

## ETUDE FONDAMENTALE DES TRANSFERTS COUPLES CHALEUR-MASSE EN MILIEU POREUX

P. CRAUSSE, G. BACON et S. BORIES

Institut de Mécanique des Fluides Associé au C.N.R.S.,  
 (Groupe d'Etudes sur les Milieux Poreux), 2 rue Camichel, 31071 Toulouse Cedex, France

(Reçu le 9 juillet 1980)

**Résumé**—Les phénomènes couplés de transferts de chaleur et de masse qui se développent dans un milieu poreux non saturé homogène et isotrope soumis à de faibles gradients de température, lorsque la pression de la phase gazeuse est uniforme et constante et l'influence de la gravité négligeable, ont été analysés à partir d'une étude expérimentale et d'une simulation numérique des régimes transitoires hydrique et thermique.

Les coefficients intervenant dans le système d'équations ayant fait l'objet de déterminations indépendantes de la procédure de simulation physique, la comparaison entre résultats expérimentaux et numériques a permis d'apprécier la validité du modèle de description mathématique.

### NOMENCLATURE

$a$ ,	coefficient de diffusion de masse;
$i$ ,	indices des noeuds du maillage;
$t$ ,	temps;
$x, z, y$ ,	dimensions d'espace;
$A_1, A_2$ ,	} coefficients;
$B_1, B_2$ ,	
$C_1, C_2$ ,	
$C$ ,	capacité calorifique;
$D_1, D_2$ ,	coefficients;
$D$ ,	coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air;
$F$ ,	coefficient de pondération;
$K$ ,	conductivité hydraulique;
$L$ ,	chaleur de vaporisation;
$M$ ,	masse moléculaire de la vapeur d'eau;
$N$ ,	nombre de noeuds du maillage;
$P$ ,	pression;
$P_{vs}$ ,	pression de vapeur saturante;
$R$ ,	constante des gaz parfaits;
$T$ ,	température;
$U$ ,	fonction.

### Lettres grecques

$\delta$ ,	coefficient de thermomigration;
$\varepsilon'$ ,	taux de changement de phase;
$\lambda$ ,	conductivité thermique;
$\nu$ ,	viscosité cinématique;
$\xi$ ,	coordonnée généralisée;
$\rho_0$ ,	masse volumique du matériau sec;
$(\rho C)$ ,	chaleur volumique;
$\sigma$ ,	tension interfaciale;
$\phi$ ,	humidité relative $P_v/P_{vs}$ ;
$\psi$ ,	suction;
$\omega$ ,	teneur en eau pondérale;
$\theta$ ,	vecteur de composantes $T$ ;
$\chi$ ,	$= \varepsilon' \rho_0 L$ ;
$\Omega$ ,	vecteur de composantes $\omega$ ;
$\nabla$ ,	opérateur $i(\partial/\partial x)$ , $j(\partial/\partial y)$ , $k(\partial/\partial z)$ .

### Indices, symboles

*	grandeur définie en milieu poreux;
$l$ ,	liquide;
$v$ ,	vapeur;
0,	valeur initiale.

### 1. INTRODUCTION

LES TRANSFERTS couplés de chaleur et de masse qui se développent dans les milieux poreux non saturés, sous l'influence de faibles gradients de température, jouent un rôle extrêmement important dans divers phénomènes naturels ou processus industriels. Il en est ainsi dans les échanges d'humidité entre le sol et l'atmosphère par suite des variations de température journalière et saisonnière de la surface, mais également dans certains domaines techniques : génie civil, séchage des matériaux, voire technologiques : caloducs, où les transferts de masse sont stimulés de façon naturelle ou artificielle par des gradients de température.

L'amélioration des connaissances, concernant la physique de ces transferts revêt, par ailleurs, une importance grandissante au moment où se pose avec acuité le problème d'une meilleure utilisation de l'énergie et de son stockage. Qu'il s'agisse de développer de nouvelles techniques de séchage, d'améliorer l'isolation thermique des bâtiments ou d'utiliser le sol comme source ou réserve d'énergie, la question fondamentale à laquelle se trouve confrontée l'élaboration de tout projet est en effet celle de l'estimation des transferts couplés de chaleur et de masse dans les structures poreuses correspondantes.

