

## MESURE DE LA RESISTANCE THERMIQUE EFFECTIVE D'UNE PAROI HOMOGENE PAR TRAITEMENT D'UN BILAN D'ENTROPIE EN REGIME VARIABLE

B. DUTHOIT, A. FARZA et P. THERY

Centre de Recherche Sciences des Matériaux et Techniques de Construction, Université de Lille, I.F 59655,  
Villeneuve D'ascq, France

(Reçu le 25 mars 1981 et sous forme modifiée le 18 janvier 1982)

**Résumé**—Le traitement des mesures simultanées de flux thermiques et de variations de température sur les faces avant et arrière d'une paroi homogène permet d'évaluer la valeur instantanée du bilan des échanges d'entropie avec le monde extérieur.

Le bilan des échanges d'entropie calculé sur une transformation cyclique permet d'évaluer l'augmentation interne d'entropie par conduction thermique. La méthode de traitement est appliquée à l'évaluation des pertes internes dans deux processus fondamentaux : le stockage et le transfert de chaleur à travers une paroi homogène. Le bilan des échanges d'entropie a été simulé à chaque instant pour un régime transitoire dans lequel la paroi est d'abord soumise sur une face à une variation de température imposée puis ramenée à l'équilibre thermique.

Pour des transformations cycliques de durées supérieures ou égales à trois fois la constante de temps fondamentale de la paroi, l'entropie dissipée par conduction thermique est pratiquement égale à l'entropie dissipée dans la paroi supposée à chaque instant en régime permanent. En égalant la dissipation interne au bilan des échanges d'entropie avec le monde extérieur, il est possible de déterminer la résistance thermique effective correspondant à la transformation cyclique réalisée.

### NOMENCLATURE

$c$ ,	chaleur massique [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ];
$C$ ,	capacité thermique [ $\text{J K}^{-1}$ ];
$D'_2$ ,	intégrale, $\frac{\Delta T^2}{T_1 T_2} dt$ [ $\text{K s}$ ];
$j_s$ ,	densité flux d'entropie [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ];
$J_1, J_2$ ,	intégrales [ $\text{J K}^{-1}$ ];
$p$ ,	indice de sommation;
$R$ ,	résistance thermique [ $\text{K W}^{-1}$ ];
$s$ ,	densité massique d'entropie [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ];
$S_1, S_2$ ,	surfaces [ $\text{m}^2$ ];
$\Delta S$ ,	variations d'entropie [ $\text{J K}^{-1}$ ];
$\Delta S, \Delta S_2$ ,	intégrales [ $\text{J K}^{-1}$ ];
$t_0, t$ ,	temps [ $\text{s}$ ];
$\bar{T}$ ,	température moyenne [ $\text{K}$ ];
$\Delta T, \Sigma T$ ,	combinaisons de températures superficielles [ $\text{K}$ ];
$u$ ,	densité massique d'énergie interne [ $\text{J kg}^{-1}$ ];
$dv$ ,	élément de volume [ $\text{m}^3$ ];
$V$ ,	volume [ $\text{m}^3$ ];
$x$ ,	variable d'espace [ $\text{m}$ ].

### Symboles grecs

$\rho$ ,	masse volumique [ $\text{kg m}^{-3}$ ];
$\phi$ ,	densité de flux [ $\text{W m}^{-2}$ ];
$\Phi$ ,	flux [ $\text{W}$ ];
$\bar{\Phi}, \bar{\phi}$ ,	valeurs moyennes du flux et de la densité de flux [ $\text{W}$ ];
$\Delta \Phi, \Sigma \Phi$ ,	combinaisons de flux thermique [ $\text{W}$ ];
$\phi'$ ,	fluctuation spatiale de la densité de flux [ $\text{W m}^{-2}$ ].

### 1. INTRODUCTION

DANS un article précédent [1], nous avons montré qu'il était possible de déterminer la diffusivité et la chaleur massique par traitement des évolutions de flux thermiques en régime transitoire. Cette méthode a été développée dans le cas particulier des matériaux homogènes pour lesquels il est possible de résoudre analytiquement l'équation de Fourier. Dans ce travail, nous développons une méthode plus générale de traitement des flux thermiques et des variations de températures superficielles permettant d'évaluer les échanges d'énergie et d'entropie en régime variable. Le bilan d'entropie introduit les notions fondamentales de création interne d'entropie et d'entropie échangée avec le monde extérieur pour entretenir les processus de dissipation interne. La densité temporelle d'entropie s'exprime par une somme de produits entre flux et forces généralisées. Les facteurs de l'entropie s'expriment uniquement en fonction des flux et variations de température superficielle. Le traitement de ces informations permet de déterminer l'augmentation d'entropie par dissipation interne dans les transformations cycliques.

Les résultats obtenus sont appliqués à la mesure de la dissipation interne dans une paroi homogène soumise à des sollicitations thermiques variables dans le temps. Il y a dissipation interne par conduction thermique dans les processus de stockage et de transfert de la chaleur. Le traitement des échanges d'entropie provoqués par le transfert de la chaleur permet d'identifier la résistance thermique en régime quasi-stationnaire. Le domaine d'application de la méthode de traitement des flux et température superficielle a été

précisé par une simulation sur minicalcateur. Les résultats expérimentaux ont permis de vérifier les résultats de la simulation. L'intérêt du bilan d'entropie n'est pas limité à la mesure de la résistance thermique; il est représentatif du degré d'irréversibilité des transferts thermiques en régime transitoire.

