

# Transferts couples de chaleur et de masse dans des matériaux consolidés utilisés en génie civil

B. PERRIN et R. JAVELAS

Laboratoire de Génie Civil, Institut National des Sciences Appliquées et Université Paul Sabatier,  
Avenue de Rangueil, 31077 Toulouse Cedex, France

(Reçu le 11 Mars 1986 et sous forme définitive le 16 Mai 1986)

**Résumé**—La méthode de mesure de l'humidité des matériaux basée sur la détermination de la conductivité apparente est présentée et ses principales caractéristiques discutées. Les coefficients de diffusion de l'humidité dus à un gradient de teneur en eau et de température sont mesurés puis utilisés au calcul numérique d'une expérience de séchage. Les résultats sont comparés à l'expérience puis analysés. Nous constatons la difficulté à caractériser les flux de masse superficiels à l'aide d'un coefficient unique lié au coefficient d'échange de chaleur. Nous procédons enfin à quelques bilans enthalpiques simples montrant l'intérêt de la prise en compte de l'humidité dans les transferts à travers les parois.

## 1. INTRODUCTION

LORSQUE dans le domaine du génie civil on cherche à prendre en compte les phénomènes de transferts d'humidité dans les parois lors des bilans énergétiques des locaux, on est conduit à faire immédiatement un certain nombre de constatations telles que:

La mauvaise connaissance des matériaux due à l'absence de données complètes relatives à leurs caractéristiques hygrothermiques et leurs variations avec la température et l'humidité.

La difficulté de la mesure des humidités internes due à la nature consolidée des matériaux.

Le peu de tentatives de justification des modèles théoriques pour des matériaux auxquels la porosité, parfois très fine, peut conférer un caractère hygroscopique.

Pour deux types de matériaux couramment utilisés en génie civil, un mortier et une terre cuite, nous avons mené une expérimentation complète. Elle a consisté à mesurer les coefficients de diffusion dus aux gradients de température et d'humidité en évaluant la part des transferts liquide et vapeur ainsi que celle de la température.

Nous avons alors comparé une modélisation complète à l'expérience. L'étude de sensibilité des paramètres conduit à des constatations concernant les phénomènes d'évaporation à la surface des matériaux.

Enfin nous avons quantifié, simplement, l'intérêt de la prise en compte des transferts d'eau sur les échanges enthalpiques, dans le temps, à travers les parois, dans quelques cas simples.

## 2. METHODE DE MESURE DES TENEURS EN EAU

### 2.1. Principe de fonctionnement [1-3]

Pour déterminer les teneurs en eau des matériaux, nous utilisons la méthode de la sonde à choc mono-

filaire. Elle consiste à mesurer la conductivité apparente du milieu. La teneur en eau s'obtient par utilisation de la loi de correspondance conductivité teneur en eau.

La sonde elle-même se compose d'une tige chauffante d'un diamètre de 1 mm sur laquelle est fixé un thermocouple d'un diamètre de 0,5 mm. L'ensemble est placé dans le milieu à étudier. Lorsque l'on fait passer un courant dans la tige chauffante, l'évolution de la température sur celle-ci est caractéristique du milieu. La durée du créneau de puissance de l'ordre de 1 min provoque une élévation de température sur la tige chauffante n'excédant pas 3 à 4 °C.

Le dispositif est placé dans les matériaux de deux façons différentes: pour les mortiers directement au moment du gâchage de l'éprouvette, pour la terre cuite il est nécessaire de réaliser un avant-trou d'un diamètre de 3 mm. Le bon contact thermique entre la sonde et le matériau est réalisé grâce à un alliage métallique à bas point de fusion (Fig. 1).

Nous avons effectué une étude théorique complète du transfert de chaleur à partir de la sonde chauffante en prenant en compte les résistances thermiques de surface.

Dans les deux configurations la température mesurée sur la sonde est, pour des temps grands devant  $r_2^2/a_2$ , de la forme [4-6]

$$\theta = A \ln t + B + \frac{C}{t} (\ln t + D) + f\left(\frac{1}{t^3}\right)$$
$$t \gg \frac{r_2^2}{a_2} \quad (1)$$

$r_2$ : rayon global sonde + enrobage éventuel

$a_2$ : diffusivité thermique du milieu.

## NOMENCLATURE

$c_g$	chaleur spécifique du gaz
$C_p$	chaleur spécifique du milieu poreux rapportée à l'unité de masse sèche
$D_v$	coefficient de diffusion de la vapeur dans l'air
$f(w)$	terme prenant en compte l'influence du squelette solide sur la diffusion de la vapeur
$h_c$	coefficient d'échange convectif
$h_m$	coefficient d'échange de masse
$L_v$	chaleur de vaporisation de l'eau
$\dot{m}_c$	débit masse d'eau
$p$	pression totale de la phase gazeuse
$p_v$	pression partielle de la vapeur d'eau
$p_{vs}$	pression de vapeur saturante

$q_v$	densité de flux de masse vapeur
$T$	température en Kelvin.

## Symboles grecs

$\varepsilon'$	taux de changement de phase
$\lambda$	conductivité thermique
$\rho_g$	masse volumique de la phase gazeuse
$\rho_l$	masse volumique de la phase liquide
$\rho_0$	masse volumique du milieu poreux sec
$\phi$	humidité relative de l'air
$\psi$	succion.

## Indices

a	dans l'ambiance
s	à la surface du matériau.

$A, B, C, D$  sont des paramètres faisant intervenir les caractéristiques géométriques, électriques, thermiques de la sonde, de l'enrobage, du milieu étudié.

Dans l'approximation de temps utilisée, la fonction  $f(1/t^3)$  est une somme de termes très faibles.

Nous avons montré que, dans un certain intervalle de temps, l'expression de  $\theta$  se réduit à [7]

$$\theta = \frac{Q}{4\pi\lambda_2} \ln t + \frac{Q}{4\pi\lambda_2} \left( \ln \frac{4a_2}{r_2^2} - \gamma - \frac{2\lambda_2}{r_2} R \right) \quad (2)$$

$Q$  = puissance dissipée par unité de longueur;  $R$  = résistance de contact sonde ou enrobage matériau;  $a_2, \lambda_2$  diffusivité et conductivité thermiques du milieu étudié;  $\gamma$  constante d'Euler = 0,5772.

La conductivité s'obtient donc simplement à partir de la pente de la droite  $\theta = f(\ln t)$ .

La conductivité mesurée est, en fait, une conductivité apparente. Aux transferts purement conductifs viennent s'ajouter les transferts latents dus au changement de phase ainsi que les transferts d'énergie sensible

dus aux phénomènes de convection liquide ou vapeur. Ces derniers sont, en fait, toujours négligés. Si on considère l'équation de transfert de chaleur

$$\rho_0 C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - L_v \frac{\partial q_v}{\partial x} \quad (3)$$

$\lambda$  représente ici un terme de conduction pure. Lorsque l'on assimile l'ensemble du phénomène de transfert à une conduction, on caractérise le matériau par la conductivité apparente  $\lambda_{app}$  telle que [8-10]

$$\rho_0 C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{app} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (4)$$

soit

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{app} \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - L_v \frac{\partial q_v}{\partial x} \quad (5)$$

ou

$$\lambda_{app} \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\partial T}{\partial x} - L_v q_v \quad (6)$$

soit encore

$$\lambda_{app} = \lambda + f(w) \cdot D_v \frac{p}{p - p_v} \frac{M_v}{RT} L_v \frac{\partial p_v}{\partial T} \quad (7)$$

Afin d'apprécier l'influence du terme diffusif dans la conductivité apparente, nous avons mesuré la variation de  $\lambda_{app}$  avec la température pour les matériaux secs et saturés. On réduit ainsi le transfert à la conduction.

