultat souhaité. L'exigence de simplicité nous a conduit à ne conserver qu'un seul paramètre d'inertie, mais nous connaissons ceux qu'il conviendrait d'inclure à la méthode pour en améliorer la précision et/ou le domaine de validité. Par ailleurs, il faut noter que dans l'état actuel de la méthode, un seul paramètre d'inertie suffit à assurer une précision meilleure que celle induite par d'autres paramètres.

Une des sources d'erreur possible est le calcul de l'énergie solaire utile. Il est en fait compliqué et a été l'objet de méthodes simplifiées (1,2) qui fournissent des données précalculées de densité d'énergie solaire incidente. Un autre écart entre les besoins calculés et ceux que l'on obtiendrait par simulation détaillée est du à la non prise en compte de la variation de la quantité d'énergie stockée dans la structure entre le début et la fin de la période observée; l'erreur peut être importante si la période est trop courte et cet écart grand devant les termes du bilan énergétique.

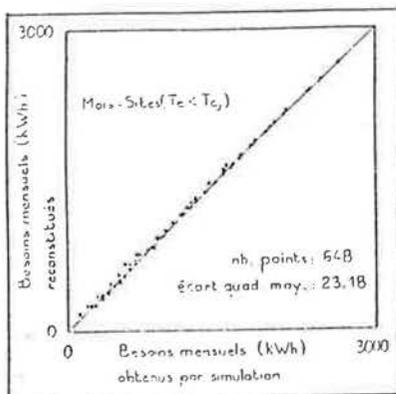


fig. 2 : cas 1

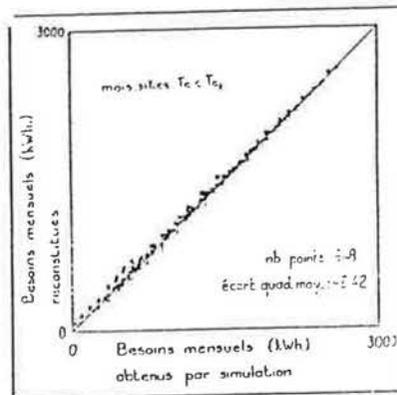


fig. 3 : cas 2

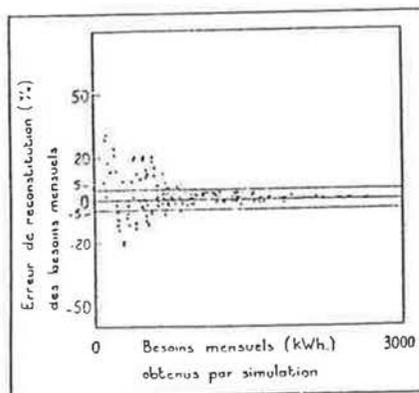


fig. 4 : cas 1

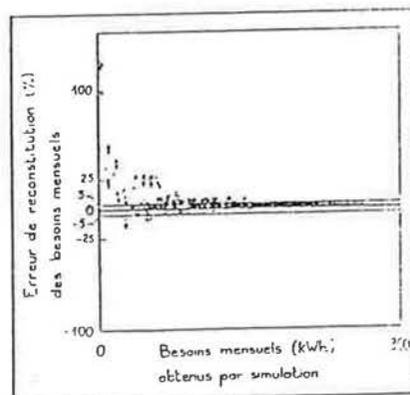


fig. 5 : cas 2

Un exemple de calculs basés sur la méthode H2E va être maintenant présenté; nous verrons quelles informations peuvent en être extraites.

4 - EXEMPLE DE CALCULS

On a calculé par la méthode décrite en annexe le coefficient de déperdition et la constante de temps principale du bâtiment. Les valeurs obtenues sont 182,75 W/°C et 68,78 heures. Sa surface transparente verticale sud équivalente est, pour le mois de janvier à Nice de 3,5 mètres carrés. Les degré-heures et densité d'énergie solaire incidente sur plan vertical sud sont pour ce site et cette période de 8290 °C.h et 72 kWh.

Le facteur de site vaut donc (6):

$$X = (31 \times 10,427 + 3,5 \times 72) / (182,75 \times 8290 / 1000) = 0,381 \quad (7)$$

L'indice de surchauffe est (1):

$$\xi = (-0,0957 + 0,581 \times 0,381) \exp[-(0,0279 - 0,0195 \times 0,381)] = 0,0307 \quad (8)$$

L'intégrale des surchauffes I s'en déduit immédiatement:

$$I = \xi \cdot DH19 = 0,0307 \times 8290 = 254,5 \text{ °C.h} \quad (9)$$

L'écart moyen de la température par rapport à la consigne s'obtient en divisant l'intégrale des surchauffes par la durée de ces surchauffes. En faisant l'hypothèse que ces surchauffes ont probablement lieu le jour entre 8 heures et 18 heures, moment où se cumulent les apports solaires et les dégagements internes, on obtient la valeur de l'écart moyen en divisant l'intégrale des surchauffes par le nombre de jours N de la période et la durée du jour d :

$$I / (N \cdot d) = 254,5 / (31 \times 10) = 0,8 \text{ °C} \quad (10)$$

Une approximation de la température moyenne de jour est donc la somme de la valeur de consigne et de l'écart moyen, soit $T_{int} = 19,8 \text{ °C}$.

