INCIDENCE DE LA NATURE D'UNE PAROI SUR LA PRODUCTION D'ENTROPIE EN REGIME THERMIQUE VARIABLE

Françoise STRUB, Michel STRUB, Jean Castaing LASVIGNOTTES, Jean Pierre BEDECARRATS

LABORATOIRE DE THERMIQUE, ENERGETIQUE ET PROCEDES LATEP, Pau Cedex, France

Rezumat. *Producția de entropie a fost calculată numeric pentru un zid supus unui flux termic în regim variabil. Acest zid separă o încăpere de un mediu exterior unde, pentru a simula condițiile unui climat cald și uscat, temperatura variază sinusoidal. Fluxul transmis și puterea mecanică minimă necesară evacuării spre exterior a acestui flux au fost calculate în funcție de grosimea și natura materialului (conductivitate, densitate și capacitate termică). Aceste mărimi, care fac compatibilă performanța zidului cu rolul său de a izola față de exterior, au fost corelate cu producția de entropie. Atunci când performanța crește se regăsesc rezultatele clasice ce constau în minimizarea și echipartiția producției de entropie. De asemenea, conform teoriei constructale, se observă existența unei grosimi optime care depinde de tipul de material și de solicitarea impusă (perioadă și amplitudine).*

INTRODUCTION

Sous un climat chaud et sec, la température peut varier de façon périodique avec une forte amplitude. Les habitations traditionnelles sont alors construites avec des parois dont l'inertie permet d'amortir et de déphaser la sollicitation thermique. Nous avons voulu quantifier l'avantage énergétique apporté par la nature de la paroi et relier la performance à la production d'entropie dans le mur. Pour cela, nous avons déterminé de façon numérique le champ des températures dans le mur et nous en avons déduit la production d'entropie en fonction du temps et de l'espace. Les résultats sont analysés en fonction des paramètres géométriques et thermophysiques de la paroi. Une attention particulière est apportée sur la minimisation et la répartition de la production d'entropie lorsque la performance augmente.

PRESENTATION DU CAS ETUDIE

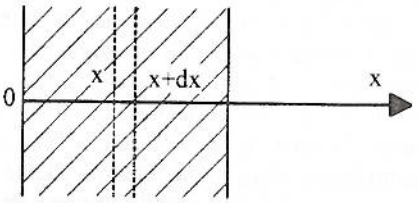
Nous nous sommes intéressés au cas d'un local climatisé, séparé de l'extérieur par un mur homogène dont nous avons fait varier l'épaisseur, la conductivité, la masse volumique et la chaleur massique. Les conditions aux limites sont des conditions de température de paroi. La température de paroi intérieure est fixée à 25°C tandis que la température de paroi extérieure varie sinusoïdalement en fonction du temps. La période est 24 heures tandis que l'amplitude est de 30°C (50°C à 12h et 20°C à 24h)

L'étude a été faite lorsque le régime périodique est établi c'est à dire lorsque l'état du mur à l'instant $t+24h$ est identique à l'état du mur à l'instant t. Le mur décrit donc un cycle au cours duquel la variation des fonctions d'état est nulle.

L'attention finale est portée sur la puissance mécanique théorique nécessaire au maintien de la température de paroi intérieure. Parallèlement la production d'entropie est évaluée et analysée.

PRODUCTION LOCALE ET INSTANTANEE D'ENTROPIE

Détermination numérique



Le problème thermique est très classique. Sa résolution numérique donne le champ des températures dans l'espace et dans le temps. On en déduit la production spatio-temporelle de l'entropie après avoir effectué le bilan entropique d'un élément de surface unité et d'épaisseur dx.

A l'instant t, la production d'entropie $\delta_{irr}S$ dans l'élément d'épaisseur dx pendant dt s'écrit :

$$\delta_{irr}S = \mathrm{d}t\left[\frac{\varphi}{T}(x,t)-\frac{\varphi}{T}(x+\mathrm{d}x,t)\right]-\rho c\mathrm{d}x\frac{\mathrm{d}T}{T(x,t)}$$

Le premier terme représente la variation d'entropie due à l'échange de l'élément avec son environnement tandis que le second comptabilise la variation de l'entropie de l'élément.