La décroissance de la conductivité en fonction de la température dans les états sec et saturé, observée sur les Figs. 2 et 3 s'explique par le comportement des phases solides du matériau dont la conductivité présente aussi, dans ce domaine de température une légère décroissance [7, 11].

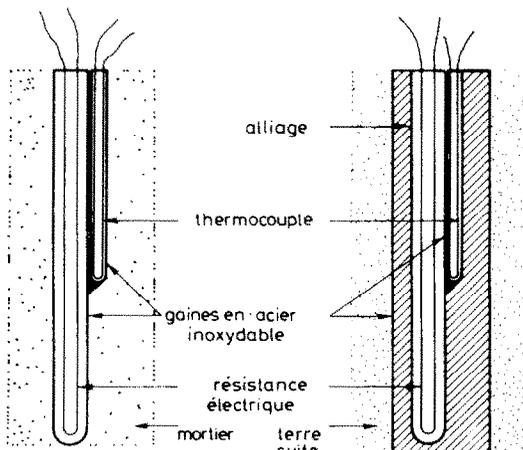


FIG. 1. Positionnement des sondes dans les matériaux.

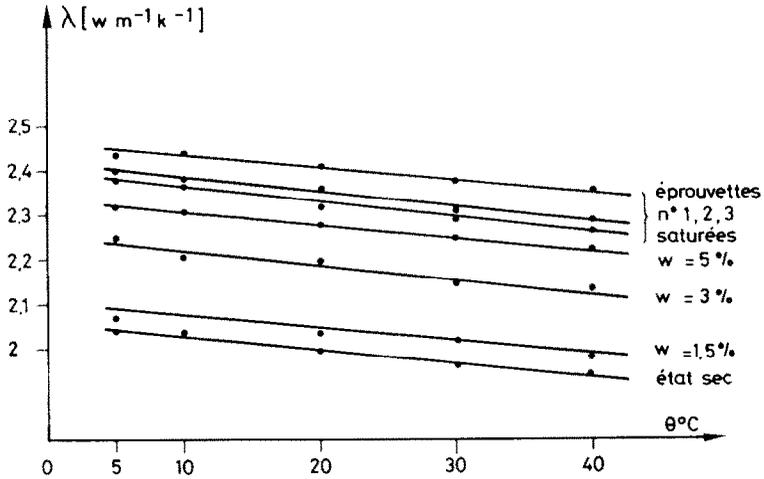


FIG. 2. Mortier.

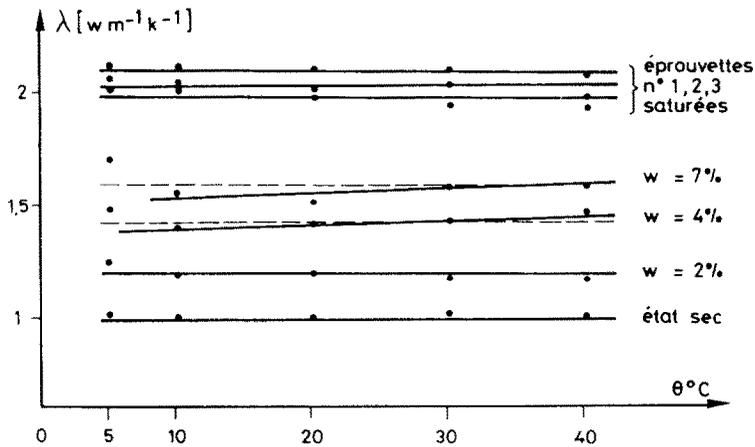


FIG. 3. Terre cuite.

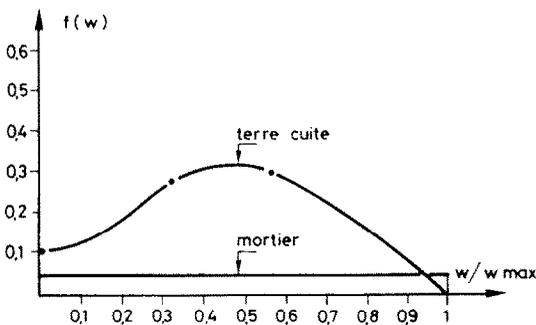


FIG. 4. Variation de  $f(w)$ .

L'allure des courbes  $\lambda_{app} = f(\theta)$  pour des teneurs en eau intermédiaires du mortier et de la terre cuite, montre l'influence du terme diffusif:

- négligeable pour le mortier
- faible pour la terre cuite.

Ces divers résultats permettent donc d'approcher le terme  $f(w)$  prenant en compte l'influence de squelette solide sur la diffusion de la vapeur.

La Fig. 4 montre sa variation.

### 2.2. Caractéristiques principales

La relation conductivité apparente-teneur en eau s'obtient par étalonnage. Une éprouvette est séchée par paliers, la teneur en eau supposée uniforme est déterminée par pesée. La Fig. 5 montre l'évolution de la conductivité apparente avec la teneur en eau massique  $w$  pour les deux matériaux.

Le très bonne reproductibilité des mesures permet d'atteindre une incertitude due aux erreurs aléatoires sur  $\lambda_{app}$  de l'ordre de 2 à 3%.

Le volume de matériau concerné par la mesure est un cylindre coaxial à la sonde et dont le diamètre n'excède pas 10 mm.

Les courbes de la Fig. 6 montrent la variation de l'incertitude relative sur la détermination de la teneur en eau.

### 3. DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES HYGROTHERMIQUES DES MATERIAUX

Lorsque l'on néglige le gradient de pression de la phase gazeuse, ainsi que l'effet de la pesanteur, simplification tout à fait légitime dans les parois

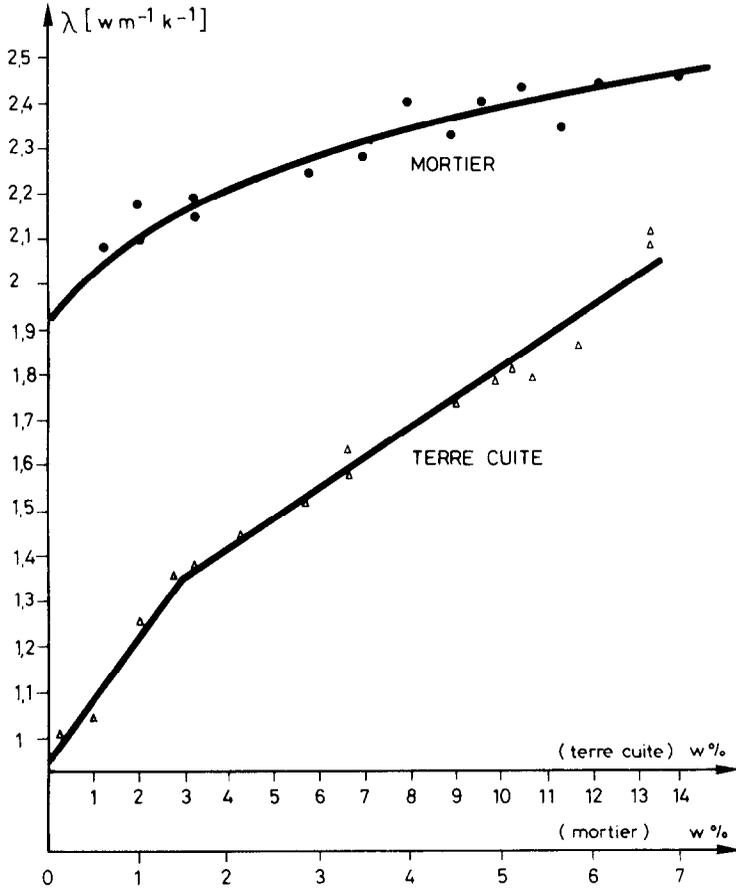


FIG. 5. Evolution de la conductivité avec la teneur en eau.