## 2. LES BILANS D'ENERGIE ET D'ENTROPIE

### 2.1. Representation du stockage de chaleur sensible

Les variables thermodynamiques habituellement utilisées pour représenter l'état d'un système en déséquilibre thermique sont les valeurs locales de la température absolue  $T(x, t)$  et de la densité de flux  $\phi(x, t)$ . Dans les transformations considérées, les travaux de dilatation sont toujours très faibles vis-à-vis des quantités de chaleur échangée et l'évolution temporelle du champ de température est solution de la relation de conservation

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(-\phi).$$

Pour l'ensemble du système, nous obtenons la relation intégrale

$$\frac{du}{dt} = \int_V \rho \frac{du}{dt} dv = \int_V \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dv = \int_S -\phi \cdot n ds$$

$n$  étant la normale à la surface orientée vers l'extérieur.

Introduisons la variation de température moyenne et la chaleur volumique moyenne par la relation

$$\int_V \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dv = \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} \int_V \rho c dv = C \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} \quad (1)$$

Dans le cas particulier du système monodimensionnel représenté Fig. 1(a) échangeant de la chaleur à travers deux surfaces  $S_1$  et  $S_2$  parallèles, la variation de température moyenne s'exprime en fonction des flux thermiques superficiels  $\Phi_1$  et  $\Phi_2$ .

En posant

$$\Phi_1 = \int_{S_1} \phi ds \quad \Phi_2 = \int_{S_2} \phi ds$$

nous obtenons une combinaison des relations précédentes:

$$C \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = (\Phi_1 - \Phi_2) = \Delta\Phi. \quad (2)$$

La combinaison linéaire  $\Delta\Phi$  des flux de chaleur mesurés sur les surfaces externes représente la quantité de chaleur accumulée à chaque instant dans le système. Cette coordonnée généralisée est une fonction d'état au sens de la thermodynamique qui définit la température moyenne d'un système en évolution comme une variable d'état. L'intégration de cette coordonnée dans le temps permet d'évaluer en temps réel le bilan des échanges d'énergie avec l'extérieur.

### 2.2. Creation interne d'entropie par conduction thermique

Le passage de la chaleur par conduction thermique

provoque une augmentation interne d'entropie localement représentée par la relation [2-5]

$$\rho \frac{d_i s}{dt} = - \frac{\phi(x, t)}{T^2(x, t)} \text{grad } T.$$

Dans le cas particulier du régime permanent dans le système représenté Fig. 1, l'amplitude du flux est indépendante de la coordonnée d'espace  $x$  et l'intégration de l'expression précédente conduit à la relation

$$\frac{\Delta_i S}{dt} = \frac{\phi \Delta T}{T_1 T_2} = \phi \Delta(1/T) \quad \text{avec} \quad \Delta T = R\Phi \quad (3)$$

$$\text{et} \quad \Delta(1/T) = \frac{\Delta T}{T_1 T_2}.$$

En régime instationnaire, la densité de flux n'est pas uniforme. A chaque instant, la densité de flux peut être considérée comme la superposition d'une densité moyenne

$$\bar{\phi} = \frac{\Delta T}{SR} \quad (4)$$

et d'une fluctuation spatiale  $\phi'(x, t)$

$$\phi(x, t) = \bar{\phi}(t) + \phi'(x, t).$$

Compte tenu des relations de définition

$$\int_V \phi'(x, t) dv = 0$$

dans le cas particulier d'une paroi homogène sans résistance de contact, l'augmentation interne par conduction thermique s'exprime par la relation

$$\int_V \phi'(x, t) dv = 0$$

$$\frac{\Delta_i S}{dt} = \frac{\Delta T^2}{RT_1 T_2} + \int_V \frac{\phi'^2}{\lambda T^2} dv + \int_V \frac{\bar{\phi} \phi'}{\lambda T^2} dv. \quad (5)$$

Pour une transformation finie

$$\Delta_i S = D_1 + D_2 + D_{12}$$

avec

$$D_1 = \int_{t_0}^t \frac{\Delta T^2}{RT_1 T_2} dt, \quad D_2 = \int_{t_0}^t \int_V \frac{\phi'^2}{\lambda T^2} dv dt, \quad (6)$$

$$D_{12} = \int_{t_0}^t \int_V \frac{\bar{\phi} \phi'}{\lambda T^2} dv dt,$$

$t_0$  représentant le début de la transformation.

Le terme  $D_1$  représente l'augmentation d'entropie due au passage du flux  $\Delta T/R$  dans le système. Le second terme  $D_2$  représente l'augmentation d'entropie des écarts par rapport au régime permanent. Le terme  $D_{12}$  est une entropie d'interaction entre les flux  $\bar{\phi}$  et  $\phi'$ .

En pratique, il y a lieu de considérer l'augmentation d'entropie dans un système constitué par 3 couches et 2 interfaces localisés entre les pointillés de la Fig. 1(b). Soient  $T_1$  et  $T_6$  les températures dans les plans de

mesure des fluxmètres,  $T_2$  et  $T_5$  les températures mesurées dans les fluxmètres au niveau du contact avec l'échantillon,  $T_3$  et  $T_4$  les températures de contact mesurées dans l'échantillon.  $\Delta T_{i_1} = T_2 - T_3$  et  $\Delta T_{i_2} = T_4 - T_5$  représentent l'effet des résistances de contact entre l'échantillon et les fluxmètres. La différence de température mesurée

$$\Delta T = T_1 - T_6 = \Delta T_{f_1} + \Delta T_{i_1} + \Delta T + \Delta T_{i_2} + \Delta T_{f_2}$$

avec

$$\Delta T_{f_1} = T_1 - T_2 \quad \text{et} \quad \Delta T_{f_2} = T_5 - T_6.$$

Pour chaque couche et interface, on peut définir un flux moyen instantané par les relations

$$\bar{\phi}_{f_1} = \frac{\Delta T_{f_1}}{S' R_{f_1}}, \quad \bar{\phi}_{i_1} = \frac{\Delta T_{i_1}}{S' R_{i_1}}, \quad \bar{\phi} = \frac{\Delta T}{S' R}$$

$$\bar{\phi}_{i_2} = \frac{\Delta T_{i_2}}{S' R_{i_2}}, \quad \bar{\phi}_{f_2} = \frac{\Delta T_{f_2}}{S' R_{f_2}}.$$

En régime variable, les flux moyens instantanés n'ont généralement pas la même valeur dans les couches et les interfaces.