Les besoins de chauffage sont dans le cas 1 (2):

$$B_{ch} = GV \cdot DH19 \cdot (1 - X + \xi) = 182,75 \times 8290 \times (1 - 0,381 + 0,0307) = 984,3 \text{ kWh} \quad (11)$$

Le facteur d'intermittence correspondant au cas 2 est (5):

$$\beta = 31 \times 7 \times 4 / 8290 = 0,105 \quad (12)$$

Le rendement d'intermittence que l'on peut espérer obtenir dans ce bâtiment est (3):

$$\theta = (-303,93 \times 0,105 + 58,74) / (-303,93 \times 0,105 + 58,47 + 69,78) = 0,281 \quad (13)$$

L'économie réalisable est donc (4):

$$\Delta B_{ch} = 0,281 \times 182,75 \times 31 \times 7 \times 4 = 44,6 \text{ kWh} \quad (14)$$

On peut donc économiser 4% des besoins pour une consigne fixée à 19 °C en pratiquant un ralenti de nuit selon le cas 2. Les mêmes calculs avec une constante de temps de 20 heures donnent:

- $\xi = 0,0834$
- $I = 691,8 \text{ °C.h}$
- $T_{int} = 21,2 \text{ °C}$
- $E_{ch} = 1064,1 \text{ kWh}$
- $\theta = 0,57$
- $\Delta B_{ch} = 90,5 \text{ kWh}$ soit 8% des besoins .

On note dans ce cas que la constante de temps principale passant de 68,78 heures à 20 heures, toutes choses restant égales par ailleurs, les besoins augmentent de 8,1% et l'économie réalisable par intermittence double.

5 - CONCLUSION

La méthode H2E est, dans son état actuel, un outil simple de calcul des besoins de chauffage intégrant un paramètre continu d'inertie, qui permet par ailleurs d'évaluer l'économie qu'apporte un certain type d'intermittence. La méthodologie suivie pour l'élaborer est cependant beaucoup plus générale et constitue avec l'analyse modale les fondements de la méthode H2E. La représentation modale est particulièrement riche car bien que d'une formulation très synthétique, elle est une forme descriptive des phénomènes thermiques internes. On peut donc envisager d'élargir ultérieurement le champ d'action de la méthode H2E en paramétrant par exemple le créneau d'intermittence, la distribution statistique des apports, ou celle des données climatiques, ou encore en rendant la méthode apte à fournir un indice pertinent de confort.

REFERENCES

- (1) CSTB "Règles TH-B85" PARIS 1985
- (2) CLAUD, P., & alii "Méthode 5000" PYC édition PARIS 1982-1985
- (3) BACOT P., NEVEU A., SICARD J., "Analyse modale des phénomènes thermiques en régime variable dans le bâtiment" Revue Générale de Thermique PARIS 1984
- (4) LEFEBVRE G., NEVEU A. "rapport Thermique des Enveloppes 1986" A.F.M.E. PARIS 1987
- (5) LEFEBVRE G. "La méthode modale en thermique du bâtiment: développements et applications" Thèse de doctorat en transferts thermiques Université Paris VI 1987

ANNEXE: CALCUL APPROCHE DE LA CONSTANTE DE TEMPS PRINCIPALE D'UN BATIMENT

Un bâtiment dont les volumes d'air intérieurs sont portés à une température supérieure de 1 °C à celle de l'extérieur est chargé, en régime permanent, d'une énergie potentielle thermique vis à vis de l'extérieur. Dans cette même situation, le bâtiment subit des déperditions thermiques GV égales au flux thermique qu'il convient de fournir à l'air intérieur pour maintenir le régime permanent. Une bonne approximation de la constante de temps principale du bâtiment est obtenue en faisant le rapport de l'énergie stockée au flux déperditif:

$$\zeta = E/GV \tag{15}$$

En régime permanent, les températures sont réparties linéairement par morceau dans les parois en contact avec l'extérieur et se déduisent aisément des résistances thermiques des matériaux. Les parois intérieures sont uniformément à 1 °C. Les tableaux (6) et (7), remplis dans l'ordre indiqué par les numéros fléchés, permettent le calcul du coefficient de transmission des parois et de l'énergie qui y est stockée. L'énergie potentielle totale E est obtenue en sommant l'énergie contenue dans chacun des composants. Le coefficient de déperdition GV est calculé en faisant la somme des déperditions à travers les parois en contact avec l'extérieur, à travers les vitrages et par renouvellement d'air.

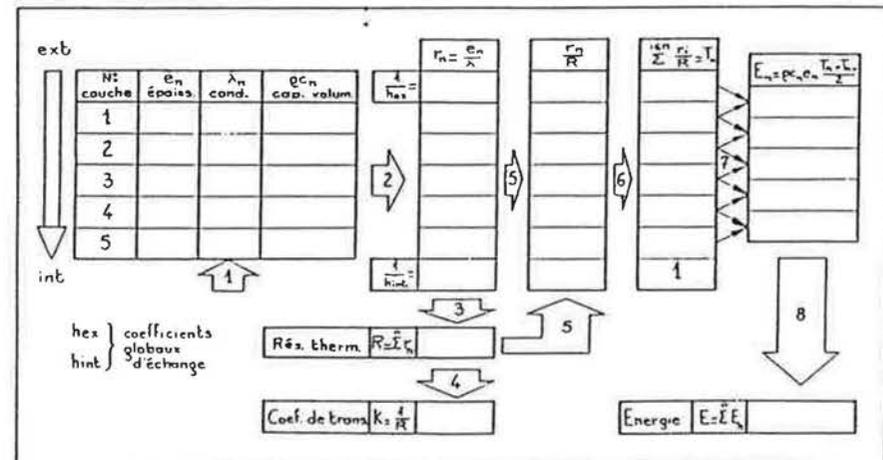


fig. 6 : cadre de calcul pour paroi extérieure