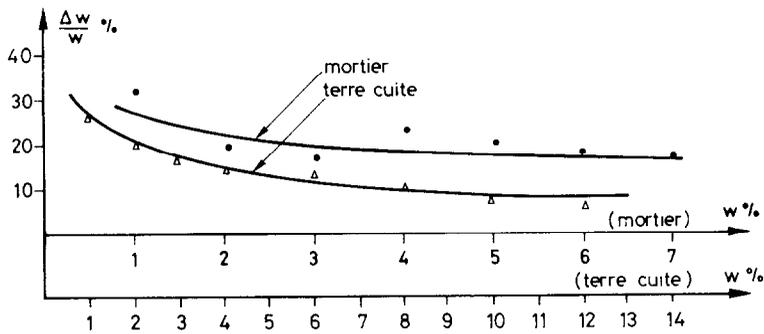


FIG. 6. Incertitude de mesure.

des bâtiments compte tenu des températures et des succions que l'on rencontre. Le système d'équations décrivant les transferts s'exprime par [12-16]

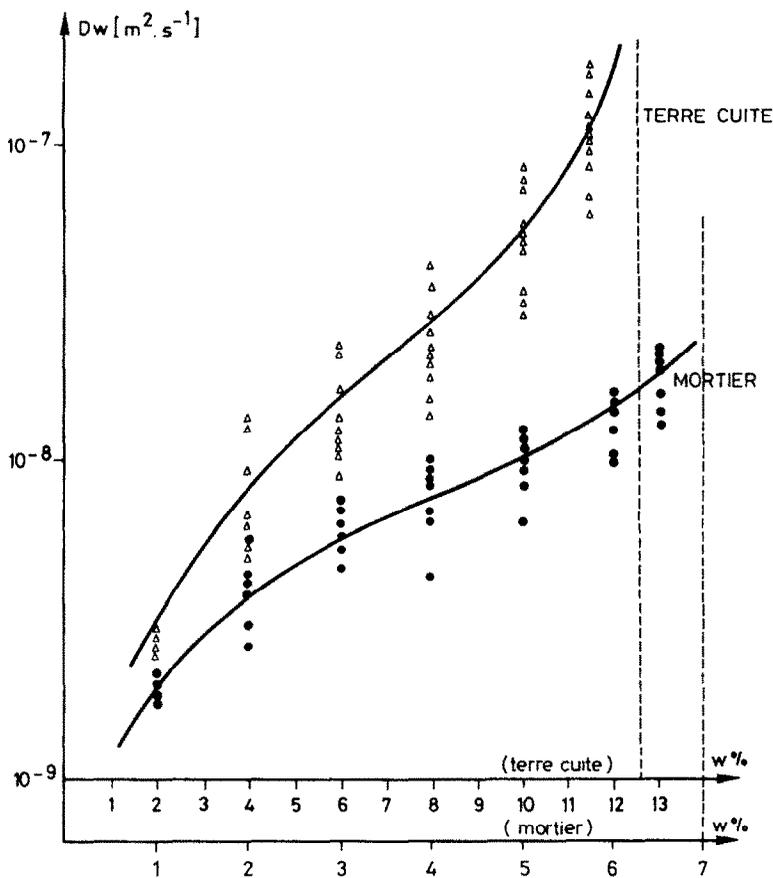
$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla(k_{11} \nabla T + k_{12} \nabla w) \tag{8}$$

$$\rho_0 C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k_{21} \nabla T + k_{22} \nabla w). \tag{9}$$

Si on se limite, de plus, au transfert unidirectionnel, on aura

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_w \frac{\partial w}{\partial x} + D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) \tag{10}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho_0 C_p} \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{L}{\rho_0 C_p} \frac{\partial}{\partial x} (q_v). \tag{11}$$


 FIG. 7. Coefficients de diffusion  $D_w$  mortier et terre cuite.

### 3.1. Détermination des coefficients de diffusion $D_w$

Le coefficient  $D_w$  est la somme d'un coefficient de transport liquid  $D_{w1}$  et d'un coefficient de transport vapeur  $D_{wv}$ :

$$D_w = D_{wv} + D_{w1}. \quad (12)$$

Il est possible de déterminer les coefficients  $D_{w1}$  par imbibition des matériaux sous phase liquide, en les mettant simplement en contact avec une nappe d'eau. Le suivi des profils hydriques déterminés par la méthode décrite précédemment et leur intégration dans l'espace permettent d'évaluer les débits masse d'eau  $\dot{m}_e$  dans une section droite de teneur en eau moyenne  $w$ . On obtient alors  $D_{w1}$  par la relation

$$D_{w1}(w_0) = \frac{\dot{m}_e}{\rho_0(\partial w/\partial x)}. \quad (13)$$

La bonne concordance des bilans massiques déterminés expérimentalement par pesée globale ou par calcul à partir de l'intégration des profils hydriques valide la justesse de ces derniers.

La Fig. 7 montre des résultats types de ces mesures.

La grande difficulté est d'évaluer les coefficients de diffusion au voisinage des teneurs en eau les plus faibles ou les plus élevées.

Dans le domaine des teneurs en eau les plus faibles ce sont les transferts en phase vapeur qui sont prépondérants. Nous avons le coefficient par le calcul à partir de la relation

$$D_{wv} = D_v \frac{\rho_g f(w)}{\rho_0} \frac{\partial \omega_v}{\partial w} \quad (14)$$

soit

$$D_{wv} = f(w) D_v \frac{P_{vs}}{\rho_0} \left( \frac{M_v}{RT} \right)^2 g \phi \left( \frac{\partial \psi}{\partial w} \right) \quad (15)$$

$\omega_v$  est la fraction massique de vapeur:  $\omega_v = m_v/(m_v + m_a)$ .

La succion  $\psi$  a été déterminée partiellement à partir des isothermes de sorption.

Pour les teneurs en eau les plus élevées, nous avons cherché l'allure de la courbe qui permet, par un calcul numérique simple, aux différences finies, de retrouver l'allure des courbes expérimentales d'imbibition.

La Fig. 8 montre les résultats globaux des mesures et des calculs.

Le coefficient de diffusion global  $D_w$  a été pris égal au coefficient vapeur pour les faibles teneurs en eau.