Dans ces conditions normales d'utilisation, les fluxmètres ont une constante de temps faible vis-à-vis de celle de la paroi et la valeur instantanée du flux moyen est sensiblement la même dans tout le système.

Dans ces conditions, on peut introduire une fluctuation spatiale dans chaque couche et interface

$$\phi'_{f_1} = \phi_{f_1} - \bar{\phi}_{f_1}, \quad \phi'_{i_1} = \phi_{i_1} - \bar{\phi}_{i_1}, \quad \phi' = \phi - \bar{\phi}$$

$$\phi'_{i_2} = \phi_{i_2} - \bar{\phi}_{i_2}, \quad \phi'_{f_2} = \phi_{f_2} - \bar{\phi}_{f_2}.$$

Compte tenu de ces définitions, il est possible de reprendre les calculs précédents et on établit facilement que l'augmentation d'entropie dans le multicouche est la somme de l'augmentation d'entropie dans chaque couche homogène et à chaque interface.

### 2.3. Les échanges d'entropie avec le monde extérieur

Les échanges d'entropie avec le monde extérieur s'expriment en fonction de la densité de flux d'entropie  $J_s = \phi/T$  par la relation

$$\Delta_e S = - \int_{t_0}^t \int J_s ds dt. \quad (7)$$

Dans le cas particulier de la paroi monodimensionnelle de la Fig. 1, le développement de la relation précédente conduit à

$$\Delta_e S = - \int_{t_0}^t \left( \frac{\Phi_2}{T_2} - \frac{\Phi_1}{T_1} \right) dt. \quad (8)$$

Pour simplifier la notation, posons :

$$\Delta \Phi = (\Phi_1 - \Phi_2), \quad \Delta \left( \frac{1}{T} \right) = - \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right),$$

$$\Sigma \Phi = \frac{1}{2} (\Phi_1 + \Phi_2), \quad \Sigma \left( \frac{1}{T} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right).$$

Il en résulte que la densité temporelle d'entropie

$$\frac{d_e S}{dt} = \frac{\Phi_1}{T_1} - \frac{\Phi_2}{T_2} = \Delta \Phi \Sigma \left( \frac{1}{T} \right) - \Sigma \Phi \Delta \left( \frac{1}{T} \right) = \frac{d}{dt} (J_1 - J_2) \quad (9)$$

s'exprime en fonction des combinaisons  $\Delta \Phi(t)$  et  $\Delta(1/T)$ .  $\Delta \Phi(t)$  est une variable d'état caractérisant le stockage de chaleur sensible quel que soit le degré d'irréversibilité de l'évolution. De la même façon,  $\Delta(1/T)$  est une force généralisée caractérisant le transfert de chaleur quel que soit le régime permanent ou instationnaire. Le produit de ces coordonnées par les quantités conjuguées permet de rendre compte de la dissipation interne.

### 2.4. Le bilan d'entropie

Connaissant l'expression des échanges d'entropie avec le monde extérieur, il est possible de calculer la dissipation interne sur une transformation cyclique puisque pour de telles transformations

$$\Delta_e S_{\text{cycle}} + \Delta_i S_{\text{cycle}} = 0. \quad (10)$$

Cette relation permet d'évaluer l'augmentation d'entropie par conduction thermique lorsque l'on remplace  $\Delta_e S$  par sa valeur tirée de l'équation (7).

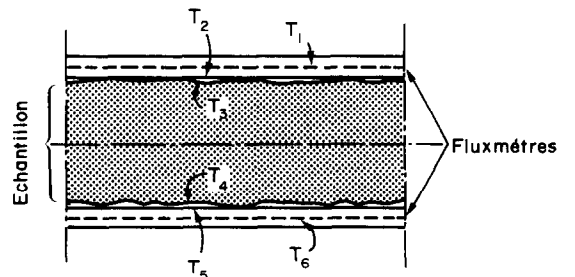
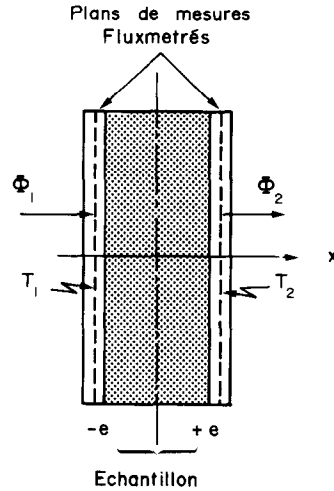


FIG. 1(a) et 1(b). Définition des flux et températures superficielles.

Nous nous sommes limités à l'étude de quelques transformations particulières.

2.4.1. *Le stockage-déstockage de chaleur sensible.* Sans transfert de chaleur caractérisé par la condition  $\Delta(1/T) = 0$  les températures des deux surfaces d'échanges varient dans le temps, mais ont toujours la même valeur.

2.4.2. *Le processus de transfert de chaleur.* Sans stockage de chaleur sensible caractérisé par  $\Delta\Phi = 0$ .