Résultats de la simulation

La figure 1 représente les variations de la production d'entropie en chaque point du mur et au

cours du temps. Le mur testé a une épaisseur de 40 cm et il est composé d'un matériau homogène dont les caractéristiques thermophysiques sont classiques pour un matériau de construction.

$$k = 1{,}5 \ \mathrm{Wm^{-1}K^{-1}}$$

$$\rho = 1500 \ \mathrm{kgm^{-3}} \ c = 1000 \ \mathrm{Jkg^{-1}K^{-1}}$$

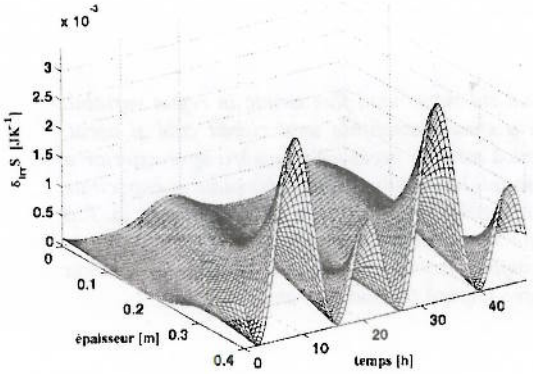


Fig. 1. Variation spatio-temporelle de la production d'entropie.

La représentation sur 48 h de la *figure 1* permet de mettre en évidence sur la face extérieure une évolution périodique de la production d'entropie dont la fréquence a doublé par rapport à celle de la sollicitation thermique extérieure. Au voisinage de la surface externe, la production locale de l'entropie passe donc par 2 maxima, l'un à 12 h, conséquence du transfert de la chaleur vers l'intérieur avec de forts gradients, l'autre à 24 h témoignant d'un flux de chaleur opposé correspondant au refroidissement de la partie extérieure de la paroi lorsque la température extérieure est suffisamment basse. Dans une étude précédente Strub et al. (2004) ont montré que, plus le mur est épais et/ou plus le matériau est isolant, plus la valeur maximum à 24 h augmente jusqu'à égaler celle de 12h. La variation périodique de l'entropie se cantonne alors de plus en plus dans une zone située près la surface et tend à s'annuler dans le reste du mur. Nous avons alors vérifié que la somme de toutes les productions locales pendant un cycle diminuaient. Une tendance à l'équipartition locale et temporelle de la création d'entropie est observée en même temps que la diminution du flux transmis. Ces résultats concordent avec la théorie dite de l'équipartion de la production d'entropie reprise et développée par Bejan et Tondeur (1998, 2003)

COMPARAISON DES DIFFERENTS FLUX

Une fois le régime établi, le flux transmis par la paroi est périodique. Son amplitude et le déphasage par rapport à la sollicitation thermique dépendent de la nature du mur (épaisseur, conductivité, masse volumique et capacité thermique). Pour maintenir une température de paroi intérieure de 25°C, il faut donc évacuer ce flux vers le milieu extérieur dont on a estimé que sa température varie de façon sinusoïdale à l'instar de la température de paroi extérieure.

De façon à pouvoir comparer les différentes situations entre elles, nous avons estimé la puissance mécanique minimum nécessaire à l'évacuation de ce flux par considération d'une machine de Carnot qui fonctionnerait entre les sources à températures T_c *et* T_f définies ainsi : $T_c = T_e + 5\mathrm{K}$ et $T_f = T_i - 5\mathrm{K}$. Si Φ_i est le flux transmis, la puissance mécanique est :

$$P_w = \Phi_i \left(\frac{T_c(t)}{T_f} - 1 \right)$$

La valeur de 5K peut simuler l'écart de températures dû à un échangeur et permet de se retrouver, quel que soit l'instant considéré, avec une situation où $T_f < T_c$.

Le déphasage engendré par l'inertie de la paroi offre la possibilité d'évacuer le flux maximum à une température qui n'est pas la température maximum. La puissance mécanique théorique nécessaire sera donc déphasée par rapport au flux transmis.