*Influence de la température.* L'ensemble de cette procédure a été renouvelée pour différents niveaux de température. Nous avons choisi d'explorer le domaine

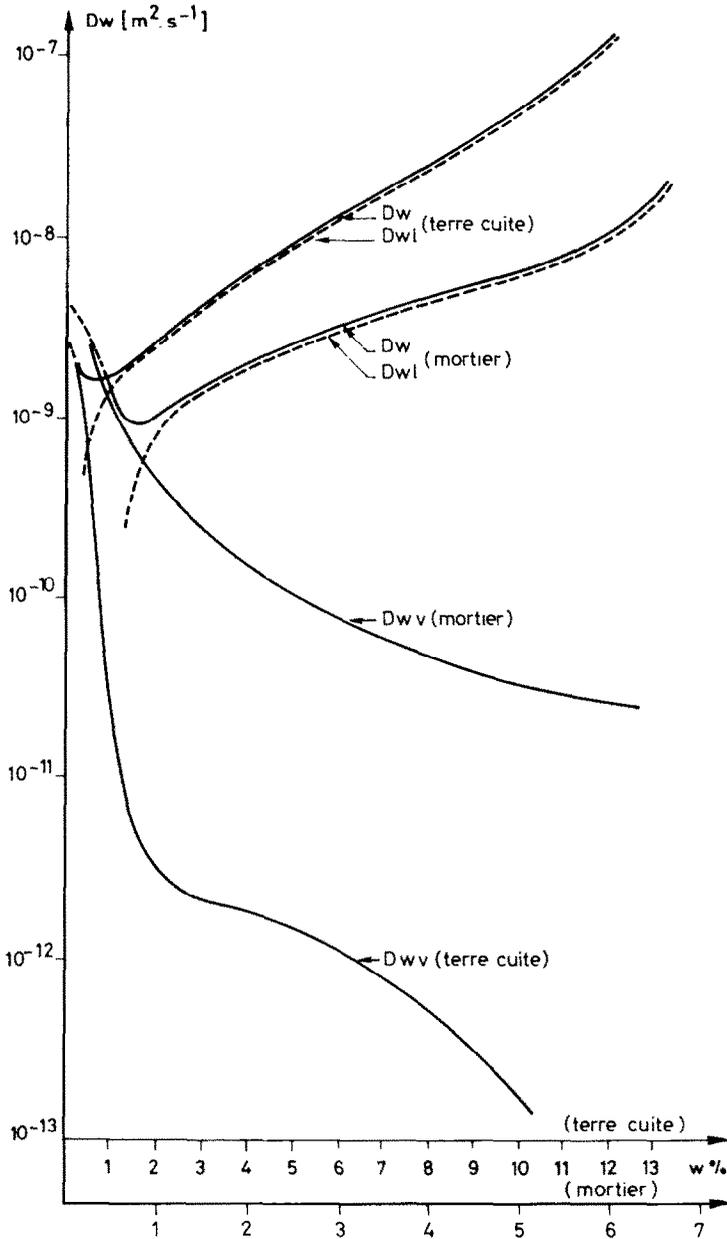


FIG. 8. Coefficients de diffusion liquide et vapeur, mortier et terre cuite.

$5 < \theta < 40^\circ\text{C}$  puisqu'il est couramment rencontré dans le génie civil. Il ne nous a pas été possible expérimentalement de mettre en évidence un effet de température sur les coefficients  $D_w$  pour tout le domaine de teneur en eau accessible à l'expérience.

Pour les teneurs en eau les plus fortes nous avons, aux différentes températures, repris le calcul numérique simple aux différences finies (méthode de Crank-Nicholson) et cherché l'allure de la courbe des coefficients de diffusion  $D_w$  permettant de reproduire au mieux les courbes expérimentales. La Fig. 9 montre un exemple de la comparaison des évolutions des teneurs en eau mesurées par chaque sonde, dans le temps, avec les courbes calculées.

Cette procédure confirme l'influence non décelable de la température sur  $D_w$  pour tout le domaine de teneur en eau du mortier. La courbe de la Fig. 10 montre l'influence de  $T$  sur le coefficient  $D_w$  au voisinage de la saturation de la terre cuite.

### 3.2. Détermination des coefficients $D_T$

Le principe de détermination expérimentale de  $D_T$  consiste à attendre l'équilibre hydrique du matériau placé sous gradient de température. Le débit masse d'humidité nul en chaque point permet d'écrire

$$\dot{m}_e = -\rho_0 \left( D_w \frac{\partial w}{\partial x} + D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (16)$$

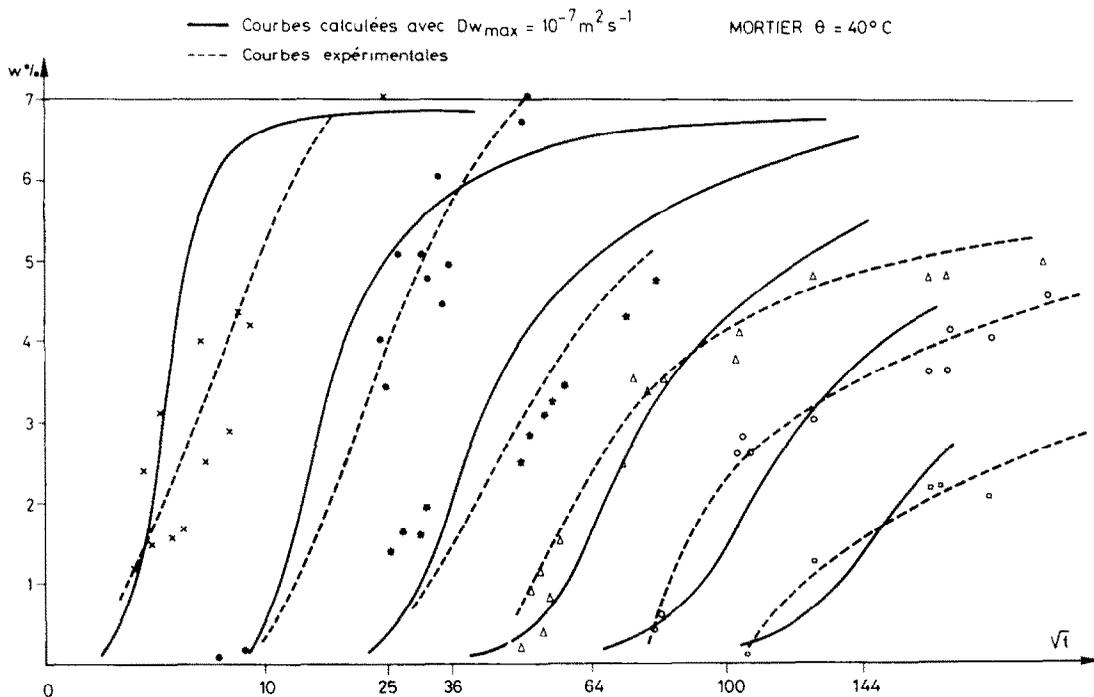


FIG. 9. Comparaison courbes calculées et expérimentales.