2.4.3. *Les évolutions complexes.* Dans lesquelles il y a stockage et transfert de chaleur à travers le système.

### 3. SIMULATION EN REGIME VARIABLE

Pour introduire le bilan d'entropie comme méthode de traitement des flux et températures superficielles, nous avons simulé les échanges d'entropie entre une paroi homogène et le monde extérieur en régime variable. Lorsque la paroi, initialement à la température  $T_0$ , est soumise sur ses deux faces à des variations en "échelons" d'amplitudes  $T_1 - T_0$  et  $T_2 - T_0$ , la résolution de l'équation de Fourier conduit à la solution (1)

$$\Delta\Phi(t) = \frac{2\lambda S}{e} [T_1 + T_2 - 2T_0] \times \left[ \sum_{p=0}^{\infty} \exp - \frac{a(2p+1)^2 \pi^2 t}{4e^2} \right] \quad (11)$$

$$\Sigma\Phi(t) = \frac{\lambda S}{e} [T_1 - T_2] \times \left[ 1 + 2 \sum_{p=1}^{\infty} \exp - \frac{ap^2 \pi^2 t}{e^2} \right] \quad (12)$$

avec  $\lambda$  conductivité thermique,  $a$  diffusivité et  $2e$  épaisseur de l'échantillon.

Connaissant la réponse à une sollicitation en échelon, il est possible de calculer la réponse à une perturbation de forme quelconque par un produit de convolution. La simulation de la réponse correspondant aux formes exponentielles de la Fig. 3 permet de représenter les réponses à une grande diversité de signaux allant de l'impulsion au signal lentement variable.

#### 3.1. Simulation du bilan d'entropie dans les processus de stockage-déstockage de chaleur sensible

C'est une transformation symétrique caractérisée par la contrainte  $\Delta T = T_1 - T_2 = 0$ . La paroi subit sur chacune de ses faces des variations symétriques de températures imposées. Dans ces conditions, le transfert de chaleur est représenté par les variations de la seule coordonnée  $\Delta\Phi(t)$ . Utilisant la relation (11), nous avons pu simuler les variations  $\Delta\Phi(t)$  et  $J_1(t)$  correspondant à la variation cyclique de température imposée représentée Fig. 2. La valeur asymptotique  $J_1(\infty)$  différente de zéro est représentative du degré d'irréversibilité de la transformation cyclique. Des simulations effectuées avec divers types de signaux ont permis de montrer que la valeur asymptotique  $J_1(\infty)$  est d'autant

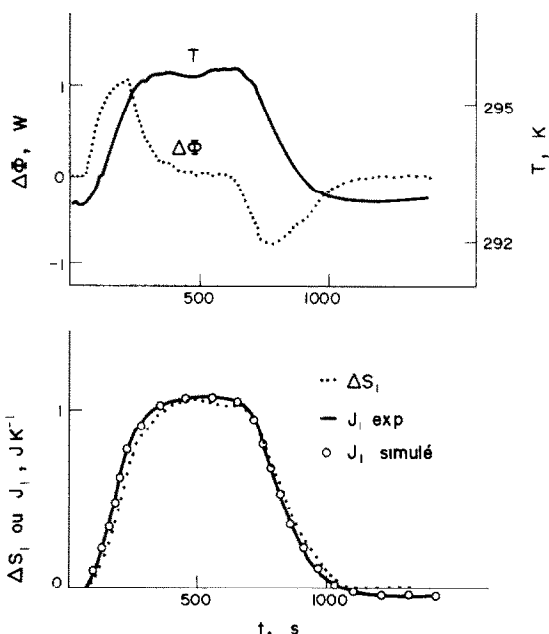


FIG. 2. Courbes théorique et expérimentale représentant les échanges d'entropie dans une transformation cyclique de stockage-déstockage de chaleur sensible.

plus importante que les variations de température imposées sont rapides et de forte amplitude.

#### 3.2. Simulation des pertes par conduction thermique dans le processus de "transfert pur" de chaleur à travers la paroi

Dans une telle transformation caractérisée par la contrainte  $\Delta\Phi = 0$ , la température moyenne reste constante. Les surfaces  $S_1$  et  $S_2$  échangent des flux de mêmes signes avec le monde extérieur.

Dans ces conditions, l'évolution du système est représentée par les variations temporelles des seules quantités conjuguées  $\Delta T(t)$  et  $\Sigma\Phi(t)$ . Les variations temporelles de la coordonnée généralisée  $\Sigma\Phi(t)$  correspondant aux variations de température imposées représentées Fig. 3 peuvent être considérées comme la superposition d'un régime quasi-stationnaire dans lequel  $\Sigma\Phi(t)$  est proportionnel à  $\Delta T(t)$  et d'un régime transitoire de forte amplitude pour les valeurs faibles du temps de montée. L'échange d'entropie avec le monde extérieur est alors représenté par le seul terme  $J_2$  [puisque  $\Delta\Phi(t) = 0$ ]; la relation (6) se met donc sous la forme

$$J_2 = D_1 + D_2 + D_{12} = D_1 \left[ 1 + \frac{D_2}{D_1} + \frac{D_{12}}{D_1} \right].$$

Introduisons l'intégrale

$$D'_2 = \int_{t_0}^t \frac{\Delta T^2}{T_1 T_2} dt$$

de sorte que d'après la relation (6)  $D_1 = D'_2/R$ , il vient

$$J_2 = \frac{D'_2}{R} \left[ 1 + \frac{D_2}{D_1} + \frac{D_{12}}{D_1} \right].$$