Malgré les nombreux travaux qui ont été consacrés à l'étude de ces phénomènes, il faut bien convenir, toutefois, qu'il est encore difficile de se prononcer sur la validité des modèles de description théorique proposés, compte tenu du caractère parfois contradictoire des résultats acquis et des procédures (généralement calage) utilisées pour tester ces modèles.

Afin d'apporter une contribution scientifiquement plus satisfaisante à l'analyse de ces phénomènes, une étude à la fois expérimentale et théorique a été

entreprise. Développée à partir d'un système physique de configuration géométrique simple dans lequel les conditions aux limites peuvent être rigoureusement définies et où le transfert de masse est étroitement couplé avec le champ de température, cette étude, qui se distingue assez sensiblement des recherches antérieures quant à la démarche mise en oeuvre, a été conduite de la façon suivante :

- détermination des coefficients de transferts à partir d'expériences spécifiques ;
- simulation expérimentale de processus de transferts couplés dans des systèmes simples ;
- résolution numérique des équations régissant les phénomènes avec prise en compte des coefficients déterminés en (a), et les conditions aux limites relatives aux systèmes choisis en (b) ;
- comparaison des résultats (b) et (c).

## 2. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Mis en évidence par Bouyoucos [1] en 1912, puis par Lebedeff [2] en 1927, les transferts d'humidité induits, en milieu poreux, par des gradients de température ont, par la suite, fait l'objet de nombreux travaux expérimentaux destinés à préciser la nature des flux, liquide et/ou vapeur, intervenant dans le processus de transfert de masse [3-7]. Jusqu'en 1948, il était cependant extrêmement difficile de se prononcer quant à la nature de ces flux. En effet, tandis que les résultats obtenus par certains auteurs semblaient indiquer la prédominance du transfert en phase vapeur [2-4, 6], les observations effectuées par d'autres conduisaient à conclure à un déplacement de l'humidité en phase liquide sous l'influence des forces capillaires [1, 5, 7].

Le caractère apparemment contradictoire de ces conclusions devait être levé en 1952 par Gurr, Marshall et Hutton [8], puis en 1954 par Rollins, Spangler et Kirkhan [9] dont les travaux ont permis de montrer l'intervention simultanée des deux phénomènes, leur importance relative devant apparaître ultérieurement comme dépendante de la teneur en eau [11, 12].

Ce support phénoménologique étant acquis, Luikov [10] en 1954, puis De Vries et Philip [11] en 1957, proposaient une modélisation mathématique prenant en considération la coexistence des phases liquide et vapeur au sein du milieu poreux et faisant apparaître les effets de couplage entre le transfert de masse et le transfert de chaleur. En 1962, un autre type de modélisation fondé sur le formalisme de la thermodynamique des processus irréversibles était introduit par Cary et Taylor [13].

Mis à part les très nombreux travaux théoriques consacrés à la résolution du système d'équations couplées régissant ces phénomènes, il n'existe, à notre connaissance, que très peu d'études orientées vers la vérification des modèles proposés. Parmi les travaux récents, dont les conclusions sont d'ailleurs parfois contradictoires et conduisent à suspecter la validité de ces modèles, nous citerons entre autres, ceux de Cassel,

Nielsen et Biggar [17], de Van der Kooi [18], de Jury [19] et de Novak [20].

## 3. MODELISATION MATHÉMATIQUE

Lorsque l'influence de la gravité est négligeable et la pression de la phase gazeuse uniforme et constante, la description des transferts de chaleur et de masse dans les milieux poreux homogènes isotropes non saturés, est généralement effectuée à l'aide du système d'équations aux dérivées partielles non linéaires [10, 11]

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \nabla \cdot [a \nabla \omega + a \delta \nabla T] \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{(\rho C)^*} \nabla \cdot [\lambda^* \nabla T] + \frac{\varepsilon' L \rho_0}{(\rho C)^*} \frac{\partial \omega}{\partial t} \quad (2)$$

Expression locale de la loi de conservation de la masse, l'équation (1) traduit la contribution au transfert des différentes phases, les coefficients globaux,  $a$  et  $a\delta$ , s'exprimant par les relations

$$a = a_l + a_v \quad a\delta = a_l \delta_l + a_v \delta_v$$

qui distinguent les coefficients de transfert de masse dans chacune des phases indicées respectivement,  $l$ , pour le liquide et,  $v$ , pour la vapeur.