La *figure 2* représente la variation du flux transmis comparée à celle de la puissance mécanique pendant une période de 24h. Le mur testé est le même que celui de la *figure 1*. Alors que le flux transmis est maximum à 18h, la puissance mécanique l'est aux alentours de 16h. On note également, qu'au cours de la nuit, la décroissance de la température extérieure engendre une baisse notable de la puissance nécessaire. En superposant la variation journalière de l'efficacité instantanée ($\eta = \frac{T_c(t)}{T_f} - 1$) on vérifie que c'est la nuit que l'efficacité du système est la plus forte avec une opposition très nette entre les valeurs maximum et minimum.

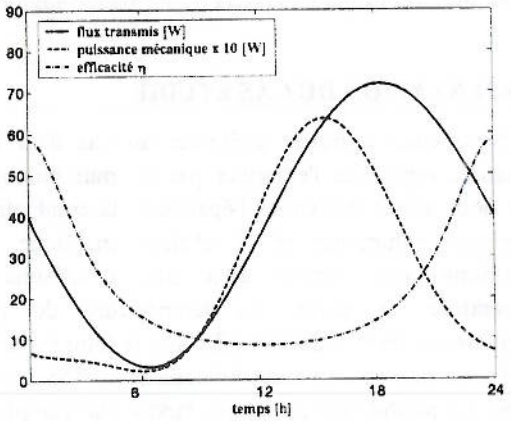


Fig. 2. Variations de Φ_i, P_w et η en fonction du temps.

INFLUENCE COMPAREE DE LA CONDUCTIVITE ET DE L' EPAISSEUR

Pour cette étude, la valeur de la capacité thermique volumique a été fixée à la valeur de :

$$\rho c = 1,5\,10^6 \ \ \mathrm{Jm^{-3}K^{-1}}$$

qui correspond à un matériau classique de construction type béton.

Evolution de W^t

W^t est l'énergie mécanique journalière.

$$W^t = \int_{t=0}^{t=24h} P_w \, \mathrm{d}t$$

La *figure 3* montre son évolution en fonction de la conductivité pour plusieurs épaisseurs. On y note que, plus le mur devient épais, moins la valeur de la conductivité a d'influence sur la consommation d'énergie.

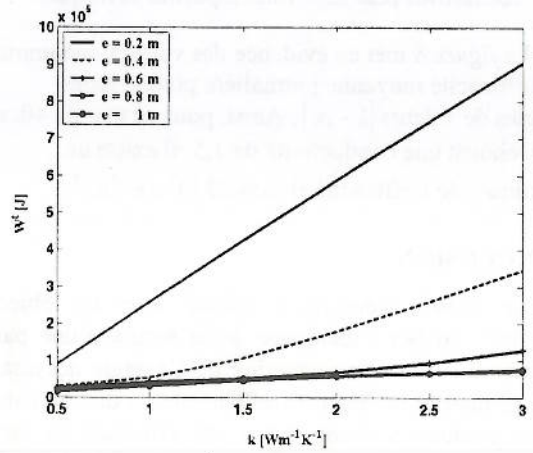


Fig. 3. Valeurs de W^t en fonction de l'épaisseur et de la conductivité.

Evolution de $\Delta_{irr}^{tot} S$

$\Delta_{irr}^{tot} S$ est la production totale dans le mur pendant 24h.

$$\Delta_{irr}^{tot} S = \sum_{x=0}^{x=e} \sum_{t=0}^{t=24h} \delta_{irr} S$$

On observe sur la figure 4 une évolution de la production totale d'entropie similaire à l'évolution de l'énergie mécanique mais avec une influence plus marquée de la conductivité lorsque l'épaisseur augmente.

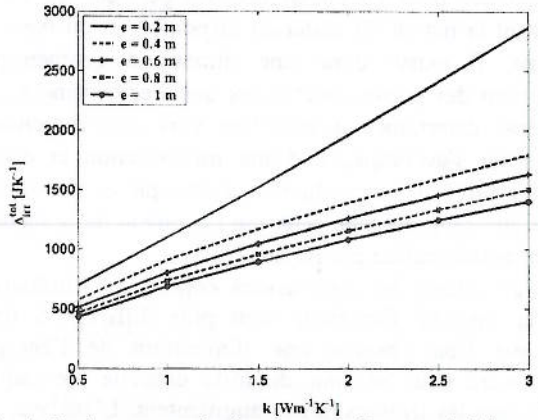


Fig. 4. Production totale d'entropie en fonction de l'épaisseur et de la conductivité.