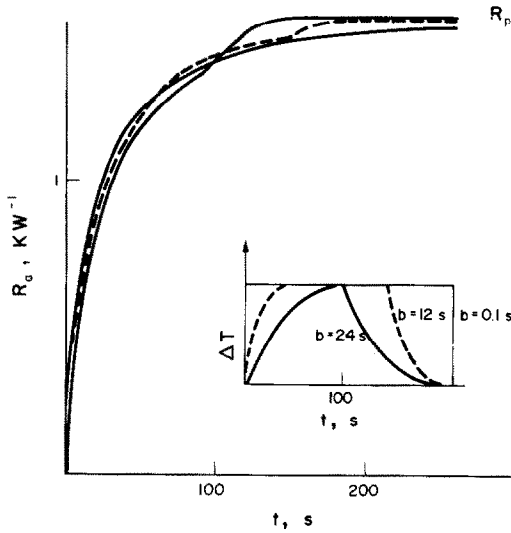


FIG. 3. Simulation des variations de la résistance apparente en fonction du temps pour un 'transfert pur'.

Introduisons une 'résistance apparente' en supposant à chaque instant le système en régime quasi-stationnaire par la relation

$$R_a = \frac{D'_2}{J_2} = \frac{1}{J_2(t)} \int_{t_0}^t \frac{\Delta T^2}{T_1 T_2} dt. \quad (13)$$

Compte tenu des définitions précédentes

$$R_a = \frac{R}{1 + \frac{D_2}{D_1} + \frac{D_{12}}{D_1}}. \quad (14)$$

La résistance apparente obtenue par traitement d'un bilan d'entropie en supposant le système en régime quasi-stationnaire prend une valeur différente de la résistance thermique effective (Fig. 3). Le terme  $D_2$  étant toujours positif, la résistance apparente est généralement inférieure à la résistance thermique mesurée en régime permanent. La résistance apparente est une fonction de transformation qui dépend du détail de la transformation. Elle est d'autant plus faible que la transformation est plus irréversible. Par contre, la résistance thermique  $R$  a une valeur déterminée de façon unique par la nature de l'échantillon.

En pratique, la génération d'entropie par conduction thermique en régime transitoire est faible vis-à-vis de l'entropie générée en régime quasi-stationnaire lorsque la durée de la transformation est supérieure ou égale à 3 constantes de temps (la constante de temps étant égale à  $RC/\Pi^2$ ). Les termes  $D_2/D_1$  et  $D_{12}/D_1$  ont alors une valeur négligeable et la résistance apparente prend une valeur sensiblement égale à la résistance thermique. Dans ces conditions, la relation (13) définit une méthode de traitement des flux et variations de température de surface permettant la détermination de la résistance thermique par calcul d'un bilan d'entropie.

### 3.3. Transfert de chaleur à température moyenne variable

Une telle transformation peut être réalisée par exemple en imposant une brusque variation de température imposée sur l'une des surfaces de l'échantillon. L'évolution est représentée par les variations temporelles des quantités  $\Delta\Phi(t)$  et  $\Sigma\Phi(t)$ . Ces coordonnées généralisées étant indépendantes [1], l'échange d'entropie avec l'extérieur s'exprime comme la superposition des échanges nécessaires à l'entretien des processus de transfert et de stockage considérés indépendamment l'un de l'autre.

De la même façon, le flux thermique local est la superposition d'une composante antisymétrique par rapport aux coordonnées d'espace (représentative du processus de transfert pur) et d'une composante symétrique représentative du processus de stockage. Il en résulte que les augmentations d'entropie par conduction thermique générées par chacun de ces processus sont indépendantes. L'ensemble de ces considérations nous amène à considérer de façon indépendante les conditions d'entretien des processus de transfert et de stockage.

Il en résulte que les relations (13) et (14) sont vérifiées même lorsque la température moyenne varie.

Ces résultats ont été vérifiés par simulation. La résistance apparente a été calculée pour des variations de température  $\Delta T(t)$  modulées en créneaux de durée variable.

Les courbes de la Fig. 4 représentent la résistance apparente en fonction de la durée du créneau d'échantillons de polystyrène (courbe A), de klégicel (courbe B) et de plexiglass (courbe C). La résistance apparente tend vers la résistance thermique pour des valeurs importantes de la durée du créneau. La convergence vers la valeur asymptotique est d'autant plus rapide que la constante de temps est faible.

### 3.4. Vérification expérimentale

Le dispositif expérimental utilisé pour vérifier les résultats précédents a été décrit en détail dans une communication précédente [6]. Deux plaques échangeuses de  $500 \times 500 \text{ mm}^2$  sont régulées aux températures  $T_1$  et  $T_2$  par deux bains thermostatés. Un sélecteur de bains à électrovannes permet de porter les deux plaques échangeuses à la même température ou d'imposer un gradient de température dans l'échantillon placé entre les plaques échangeuses. Il permet aussi de réaliser des signaux exponentiels par commutation des plaques d'un bain sur l'autre. Des variations lentes de température peuvent également être réalisées par asservissement de la température des bains à un signal de consigne variable dans le temps.

Le dispositif échantillon-fluxmètre est placé entre plaques échangeuses. Les thermofluxmètres sont des dispositifs à thermocouples de surface intégrés [7, 8]. Les expériences ont été réalisées avec des fluxmètres ayant une surface utile égale à  $12 \times 12 \text{ cm}^2$  ou  $25 \times 25 \text{ cm}^2$  comportant chacun 100 thermocouples/cm<sup>2</sup>. La sensibilité est de l'ordre de  $5 \mu\text{V/W}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ .

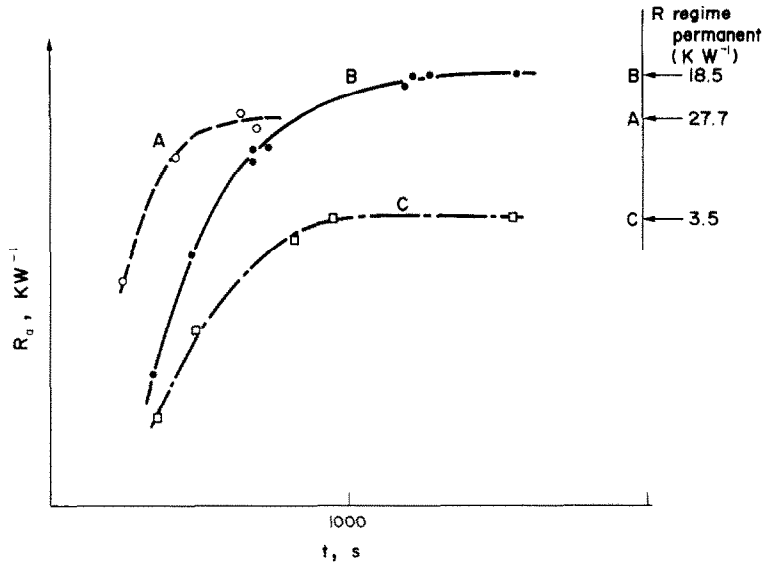


FIG. 4. Variation temporelle de la résistance apparente en fonction de la durée du créneau  $\Delta T(t)$  A polystyrène, B klégicel, C plexiglass.

La constante de temps est de l'ordre de 2 s. La capacité thermique de chaque fluxmètre est égale à  $10 \text{ JK}^{-1}$ , la résistance thermique  $0,1 \text{ K W}^{-1}$ .

Les variations de température dans le plan de mesure du flux de chaleur ont été mesurées par des thermocouples intégrés dans le fluxmètre ou par mesure des variations de résistance interne de la pile thermoélectrique à 1000 Hz [6].

Les échantillons sont des plaques de plexiglass de surface égale à  $50 \times 50 \text{ cm}^2$  et d'épaisseur comprise entre 2,3 et 10 mm. L'utilisation d'une surface de mesure beaucoup plus faible, localisée au centre de l'échantillon, permet d'éliminer les imperfections expérimentales dues aux effets de bord.

Les thermofluxmètres et capteurs de température fournissent à chaque instant des tensions électriques proportionnelles aux valeurs instantanées des flux et variations de température. Ces informations sont transmises par un multiplexeur bas niveau à un voltmètre numérique programmable. Les données sont mises en mémoire et traitées dans un ordinateur de type CBM Commodore 3032.

3.5. Mesure de l'augmentation d'entropie par conduction thermique dans un processus de stockage-déstockage de chaleur sensible

Dans une telle transformation, les deux plaques échangeuses évoluent à la même température ( $\Delta T = 0$ ). Les échanges sont décrits par la relation (12) dans laquelle  $T_1 = T_2$ . Les phénomènes de stockage-déstockage provoquent des variations de température moyenne (augmentation et diminution).

Une telle transformation est représentée Fig. 2. Les valeurs expérimentales coïncident avec le résultat des simulations. La valeur asymptotique  $J_1(\infty)$  est une fonction de transformation qui caractérise le degré d'irréversibilité de la transformation.

Pour des vitesses de variations lentes de la température des plaques échangeuses ( $dT/dt < dT/dt = \Delta\Phi/c$ ), l'échange de chaleur est pratiquement réversible. La température des plaques est égale à la température moyenne de l'échantillon et  $J_1(\infty) \rightarrow 0$ .

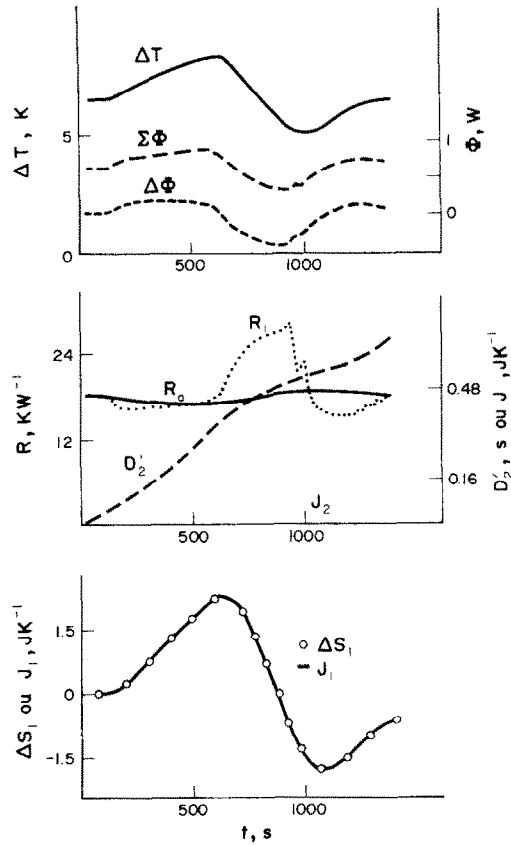


FIG. 5. Calcul des échanges d'entropie à partir des variations de flux et de température mesurée.

Tableau 1.

Epaisseur (m)	$R_a - 2R_f$ (K W <sup>-1</sup> )	$\lambda$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$(\Delta R_a/R_a)_{\text{Maxi}}$ (%)
$2,35 \times 10^{-3}$	0,72	0,193	10
$5 \times 10^{-3}$	1,57	0,188	6
$1 \times 10^{-2}$	3,45	0,175	4

Par contre, lorsque la vitesse de variation de la température imposée sur les surfaces est importante ( $dT/dt > \overline{dT}/dt = \Delta\Phi/c$ ), le processus de stockage est irréversible. Le déséquilibre entre les variations des températures superficielles et de la température moyenne fait apparaître une distribution de flux  $\phi'$  dans le matériau. L'augmentation d'entropie provoquée par la circulation de ces flux est représentée par la valeur asymptotique  $J_1(\infty)$ .