Traduits sous forme explicite, les coefficients  $a_l$  et  $a_l \delta_l$  dits coefficients de transfert capillaire isotherme et non isotherme s'écrivent respectivement

$$a_l = \frac{\rho_l}{\rho_0} K(\omega, T) \left( \frac{\partial \psi(\omega, T)}{\partial \omega} \right)_T \quad (3)$$

$$a_l \delta_l = \frac{\rho_l}{\rho_0} K(\omega, T) \left( \frac{\partial \psi(\omega, T)}{\partial T} \right)_\omega \quad (4)$$

avec

$$\delta_l = \frac{(\partial \psi / \partial T)_\omega}{(\partial \psi / \partial \omega)_T} \quad (5)$$

coefficient de thermomigration en phase liquide

et les coefficients de diffusion de masse isotherme  $a_v$  et non isotherme  $a_v \delta_v$  de la phase vapeur

$$a_v = F(\omega) \frac{DM_v^2 P_{vs}}{\rho_0 R^2 T^2} \frac{P}{P - P_v} g \left( \frac{\partial \psi}{\partial \omega} \right)_T \phi \quad (6)$$

$$a_v \delta_v = F(\omega) \frac{DM_v^2 P_{vs}}{\rho_0 R^2 T^3} L \frac{P}{P - P_v} \phi \quad (7)$$

en première approximation, avec :

$$\delta_v = \frac{L}{Tg \left( \frac{\partial \psi}{\partial \omega} \right)_T} \quad (8)$$

coefficient de thermomigration en phase vapeur

$\phi = 1$  hors domaine hygroscopique.

Lorsque le milieu poreux est indéformable et ne présente pas d'affinité chimique pour l'eau en phase liquide, les relations phénoménologiques  $K(\omega, T)$  et  $\psi(\omega, T)$  peuvent être explicitées ainsi

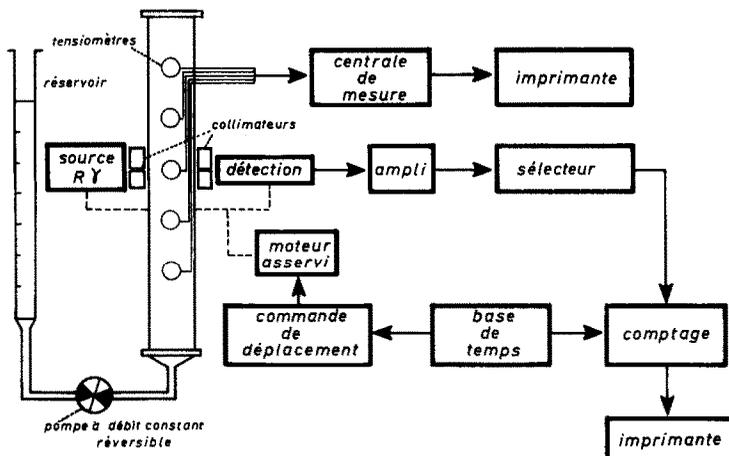


FIG. 1. Détermination des paramètres  $K(\omega, T)$  et  $\psi(\omega, T)$ , dispositif expérimental.

$$K(\omega, T) = \frac{g}{v(T)} p(\pi, \omega); \quad \psi(\omega, T) = \frac{\sigma(T)}{d} q(\pi, \omega) \tag{9}$$

où  $d$  est une dimension caractéristique du diamètre des pores et  $p(\pi, \omega)$  et  $q(\pi, \omega)$  sont des fonctions des

propriétés morphologiques  $\pi$  du milieu poreux et de la teneur en humidité. Dans le cadre de ces hypothèses, la dépendance des coefficients  $a_i$  et  $\delta_i$  par rapport à la température ne serait donc liée qu'aux variations des propriétés  $v$  et  $\sigma$  de l'eau avec ce paramètre, les fonctions réduites:  $K(\omega, T) v(T)/g$  et  $\psi(\omega, T)/\sigma(T)$ , n'étant dépendantes, quant à elles, pour un milieu poreux donné, ( $\pi = \text{cte}$ ), que de la teneur en eau.