Evolution de l'efficacité moyenne journalière η^m

L'énergie Q_i transmise par le mur au cours des 24 h est :

$$Q_i = \int_{t=0}^{t=24h} \Phi_i \mathrm{d}t$$

On en déduit l'efficacité moyenne journalière

$$\eta^m = Q_i / W^t$$

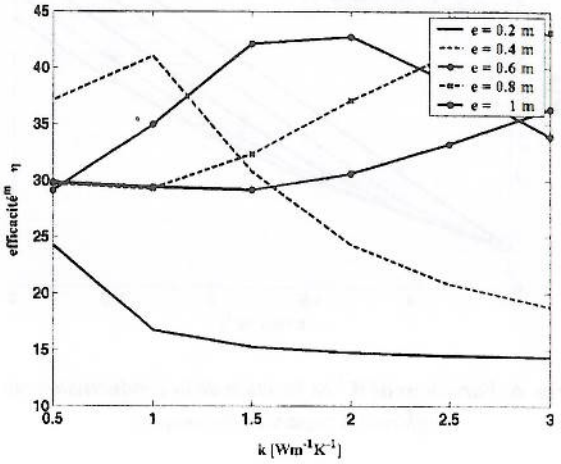


Fig. 5. Efficacité moyenne en fonction de la conductivité pour plusieurs épaisseurs.

On peut observer sur la *figure 5* que, dans certaines conditions, la valeur de l'efficacité moyenne passe par un maximum. Pour $k = 1,5$, par exemple, il semble que l'épaisseur optimale se situe entre une épaisseur de 0,4 m et 0,6 m. Si l'on essaie de corréler ce résultat avec ceux donnés par la *figure 4,* on peut noter que cette épaisseur « optimale » correspond à l'épaisseur à partir de la quelle la production d'entropie diminue faiblement lorsque l'épaisseur augmente (k étant fixé)

INFLUENCE COMPAREE DE LA CONDUCTIVITE ET DE LA CAPACITE THERMIQUE

Présentation de l'étude

De façon similaire, nous avons voulu observer les influences respectives des caractéristiques du matériau (k et ρc) sur la production d'entropie et associer la production d'entropie à la performance de la paroi dans son rôle d'isolation vis-à-vis de l'extérieur.

Les résultats ont été présentés pour un mur dont l'épaisseur a été fixée à 0,4 m.

Etant donné que l'étude se fait en régime établi, la capacité thermique du mur n'intervient pas sur la quantité d'énergie transmise. Par contre, elle intervient dans le déphasage du flux transmis et donc dans la valeur de la puissance mécanique nécessaire ainsi que dans l'efficacité.

Résultats de la simulation

De façon analogue à l'étude présentée au § 4, les variations de $W^t, \Delta_{irr}^{tot}S, \eta^m$ sont représentées sur les *figures 6, 7 et 8.*

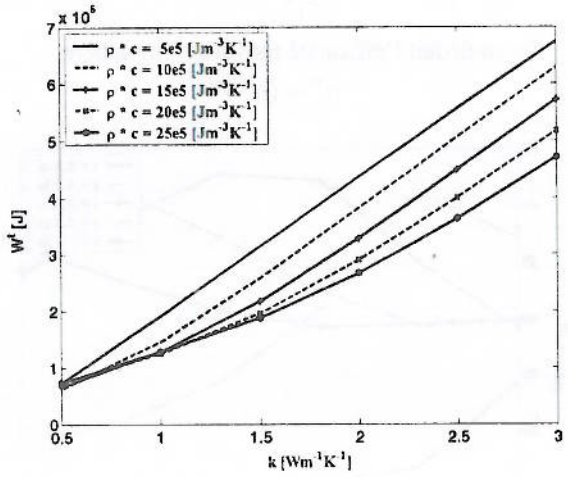


Fig. 6. Variations de W^t en fonction de la conductivité pour différentes capacités thermiques.

L'analyse de la figure 6 montre que la valeur de ρc a peu d'influence sur l'énergie consommée lorsque le mur a une conductivité faible. Pour $k = 0,5$ $Wm^{-1}K^{-1}$ la valeur de W^t est la même quelle que soit la valeur de ρc. Par ailleurs, une forte capacité thermique diminue la consommation d'autant plus que le mur a une conductivité thermique élevée.