3.6. Transfert de chaleur à travers l'échantillon

Il y a 'transfert pur' lorsque la contrainte  $\Delta\Phi(t) = 0$  est vérifiée pendant toute la transformation. La température moyenne est constante et les échanges d'entropie avec le monde extérieur sont représentées par le seul terme  $J_2$ .

La condition  $\Delta\Phi(t) = 0$  est réalisée dans le cas particulier du régime permanent lorsque l'échantillon est traversé par un flux thermique uniforme et indépendant du temps. En pratique, il y a toujours des fluctuations autour du régime permanent et la contrainte  $\Delta\Phi = 0$  n'est vérifiée qu'en moyenne. Lorsque le temps d'intégration du bilan d'entropie est grand vis-à-vis du temps caractéristique des fluctuations, il est possible d'introduire une 'résistance apparente' définie par la relation (13) accessible à la mesure à partir du bilan d'entropie.

Une telle transformation est représentée Fig. 5. Les fluctuations autour du régime permanent sont suffisamment lentes pour que le système puisse être considéré comme étant en régime quasi-stationnaire et la résistance apparente calculée par la relation (13) converge vers la valeur de la résistance thermique. La relation (13) définit une méthode de traitement des flux et variations de température permettant la détermination de la résistance thermique par calcul d'un bilan d'entropie. La durée d'intégration doit être telle que la relation

$$\int_{t_0}^T \Delta\Phi \, dt = 0$$

soit vérifiée. Les résultats obtenus sur des échantillons de plexiglass et de polystyrène coïncident avec les résultats obtenus par d'autres méthodes.

4.7. Mesure de résistance thermique en régime quasi-stationnaire

Les résultats théoriques et expérimentaux précédents conduisent à une nouvelle méthode de mesure de la résistance thermique par traitement d'un bilan

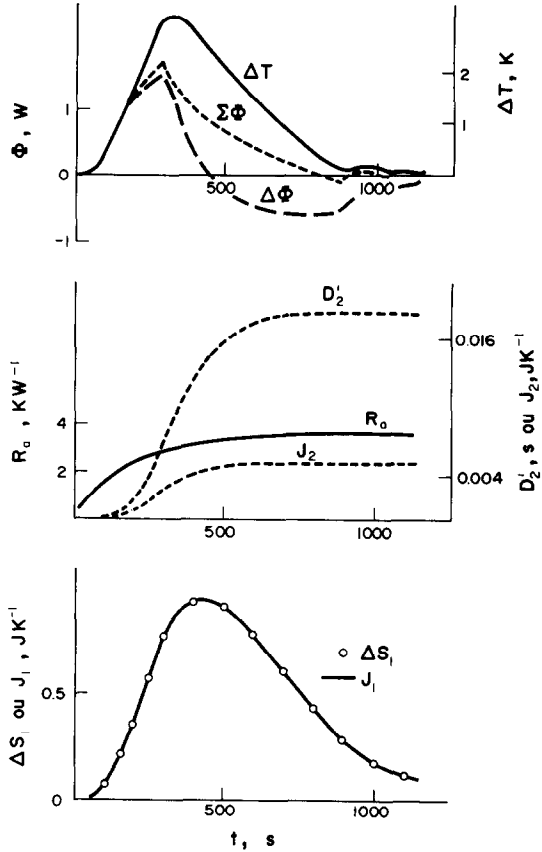


FIG. 6. Application à la mesure de la résistance apparente d'une paroi en régime variable.

d'entropie en régime quasi-stationnaire [défini par  $2 \Delta T(t) = R\Phi(t)$ ].

La transformation doit être à variations suffisamment lentes pour que l'augmentation d'entropie en régime transitoire est faible par rapport à l'augmentation d'entropie en régime quasi-stationnaire. Dans ces conditions, la résistance apparente converge vers la résistance thermique. Les résultats obtenus sur des échantillons de plexiglass sont représentés dans le Tableau 1.

La précision a été calculée pour un nombre de mesures supérieur à 10 pour les échantillons de 5 et 10 mm d'épaisseur, supérieur à 5 pour le plexiglass de 2,35 mm d'épaisseur. Notons également que la résistance située entre les plans de mesure des fluxmètres et l'échantillon, soit  $2R_f = 0,16 \text{ K W}^{-1}$  est mesurée au cours de chaque expérience, et doit être retranchée de la valeur de  $R_a$ .

La valeur de la résistance thermique mesurée par moyenne en régime permanent nous a conduit à  $\lambda = 0,19 \pm 0,01 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Cette valeur est compatible avec les résultats de la littérature  $\lambda = 0,175 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  en moyenne.

4. CONCLUSION

Pour un système en déséquilibre thermique, il est possible d'exprimer les échanges d'énergie et d'entropie

pie avec l'extérieur en fonction des flux thermiques et variations de températures superficiels. L'échange d'énergie interne s'exprime uniquement en fonction des flux superficiels. La combinaison  $\Delta\Phi$  est une coordonnée généralisée qui représente les variations instantanées du stockage de chaleur sensible quelle que soit l'évolution du système. L'échange d'entropie avec l'extérieur  $J_1 - J_2$  permet d'entretenir deux types de processus: le stockage de chaleur sensible et la dissipation interne par conduction thermique. Le bilan d'entropie permet de représenter la dissipation instantanée; le traitement de ce bilan ne conduit à des résultats simples et exploitables que dans le cas particulier des transformations cycliques. Les résultats théoriques ont été vérifiés sur des échantillons homogènes. Les développements possibles de la méthode du traitement des flux et variations de températures superficiels sont nombreux. Un développement particulièrement intéressant consisterait à étendre les résultats obtenus aux matériaux multicouches.