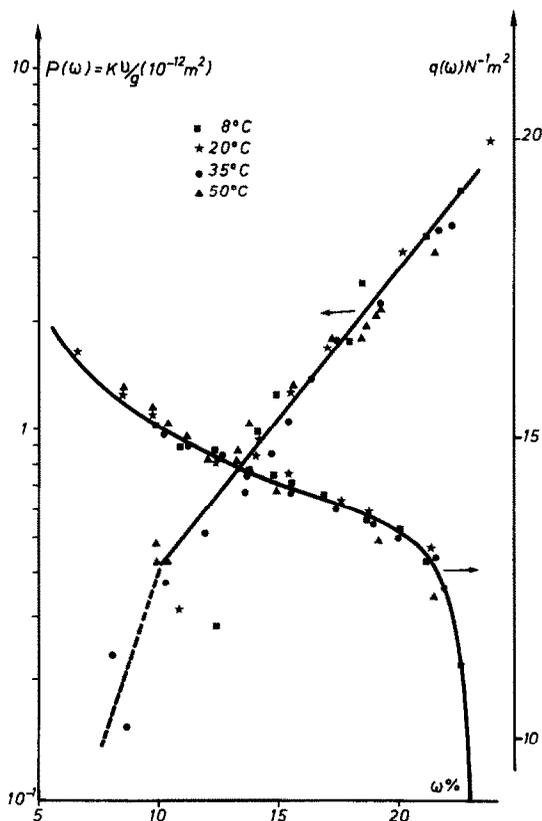


FIG. 2. Perméabilité à la phase liquide  $P(\omega)$ , relation  $q(\omega) = \psi/\sigma$ .

#### 4. DETERMINATION DES COEFFICIENTS DE TRANSFERTS

##### 4.1. Coefficients de transfert de masse

Comme l'indiquent les expressions littérales présentées dans le paragraphe précédent, la détermination de ces coefficients requiert la connaissance des paramètres  $D, P_{vs}, M, L, v, \sigma, \phi, F, K$  et  $\psi$ . Si l'on exclut les propriétés thermophysiques des fluides, aisément accessibles par les tables, quatre grandeurs fondamentales, caractérisant les interactions de la matrice solide sur le comportement dynamique et statique de l'humidité, nécessitent néanmoins une détermination, il s'agit respectivement de  $K$  conductivité hydraulique, de  $\psi$  succion, de  $F$  coefficient de pondération du coefficient de diffusion moléculaire de la vapeur et de  $\phi$  humidité relative d'équilibre.

Tant que la teneur en eau est supérieure à une certaine valeur ( $\omega \sim 7\%$  dans le cas du matériau utilisé), permettant la réalisation d'écoulements en phase liquide dont l'observation est compatible avec les moyens expérimentaux de mesure il est possible d'accéder, sans trop de difficultés, à une détermination disjointe de  $K$  et  $\psi$ . En-deçà de cette valeur, seuls  $\psi$  et les valeurs globales,  $a$ , peuvent être déterminées de façon séparée. Compte tenu de ces remarques, nous distinguerons successivement deux domaines dans la détermination des coefficients: le domaine des fortes teneurs en humidité ( $\omega \geq 7\%$ ) et le domaine des faibles teneurs en humidité ( $\omega \leq 5\%$ ).

4.1.1. *Domaine des fortes teneurs en humidité.* (a) *Méthodologie expérimentale:* Les coefficients caractéristiques de la loi d'écoulement capillaire ont été déterminés au moyen d'une méthode classique fondée sur l'analyse d'écoulements unidirectionnels en drainage (désaturation) d'une colonne de milieu poreux. Cette méthode permet d'accéder simultanément aux valeurs de  $K(\omega, T)$  et de  $\psi(\omega, T)$ . L'installation d'essais, utilisée pour cette étude (Fig. 1) était constituée par une cellule contenant le milieu poreux dont la température était maintenue constante, grâce à un dispositif de régulation thermique. Les grandeurs intervenant dans le calcul de  $K$  ont été déduites de la détermination des profils de teneur en eau par une méthode gammamétrique (absorption d'un rayonnement émis par une source radioactive) et des profils de pression capillaire obtenus à l'aide de tensiomètres disposés en différentes sections le long d'une génératrice [21, 22, 28].