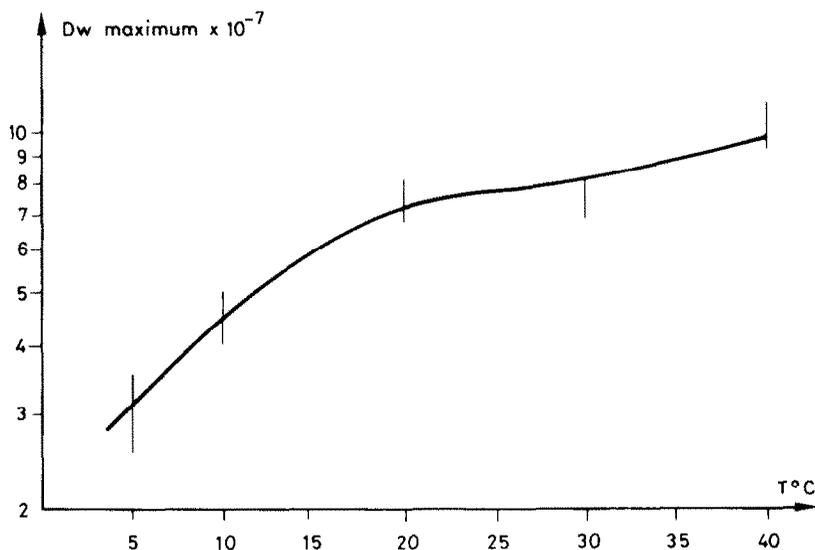


FIG. 10. Influence de la température sur le coefficient  $D_w$  de la terre cuite au voisinage de la saturation.

d'où

$$D_T = - \frac{D_w(\partial w/\partial x)}{\partial T/\partial x} \tag{17}$$

Nous avons calculé de plus ce coefficient à partir des relations approchées

$$D_{T1} = \frac{\rho_1 k_1 g}{\rho_0 v_e} \frac{\partial \psi}{\partial T} \tag{18}$$

$$D_{Tv} = f(w) \cdot D_v \frac{P}{p - P_v} \left( \frac{M_v}{RT} \right)^2 \frac{P_{vs}}{\rho_0} \phi \frac{L_v}{T} \tag{19}$$

Sachant que

$$D_T = D_{T1} + D_{Tv} \tag{20}$$

Les Figs. 11 et 12 montrent l'ensemble des résultats. Ces expériences semblent mettre en évidence un écart entre les coefficients  $D_T$  calculés et expérimentaux. Ce type de constatation déjà effectué par Crausse [9] pourrait être dû à un calcul par défaut des termes  $D_{Tv}$ . C'est, en effet, le terme vapeur qui conditionne pour une grande part le niveau du coefficient  $D_T$  calculé.

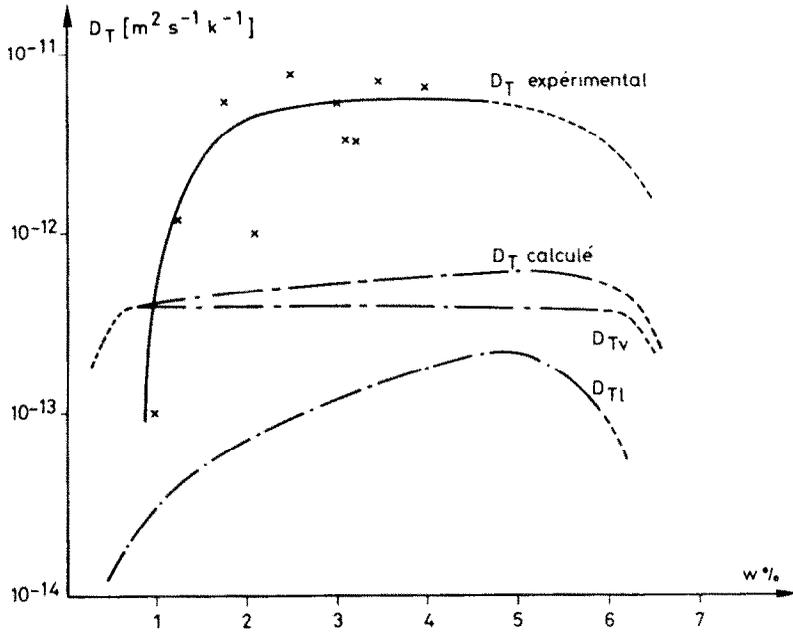


FIG. 11. Mortier.

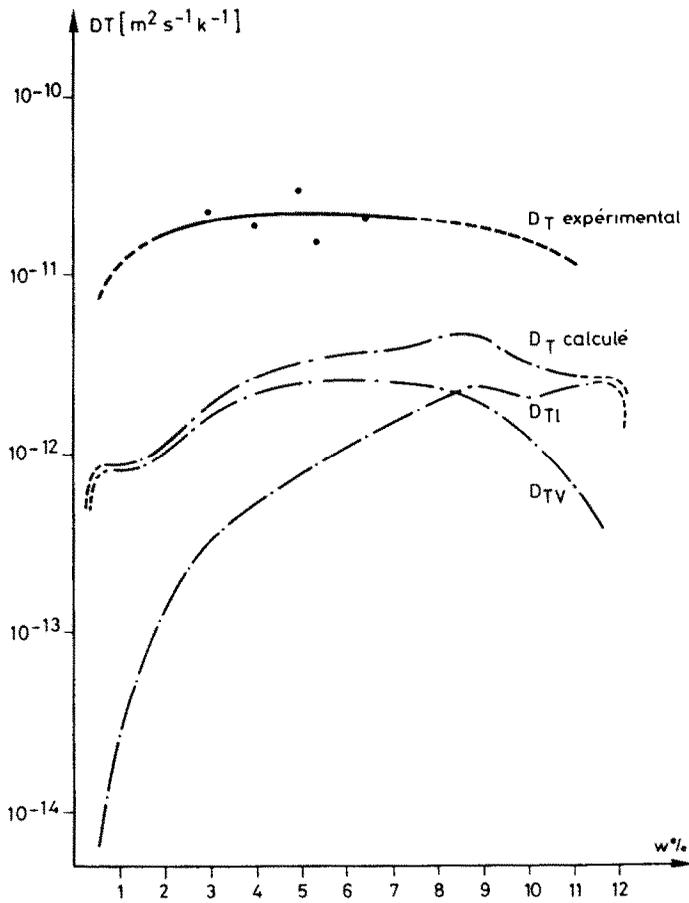


FIG. 12. Terre cuite.

4. COMPARAISON CALCUL EXPERIENCE

4.1. Procédure de calcul numérique

Nous avons procédé à un calcul aux éléments finis en utilisant la méthode de la formulation variationnelle faible et en suivant le principe de Galerkin, ce qui nous conduit à écrire le système d'équations de transfert de chaleur et de masse sous la forme

$$\sum_i C_i^1 j W_i + \sum_i C_i^2 j T_i + \sum_i C_i^3 j \frac{dw_i}{dt} = 0 \quad (21)$$

$$\sum_i C_i^4 j T_i + \sum_i C_i^5 j \frac{dw_i}{dt} + \sum_i C_i^6 j \frac{dT_i}{dt} = 0 \quad (22)$$

où les termes  $w_i$  et  $T_i$  représentent teneur en eau et température au noeud  $i$  du milieu et à l'instant  $t$ , les coefficients  $C_i^k j$  sont fonction des caractéristiques hygrothermiques du milieu.

La discrétisation du temps se fait en utilisant la méthode aux différences finies de Crank-Nicholson.