**Remerciements**—Les auteurs remercient les rapporteurs anonymes qui ont contribué par leurs commentaires et leurs propositions à valoriser le contenu de la communication.

## REFERENCES

1. P. Thery, J. P. Dubus et F. Wattiau, Détermination de la diffusivité et de la chaleur massique par traitement d'une évolution thermocinétique transitoire, *Int. J. Heat Mass Transfer* **23**, 562–566 (1980).
2. S. R. Groot et P. Mazur, *New Equilibrium Thermodynamics*. North Holland (1962).
3. M. A. Biot, Thermoelasticity and irreversible thermodynamics, *J. Appl. Phys.* **27**, 240–253 (1956).
4. M. A. Biot, *Variational Principles in Heat Transfer*. Oxford University Press (1980).
5. A. Bejan, A general variational principle for thermal insulation system design, *Int. J. Heat Mass Transfer* **22**, 219–228 (1979).
6. P. Thery, B. Duthoit et J. Pauquet, Propriétés thermo-électriques des systèmes à deux couches minces superposées—Application à la mesure des flux thermiques, *Revue Phys. Appl.* **15**, 741–747 (1980).
7. B. Duthoit et P. Thery, Caractérisation d'un bicouche par traitement d'évolutions thermocinétiques, *Entropie* **92**, 49–55 (1980).
8. P. Thery et J. C. Marechal, Etude et caractérisation d'un nouveau fluxmètre calorifique, *J. Phys. E. Sci. Instrum.* **13**, 859–865 (1980).

## METHOD FOR MEASURING THE RATE OF ENTROPY GENERATION, APPLICATION FOR DETERMINING EFFECTIVE THERMAL RESISTANCE UNDER TRANSIENT STATE CONDITIONS

**Abstract**—It is shown that simultaneous measurements of heat flows and surface temperature variations on the front and rear faces of a wall allows the evaluation of the instantaneous value of the entropy exchange with the surroundings. Consequently the rate of entropy production can be computed from experimental data for cyclic transformations. The rate of entropy production due to internal temperature gradients is evaluated for two basic processes: heat storage and heat transfer through a wall suddenly heated to a given constant temperature on one side. Instantaneous values of entropy balance were simulated during transient evolution. For cyclic transformations of durations large respectively to three times constant of the wall, the rate of entropy production equals the internal dissipation due to the steady flow passing through the wall. By equating the internal dissipation function value to the entropy exchange with the surroundings, it is possible to determine an effective thermal resistance for the realized cyclic transformation.

## MESSUNG DES EFFEKTIVEN THERMISCHEN WIDERSTANDS EINER HOMOGENEN WAND DURCH AUSWERTUNG EINER ENTROPIEBILANZ IM INSTATIONÄREN FALL

**Zusammenfassung**—Die Auswertung simultaner Messungen der Wärmeströme und der Änderungen der Oberflächentemperatur an Vorder- und Rückseite einer homogenen Wand gestattet es, den momentanen Wert des Entropieaustausches mit der Umgebung zu ermitteln. Der aus periodischen Änderungen berechnete Entropieaustausch erlaubt es, die innere Entropiezunahme durch Wärmeleitung zu bestimmen. Diese Methode der Auswertung wird zur Bestimmung der inneren Verluste der beiden grundlegenden Vorgänge, Wärmespeicherung in der Wand und Wärmetransport durch die Wand, angewandt. Der Entropieaustausch wurde zu jedem Zeitpunkt für den instationären Fall simuliert, in dem der Wand auf einer Seite schnell eine Temperaturänderung aufgeprägt und dann das thermische Gleichgewicht wieder hergestellt wurde. Für harmonische Temperaturänderungen mit großer Periode, bezogen auf die dreifache Zeitkonstante der Wand, nähert sich die Entropieerzeugungsrate durch Wärmeleitung der im stationären Fall vorliegenden inneren Dissipation. Durch Gleichsetzen des Wertes der inneren Dissipationsfunktion und des Entropieaustausches mit der Umgebung ist es möglich, einen effektiven thermischen Widerstand für die durchgeführten periodischen Änderungen zu bestimmen.



**МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ЭНТРОПИИ. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ  
МЕТОДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ  
В НЕСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ**

**Аннотация** — Показано, что одновременное измерение тепловых потоков и изменений температуры на поверхности переднего и заднего торцов стенки позволяет определить мгновенное значение энтропии при теплообмене стенки с окружающей средой. Следовательно, интенсивность прироста энтропии можно рассчитать по экспериментальным данным, полученным для циклических превращений. Интенсивность прироста энтропии, обусловленного внутренними температурными градиентами, рассчитана с учетом двух основных процессов: аккумуляции тепла и теплопереноса через стенку при внезапном нагреве одной из ее поверхностей до заданной температуры. Мгновенные значения баланса энтропии моделируются для нестационарного процесса. При циклических превращениях, длительность которых примерно в три раза выше, чем характерное время стенки, скорость производства энтропии равна величине внутренней диссипации энергии за счет стационарного потока тепла через стенку. Приравнивая значения функции внутренней диссипации и величины обмена энтропией с окружающей средой, можно определить эффективное термическое сопротивление при циклических превращениях.