(b) *Présentation des résultats.* Les valeurs de  $K$  et  $\psi$  obtenues à la suite des essais effectués dans la gamme de variation de température  $\in [8 \text{ et } 50^\circ\text{C}]$  ont été utilisées pour exprimer les fonctions réduites (Fig. 2)

$$\frac{K(\omega, T) \cdot v(T)}{g} = P(\omega)_\pi; \quad \frac{\psi(\omega, T)}{\sigma(\theta)} = q(\omega)_\pi. \quad (10)$$

On notera que conformément aux prévisions de l'analyse les résultats ainsi traduits conduisent bien à des relations qui s'explicitent pour un milieu poreux donné en fonction de la seule variable  $\omega$ .

Ce résultat, dont il convient de souligner l'accord avec ceux obtenus par Jackson [23] et Dumore et Schols [24], justifie dans le domaine de teneur en humidité considéré, l'écriture de  $(\partial\psi/\partial T)_\omega$  sous la forme:  $(\psi/\sigma)(d\sigma/dT)$ , expression utilisée pour déterminer  $\delta_i$  et considérée, jusqu'à présent, comme suspecte par certains auteurs [19, 20].

Dès lors que les valeurs de,  $K(\omega, T)$ , sont connues, il est possible de calculer les coefficients de diffusion de masse,  $a_i$ , et de thermomigration,  $\delta_i$ , par application des relations (3) et (5).

4.1.2. *Domaine des faibles teneurs en humidité.* Comme l'indiquent les résultats présentés sur la Fig. 2, résultats largement confirmés par les études relatives aux écoulements en milieu poreux non saturé isotherme, la conductivité hydraulique et la succion varient de manière extrêmement importante avec la teneur en eau. Cette conjoncture, qui se traduit, à gradient moyen de succion fixé, par une évolution de moins en moins sensible des profils d'humidité et à débit massique fixé, par un accroissement de plus en plus important de la succion, rend l'approche de  $K(\omega, T)$  à la fois délicate et peu précise (risque de désamorçage des tensiomètres, difficultés d'analyse de l'évolution des profils d'humidité) lorsque la teneur en eau diminue (en-deçà de 7% environ pour le matériau poreux utilisé).

En vue de poursuivre la détermination des coefficients de transfert de masse dans le domaine des plus faibles teneurs en humidité, d'autres moyens expérimentaux ont donc été mis en oeuvre. D'une manière

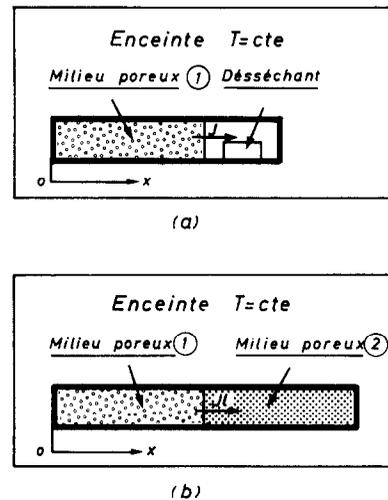


FIG. 3. Détermination des coefficients de diffusion massive, modèles physiques.

générale, les méthodes utilisées se fondent :

sur la détermination globale du coefficient de transfert de masse dans des conditions expérimentales permettant de dégager la contribution au transfert de chacune des phases;

sur la détermination de la relation  $\psi(\omega)_T$  à une température fixée dans le domaine de teneur en eau inférieur à 7%. La loi de dépendance de ce paramètre par rapport à la température, démontrée dans le paragraphe précédent, étant par la suite supposée valable.