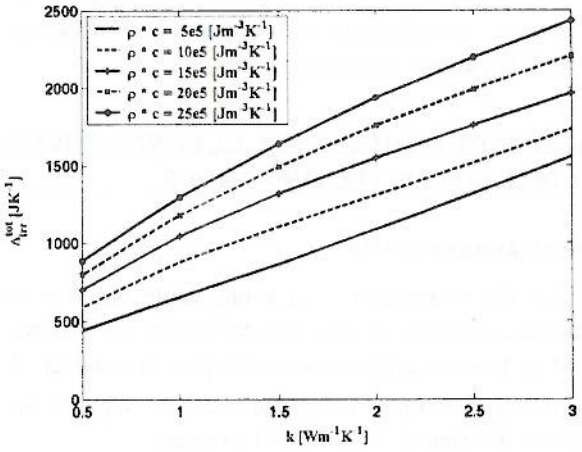


Fig. 7. Production d'entropie totale en fonction de la conductivité pour différentes valeurs de ρc.

La figure 7 met en évidence les effets contraires de l'augmentation de ρc sur W^t et sur $\Delta_{irr}^{tot}S$. La consommation diminue alors que les irréversibilités augmentent.

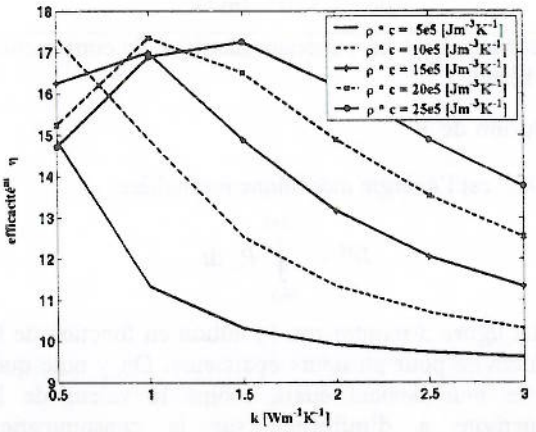


Fig. 8. Variations de l'efficacité moyenne en fonction de la conductivité pour différentes capacités thermiques.

La *figure 8* met en évidence des valeurs maximum de l'efficacité moyenne journalière pour certains couples de valeurs $[k - \rho c]$. Ainsi, pour ce mur de 40cm, si on choisit une conductivité de 1,5, il existe un maximum de l'efficacité si $\rho c = 25\,10^5\ Jm^{-3}K^{-1}$.

CONCLUSION

Le travail entrepris a débuté avec un objectif pratique : étudier l'incidence de la nature d'une paroi extérieure sur la consommation de l'énergie nécessaire pour climatiser un local. Parallèlement, la détermination de la production d'entropie a été effectuée de façon numérique et analysée. Si l'on ne considère que l'influence des paramètres les plus importants, c'est-à-dire l'épaisseur et la conductivité, il apparaît deux conclusions importantes. D'une part, l'énergie nécessaire diminue lorsque les irréversibilités diminuent, ce qui est en accord avec la théorie de la minimisation de l'entropie développée par Bejan (1996). D'autre part, il apparaît, dès lors que l'on a fixé la nature du matériau, une épaisseur optimum où l'efficacité moyenne est maximum. Il semblerait donc que pour une sollicitation de période et d'amplitude données il existe une dimension géométrique adaptée à la protection de cette sollicitation. Les sollicitations thermiques dues au climat ont des périodes de 24 h. Suivant la nature du matériau disponible et du type de climat, il existe donc une dimension géométrique optimum des parois extérieures que l'empirisme a, en général, déterminée. L'évolution vers cette dimension optimum s'accompagne d'une minimisation et d'une équipartition de la production d'entropie et ce résultat peut être rapproché de ceux qui découlent de la théorie constructale établie par Bejan (2000).

Par ailleurs les conclusions concernant l'influence de la capacité thermique sont plus difficiles à tirer puisque l'on observe une diminution de l'énergie nécessaire pour un mur de forte capacité thermique, alors que les irréversibilités augmentent. L'analyse, en régime variable de transfert thermique, des

irréversibilités doit être poursuivie. La détermination numérique de la production d'entropie spatiale et temporelle constitue un moyen intéressant d'investigation et d'analyse.