Les conditions aux limites s'expriment en écrivant la continuité des flux de masse et de chaleur par les relations

$$\rho_0 \left( D_w \frac{\partial w}{\partial x} + D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) = h_m \left[ \frac{P_{vs}(T_s)}{T_s} \phi_s - \frac{P_{vs}(T_a)}{T_a} \phi_a \right] \quad (23)$$

$$h_c (T_s - T_a) = \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + (\epsilon' - 1) L_v \rho_0 \left( D_w \frac{\partial w}{\partial x} + D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (24)$$

4.2. Conditions d'environnement réalisées

Des éprouvettes des matériaux décrits précédemment ont été placées, par deux faces opposées, au contact de deux ambiances à différentes températures,

humidités et vitesses d'écoulement. Nous avons d'une part, suivi expérimentalement l'évolution des profils hydriques et des températures au cours du temps et mené, d'autre part, une simulation numérique complète.

L'étude de sensibilité des paramètres que nous avons réalisée permet d'apprécier l'aptitude du modèle à reproduire l'expérience en donnant aux différentes grandeurs l'ensemble des valeurs numériques obtenues expérimentalement et en faisant varier celles-ci autour de leur domaine d'incertitude.

Cette étude est rendue compliquée par l'interdépendance de tous les paramètres. Afin de simplifier la démarche nous avons tout d'abord cherché l'influence du coefficient d'échange de masse  $h_m$ . Ce terme n'a fait l'objet d'aucune estimation directe. Nous l'avons simplement évalué par l'intermédiaire du coefficient d'échange convectif  $h_c$  et en admettant l'hypothèse de Lewis

$$h_m = \frac{h_c}{\rho_g c_g} \quad (25)$$

Sur la Fig. 13 nous avons représenté l'évolution expérimentale des teneurs en eau dans le mortier au voisinage de la face de contact avec l'une des ambiances. Les conditions d'environnement sont

- coefficient d'échange convectif  $h_c \approx 20 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- température d'air  $\theta = 5^\circ\text{C}$
- humidité relative  $\phi = 80\%$ .

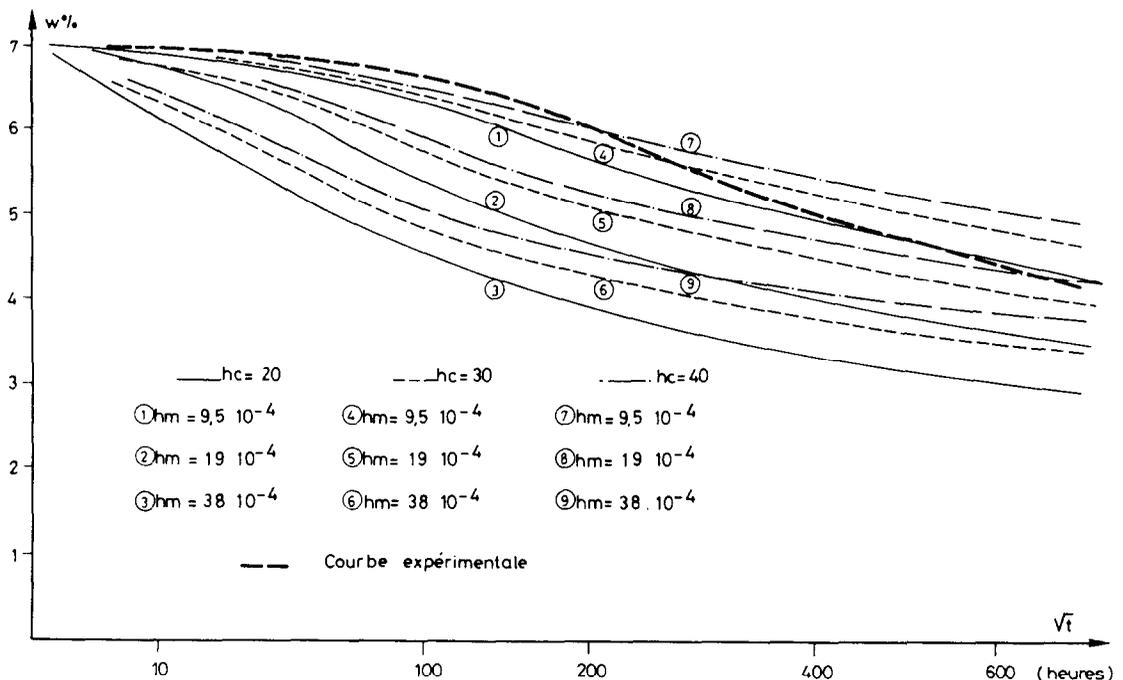
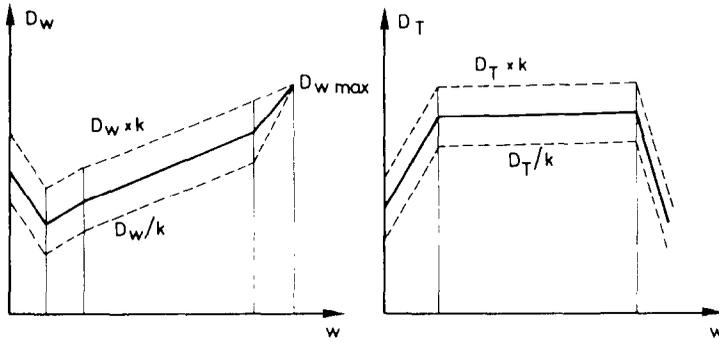


FIG. 13. Mortier. Comparaison, calcul, expérience.

FIG. 14. Domaines et variation de  $D_w$  et  $D_T$ .

Le couple des valeurs des coefficients  $h_c$ ,  $h_m$  permettant de reproduire au mieux, par le calcul, les courbes expérimentales sont de l'ordre de

$$\begin{aligned} h_m &\simeq 9,5 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1} \\ h_c &\simeq 20 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}. \end{aligned}$$

Le rapport  $h_m/h_c$  est de l'ordre de  $5 \times 10^{-5}$  plutôt que de  $10^{-3}$  comme le laisse prévoir l'analogie.

Si ce résultat appelle à être confirmé pour d'autres conditions expérimentales, il nous laisse cependant penser que la procédure consistant à adopter un coefficient d'échange de masse unique mérite d'être revue. L'analogie de Lewis justifiée dans le domaine capillaire est à manipuler avec prudence lorsque le matériau est plus sec. L'échange de masse à la surface doit être en partie conditionnée, dans ce dernier cas, par une couche de matériau au voisinage de la surface introduisant une résistance supplémentaire au transfert et provoquant une diminution de la valeur moyenne du coefficient  $h_m$  lors du séchage.

Pour les coefficients  $D_w$  et  $D_T$ , nous sommes partis des courbes expérimentales, puis nous les avons déplacées parallèlement à elles mêmes dans tout le domaine de teneur en eau pour le coefficient  $D_T$  et en excluant un intervalle de  $w$  au voisinage de la saturation pour  $D_w$ . La Fig. 14 montre les domaines de variations de  $D_w$  et de  $D_T$ . Cette façon de procéder permet de conserver la valeur de  $D_{w \max}$  ayant déjà fait l'objet d'un recalage numérique.