(a) *Méthodologie expérimentale. Coefficients de transfert de masse:* les méthodes expérimentales se fondent sur l'application de l'équation décrivant la densité de flux de masse, en l'absence d'effets gravitaires, lors de transferts unidirectionnels isothermes

$$\mathbf{J} = -\rho_0 a \frac{\partial \omega}{\partial x} \mathbf{i}. \quad (11)$$

Les dispositifs expérimentaux sont représentés de manière schématique sur la Fig. 3. Il s'agit, en l'occurrence, de cellules métalliques cylindriques, de section droite circulaire, d'axe horizontal, ayant 34 mm de diamètre et 150 mm de longueur, dans lesquelles le milieu poreux, préalablement humidifié par mouillage, à la teneur en humidité moyenne choisie, est mis en place. Ces cellules sont ouvertes à l'une des extrémités et imperméables sur les autres surfaces. Une deuxième cellule, contenant un produit desséchant (chlorure de Lithium) [Fig. 3(a)] ou un autre matériau poreux en équilibre hygrothermique (même pression de vapeur et température que le matériau à analyser [Fig. 3(b)]), peut être montée à l'extrémité ouverte. L'ensemble étanche, constitué de deux cellules montées bout à bout, est placé dans une enceinte à température régulée.

Compte tenu de la nature différente des conditions aux limites ainsi imposées à la surface libre du milieu poreux à analyser, les transferts d'humidité qui se

développent en direction du dessiccateur ou en direction du milieu poreux chargé d'effectuer le "pompage" capillaire correspondent respectivement.

à un transfert en phases liquide + vapeur dans la première configuration ;

à un transfert en phase liquide seulement dans la deuxième configuration.

Tandis qu'à partir des expériences conduites avec le dessiccateur il est possible d'accéder aux valeurs du coefficient,  $a = a_l + a_v$ , dans les expériences effectuées avec les deux milieux poreux montés bout à bout, il est donc possible de déterminer  $a_l$  et par voie de conséquence  $a_v = a - a_l$ .

Comme pour les essais aux fortes teneurs en humidité, le calcul de  $a$  ou  $a_l$  est fondé sur l'application de la loi de conservation de la masse compte tenu de l'expression de la densité de flux (11). Les profils de teneur en humidité  $\omega(x)$ , relatifs à différents temps, sont obtenus par découpage des échantillons et pesées. Les bilans de masse sont vérifiés par comparaison des résultats obtenus après planimétrie des profils avec l'accroissement de poids du dessiccateur ou du milieu poreux ②.

*Relation  $\psi(\omega)_T$* : différents moyens expérimentaux ont été mis en oeuvre en vue de tracer la relation  $\psi(\omega)_T$  dans toute la plage de variation des teneurs en eau ( $T = 20^\circ\text{C}$ ). Il s'agit respectivement :

D'un dispositif plaque de pression pour  $\omega \in [23\% - 2,5\%]$ . Le milieu poreux, mis en place dans une enceinte étanche, est limité à la partie inférieure par une plaque poreuse semi-perméable. L'eau contenue dans l'échantillon à étudier est chassée en augmentant la pression d'air au moyen d'un mano-détendeur de précision. La pression de l'eau étant maintenue constante en cours d'expérience, la pression capillaire et par voie de conséquences  $\psi$ , est donc directement

déterminée à partir de la mesure de la pression d'air imposée. La connaissance du volume d'eau écoulé, mesuré en cours d'expérience, permet en outre d'accéder à la valeur de,  $\omega$ , en équilibre avec la suction,  $\psi$ .

D'un dispositif de centrifugation pour  $\omega \in [2,5\% - 1\%]$ . Les échantillons de milieu poreux, partiellement saturés, sont placés dans les godets d'une centrifugeuse permettant de créer des accélérations jusqu'à  $10g$ . Les teneurs en humidité sont déterminées par découpage des échantillons en éléments d'un demi-centimètre d'épaisseur et pesées au terme de 4-8 heures de centrifugation, et les succions correspondantes par calcul de l'accélération centrifuge en fonction de la vitesse de rotation et de la distance à l'axe de la tranche de matériau analysée.