NOMENCLATURE

c chaleur massique, $Jkg^{-1}K^{-1}$

P_w puissance mécanique, Wm^{-2}

Q_i énergie transmise à l'intérieur du local au cours de 24h, $J.m^{-2}$

S entropie par unité de surface du mur, $JK^{-1}m^{-2}$

T température, K

W^t énergie mécanique nécessaire, J/24h

Symboles grecs

$\delta_{irr}S$ production élémentaire d'entropie, $JK^{-1}.m^{-2}$

η efficacité instantanée

η^m efficacité moyenne journalière

$\varphi(x,t)$ densité de flux, $W.m^{-2}$

$\Phi_i(t)$ flux transmis à l'intérieur, $W.m^{-2}$

ρ masse volumique, kgm^{-3}

$\Delta_{irr}^{tot}S$ production totale d'entropie dans le mur au cours de 24h et par unité de surface, $JK^{-1}m^{-2}$

REFERENCES

[1] BEJAN A., *Entropy Generation Minimization*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 1996.

[2] BEJAN A., *Shape and Structure, from Engineering to Nature*, Cambridge, UK, 2000.

[3] BEJAN A., TONDEUR D., *Equipartition, optimal allocation, and the constructal approach to predicting organization in nature. Rev Gén Therm(1988)37, 165-180*, 1998.

[4] STRUB F., STRUB M. CASTAING J., BEDECARRATS J.P., *Analyse dynamique des irréversibilités dues au transfert thermique dans une paroi* texte proposé pour le Congrès SFT04 Mai, 2004.

[5] TONDEUR D., "Equipartition des irréversibilités. Un principe thermodynamique de minimum pour l'optimisation des procédés et processus ?" Séminaire PRI CARNOT Gourette 3-6 Février 2003

SOCIETATEA ROMÂNĂ A TERMOTEHNICIENILOR (SRT)

Societatea Română a Termotehnicienilor (SRT), ales în şedinţa plenară din 26 noiembrie 2004

I. Consiliul de conducere

Preşedinte: Prof. dr. ing. Mircea Marinescu (Bucureşti)

Vicepreşedinţi: Prof. dr. ing. Ana-Maria Bianchi (Bucureşti)
Prof. dr. ing. Alexandru Dobrovicescu (Bucureşti)
Prof. dr. ing. Mihai Jedaneanţ (Timisoara)
Prof. dr. ing. Panait Tănase (Galaţi)

Secretar: Prof. dr. ing. Gabriel Ivan (Bucureşti)

Membrii: Prof. dr. ing. Cornel Mihăila (Bucureşti)
Prof. dr. ing. Tudor Prisecaru (Bucureşti)
Prof. dr. ing. Viorel Popa (Galaţi)
Conf. dr. ing. Tudora Cristescu (Ploieşti)

Comisia de cenzori: Prof. dr. ing. Tudor Darie (Constanţa)
Conf. dr. ing. Florin Băltareţu (Bucureşti)
Conf. dr. ing. Dan Stănescu (Bucureşti)

Trezorier: Conf.dr.ing. Gheorghe Mihalascu (Bucureşti)
Asist. drd. ing. Nichita Nenu Madalina (Bucureşti)

II. Presedinţii filialelor SRT:

Prof. dr. ing. Alexandru Dobrovicescu (Bucureşti)
Prof. dr. ing. Marin Bică (Craiova)
Prof. dr. ing. Nadia Potoceanu (Reşiţa)
Prof. dr. ing. Radu Reff (Sibiu)
Prof. dr. ing. Gheorghe Băcanu (Braşov)
Prof. dr. ing. Sorin Rusu (Cluj-Napoca)
Prof. dr. ing. Gheorghe Dumitraşcu (Iaşi)
Prof. dr. ing. Constantin Iosifescu (Galaţi)
Prof. dr. ing. Tudor Darie (Constanţa)
Prof. dr. ing. Stama Sotri (Targovişte)
Prof. dr. ing. Tudor Sajin (Bacău)

III. Redacţia revistei

Dr. ing. Ioan Ganea – redactor şef (Bucureşti)
Prof. dr. ing. Gheorghe Popescu – redactor şef adjunct (Bucureşti)
Conf.dr.ing. Darie Emanuel – redactor