Les Figs. 15 et 16 illustrent la comparaison calcul expérience lorsque l'on fait varier les coefficients  $D_w$  et  $D_T$ . On constate que le calcul restitue le niveau de teneur en eau de la terre cuite même s'il subsiste un écart au voisinage de la surface dû à une mauvaise connaissance des flux de surface. Pour le mortier il existe un écart pour les temps les plus longs qui peut s'expliquer:

— par l'incertitude régnant autour des coefficients de transfert vapeur dont nous avons vu toute la difficulté de détermination,

— par le fait que les coefficients de diffusion ont été déterminés par imbibition hydrique et qu'il peut y avoir une différence de comportement du matériau lors d'un séchage.

## 5. BILANS ENERGETIQUES SIMPLES D'UNE PAROI

L'expérience décrite précédemment permet de connaître pour les deux matériaux l'évolution dans le temps et dans l'espace de leurs caractéristiques hygrothermiques. Il est alors possible de calculer l'influence de la prise en compte de la présence d'eau dans le milieu, ainsi que des phénomènes d'évaporation de surface, sur les échanges énergétiques entre les deux ambiances. Nous avons la configuration suivante (Fig. 17).

$\dot{m}_1$  et  $\dot{m}_2$  sont les débits masse d'eau évaporée aux deux frontières. La Fig. 18 montre leur variation dans le temps. Ces valeurs résultent du calcul numérique des profils hydriques.

Nous pouvons calculer la densité de flux d'énergie  $F$  à travers le matériau de trois façons.

(a) La conductivité est prise constante et correspond à une teneur en eau d'équilibre moyenne (procédure couramment utilisée dans les bilans énergétiques des parois): soit  $F_a$  le flux correspondant.

(b) La conductivité est liée au champ de teneur en eau et de température: soit  $F_b$  le flux correspondant.

(c) On prend en compte, en plus du cas b, le phénomène d'évaporation de surface déduit directement de la connaissance des courbes de la Fig. 18: soit  $F_c$  le flux dans ce cas.

Les différents résultats sont consignés dans le tableau ci-après.

Mortier	$\frac{F_b - F_a}{F_a} = 1,5\%$	$\frac{F_c - F_a}{F_a} = 3,6\%$
Terre cuite	$\frac{F_b - F_a}{F_a} = 26\%$	$\frac{F_c - F_a}{F_a} = 36,6\%$

Ces calculs indicatifs, devant être généralisés à d'autres configurations et à d'autres matériaux, montrent le comportement très différents des milieux et l'incidence tout à fait non négligeable de la prise en compte de la présence et du transfert de l'humidité sur le flux d'énergie à travers une terre cuite.

## 6. CONCLUSIONS

La méthode de mesure des humidités mise au point dans ce travail et rarement utilisée systématiquement à l'étude des phénomènes de transferts couplés de

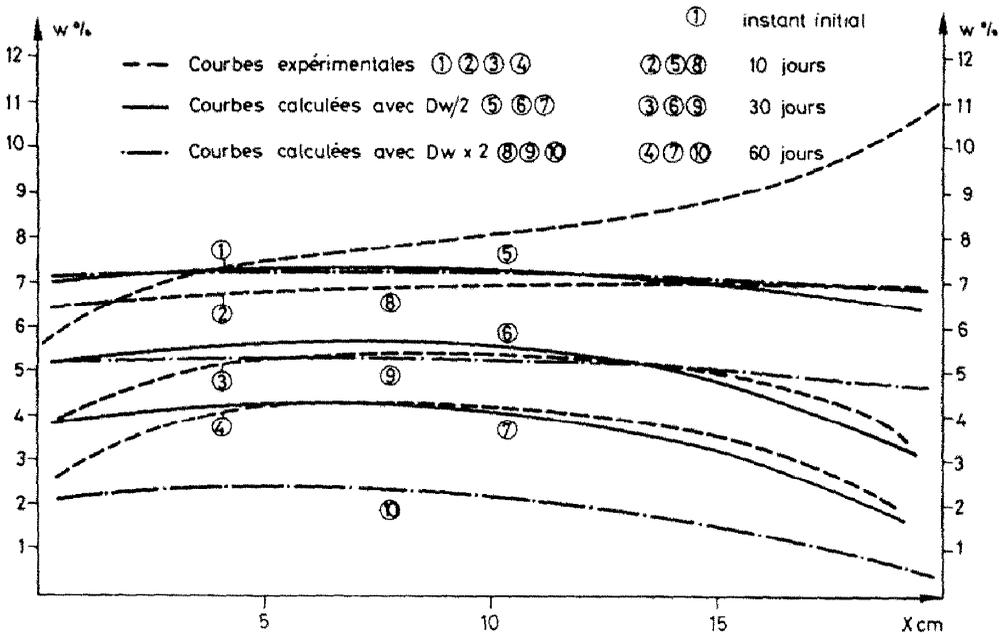


FIG. 15. Comparaison, calcul, expérience, séchage, terre cuite.

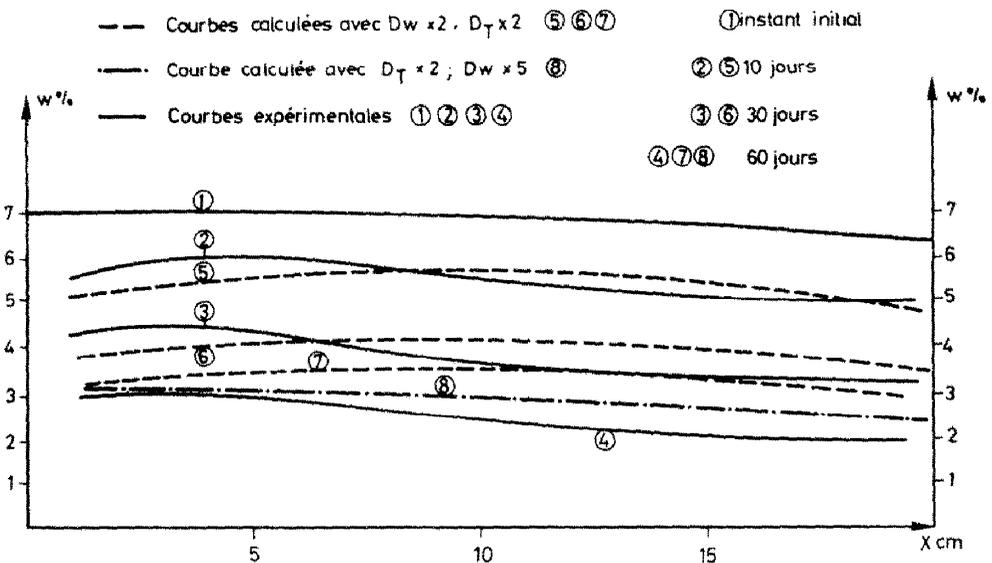


FIG. 16. Comparaison, calcul, expérience, séchage, mortier.



FIG. 17.

chaleur et de masse dans des matériaux consolidés a permis d'obtenir des résultats complets pour les deux matériaux étudiés. Cette méthode facile à mettre en

oeuvre présente de plus l'avantage d'atteindre des caractéristiques thermiques des milieux étudiés.

Ces travaux mettent en évidence la difficulté de faire les mesures d'humidité et, en général de connaître les caractéristiques hygrothermiques des matériaux aux faibles teneurs en eau et donc d'apprécier la part exacte des transferts vapeur.