Par la réalisation d'équilibres thermodynamiques (détermination de la relation  $\phi(\omega)$  pour  $\omega < 1\%$ ). Les échantillons de milieu poreux, préalablement humidifiés à une teneur en eau voisine de  $1\%$ , sont introduits dans un dessiccateur placé dans une enceinte thermostatée. La pression de vapeur dans le dessiccateur, est contrôlée par une solution aqueuse d'acide sulfurique de concentration donnée. La suction correspondant à l'équilibre thermodynamique (teneur en eau constante) une fois celui-ci atteint, est alors calculée par application de la relation de Kelvin

$$\psi = \frac{RT}{Mg} \log \phi \quad \text{avec} \quad \phi = P_v/P_{vs}$$

la teneur en eau étant déduite, quant à elle, de la pesée de l'échantillon.

(b) *Présentation des résultats. Coefficients de transfert de masse* : les valeurs de  $a(\omega)$  et de  $a_l(\omega)$  à différentes températures et de  $\psi(\omega)$  à  $20^\circ\text{C}$  sont indiquées sur les Figs. 4, 5 et 6.

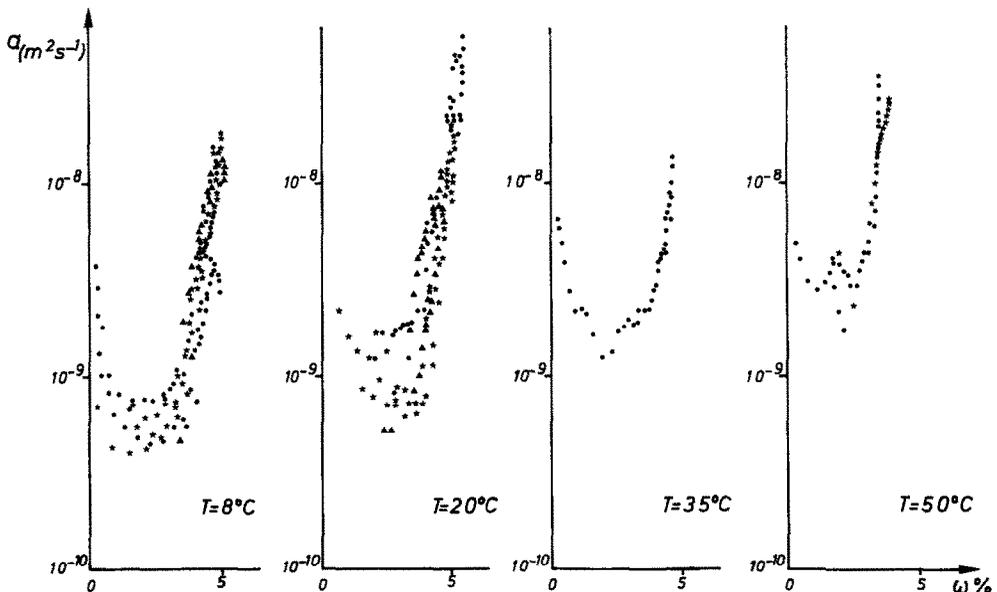


FIG. 4. Coefficient de diffusion massique global  $a$  ( $\omega \approx 5\%$ ).