Le comportement des matériaux lors d'échanges de chaleur et de masse est conditionné en grande partie par les conditions d'échange à la limite. Celles-ci sont encore difficile à décrire de façon fine lors du séchage d'un matériau car il y a une interaction dans l'air entre les échanges convectifs et les échanges de masse

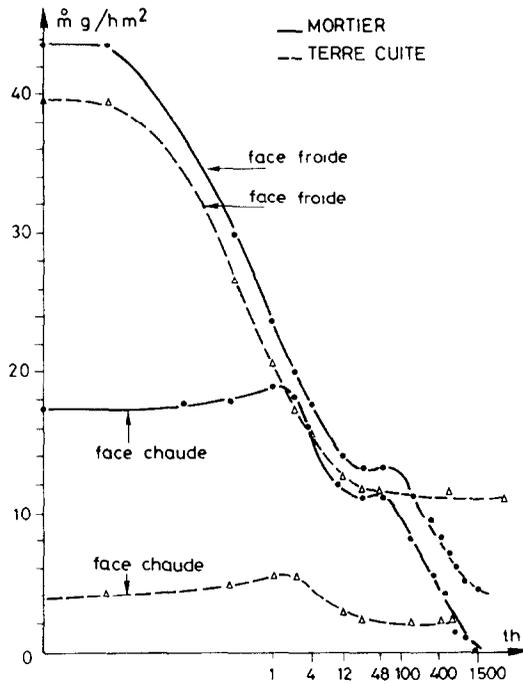


FIG. 18. Débits masse superficiels, mortier, terre cuite.

mais il y a aussi interférence avec la couche de matériau au voisinage de l'interface dans laquelle il est très difficile de connaître de façon fine les mouvements et les quantités d'humidités.

Une étude plus approfondie de ces phénomènes nous semble tout à fait nécessaire à l'amélioration de la description fine du comportement des matériaux.

#### REFERENCES

1. J. C. Foures, R. Javelas et B. Perrin, Application d'une méthode impulsionnelle à la détermination du coefficient de conductivité thermique des matériaux de construction, *R. G. T.* **218**, 129-134 (février 1980).
2. J. C. Foures, R. Javelas et B. Perrin, Caractéristiques thermiques de matériaux de construction. Détermination, variations en fonction de la teneur en eau, *R. G. T.* **230**, 111-118 (février 1981).
3. R. Javelas, J. C. Foures et B. Perrin, Utilisation d'une méthode de chocs thermiques pour la détermination du coefficient de conductivité thermique et de la diffusivité des mortiers et terres cuites, *Annls I.T.B.T.P.* **402**, 139-145 (février 1982).
4. H. S. Carslaw and J. C. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids*. Clarendon Press, Oxford (1959).
5. J. H. Blackwell, Radial, axial heat flows in regions bounded by circular cylinders, *Can. J. Sci.* **31**, 472-479 (1953).
6. J. H. Blackell, The axial flow essor in the thermal conductivity probe, *Can. J. Phys.* **34**, 412-417 (1956).
7. B. Perrin, Etude des transferts couplés de chaleur et de masse dans des matériaux poreux consolidés non saturés utilisés en génie civil. Thèse d'Etat, Toulouse, Université Paul Sabatier (janvier 1985).
8. S. Bories, G. Bacon et L. Monferran, Influence de la teneur en eau de la température sur la conductivité thermique des milieux poreux non saturés. 7ème Symposium International AIRH, Toulouse (août 1980).
9. P. Crausse, Etude fondamentale des transferts couplés de chaleur et d'humidité en milieu poreux non saturé. Thèse d'Etat, Institut National Polytechnique de Toulouse (janvier 1982).
10. C. Moyne, A. Allay et A. Degiovanni, Validation de la méthode impulsionnelle pour la mesure des propriétés thermiques de matériaux poreux humides. Congrès EUROMECH 194. Transfert simultané de chaleur et de masse dans les milieux poreux, Nancy, pp. 99-102 (juillet 1985).
11. B. Perrin, Caractéristiques hygrothermiques de matériaux consolidés utilisés en Génie Civil. Congrès EUROMECH 194. Transfert simultané de chaleur et de masse dans les milieux poreux, Nancy, pp. 83-86 (juillet 1985).
12. A. V. Luikov, Structural properties of capillary porous bodies in transfer phenomena, Heat and Mass Transfer Institute of Byelorussian Academy of Sciences, Minsk, USSR, Général report.
13. J. Philip et D. A. De Vries, Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Trans. Am. geophys. Un.* **38**(2) (avril 1957).
14. S. Bories, Transfert de chaleur et de masse dans les matériaux. Analyse critique des différents modèles mathématiques utilisés. Séminaire "L'humidité dans le bâtiment" U.T.I., Saint-Rémy-les-Chevreuses (novembre 1982).
15. C. Moyne, Modélisation des transferts simultanés de chaleur et de masse. Influence du mouvement de la phase gazeuse. EUROMECH 194. Transfert simultané de chaleur et de masse dans les milieux poreux, Nancy, pp. 45-68 (juillet 1985).
16. P. Crausse, G. Bacon et S. Bories, Etude fondamentale des transferts couplés chaleur masse en milieu poreux. *Int. J. Heat Mass Transfer* **24**, 991-1004 (1981).

## SIMULTANEOUS HEAT AND MASS TRANSFER IN CONSOLIDATED MATERIALS USED IN CIVIL ENGINEERING

**Abstract**—The method of measuring the humidity in the materials based on the determination of the thermal conductivity is presented and the principal characteristics are analysed. The water diffusion coefficients due to the water content and temperature gradients are measured and utilized in the numerical calculation of a drying process. These results are compared to an experiment and discussed. We note the difficulty of describing the superficial mass transfer with a single coefficient function of the heat transfer coefficient. We present some enthalpic balance which proves of interest in taking into account the presence of humidity in walls of buildings.

## GLEICHZEITIGER WÄRME- UND STOFFTRANSPORT IN FESTSTOFFEN DER BAUTECHNIK

**Zusammenfassung**—Eine Methode zur Bestimmung der Feuchtigkeit in Materialien über die Messung der Wärmeleitfähigkeit wird vorgestellt, und ihre wesentlichen Merkmale werden aufgezeigt. Der Wasserdiffusionskoeffizient wird in Abhängigkeit von Wassergehalt und Temperaturgradient gemessen und bei der numerischen Berechnung eines Trocknungsprozesses angewandt. Die Rechenergebnisse werden mit Versuchsergebnissen verglichen und diskutiert. Wir sind bei der Beschreibung des Stofftransports als Funktion des Wärmetransports mit nur einem Koeffizienten auf Schwierigkeiten gestoßen. Enthalpiebilanzen werden dargestellt, welche die Bedeutung der Feuchtigkeit in Gebäudewänden aufzeigen.

## СОВМЕСТНЫЙ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ОТВЕРДЕВАЮЩИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ

**Аннотация**—Предложен метод измерения влажности материалов, основанный на определении коэффициента теплопроводности; анализируются основные характеристики. Измеренные коэффициенты диффузии воды, содержащейся в материале, и температурные градиенты используются в численных расчетах процесса сушки. Полученные результаты сравниваются с данными экспериментов. Отмечается трудность в описании поверхностного массопереноса с помощью одного коэффициента теплопереноса. Составленный баланс энтальпии доказывает необходимость учета влагосодержания в стенах зданий.