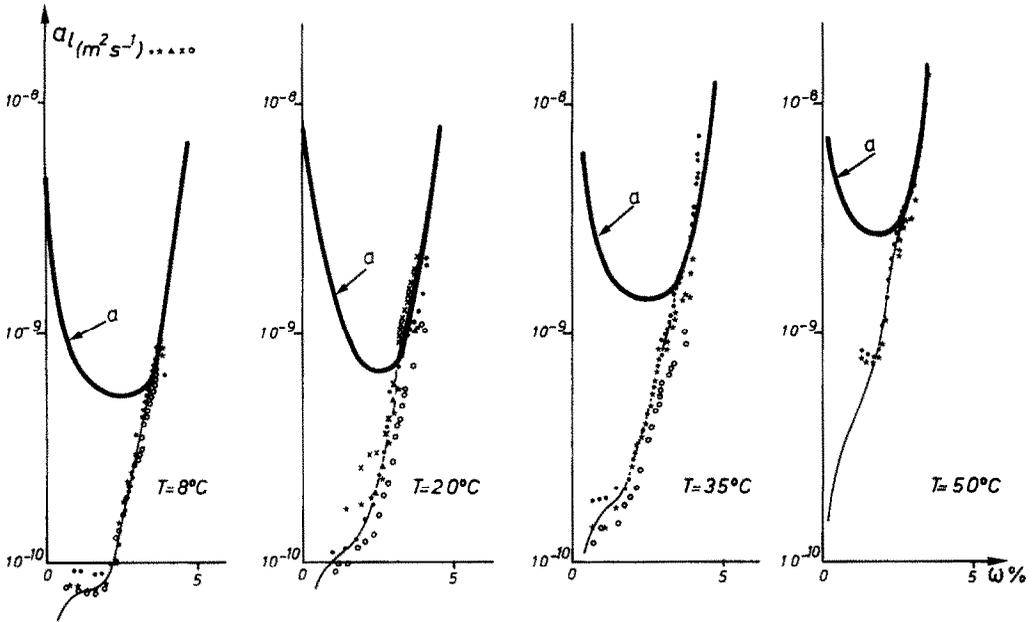


FIG. 5. Coefficient de diffusion massique en phase liquide  $a_1$  ( $\omega \approx 5\%$ ).

Comme on peut le constater sur la Fig. 5, le coefficient de diffusion en phase liquide  $a_1$  devient égal au coefficient de diffusion global,  $a$ , lorsque  $\omega$  est approximativement de 4%. Cette information indiquant que la contribution de la phase gazeuse au transfert de masse isotherme est négligeable, pour le matériau considéré, lorsque la teneur en humidité est supérieure à 4%, justifie l'identification de  $a(\omega)$  avec  $a_1(\omega)$  dans tout le domaine des teneurs en eau supérieur

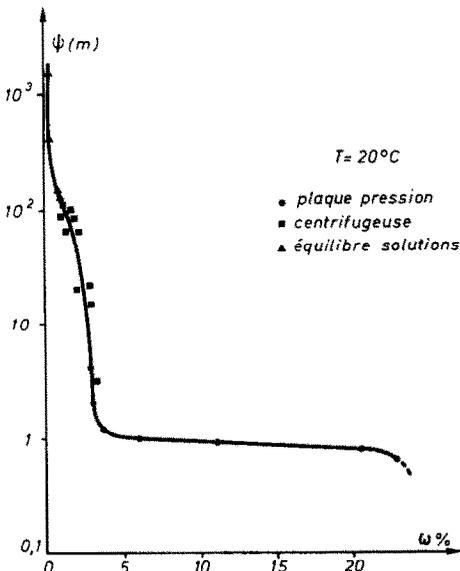


FIG. 6. Relation succion-teneur en eau  $\psi(\omega)$ .

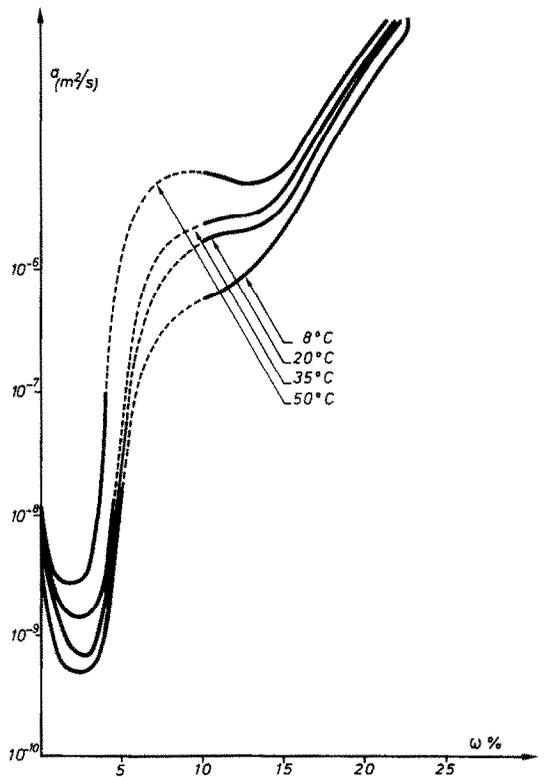


FIG. 7. Coefficient de diffusion massique global  $a$ .

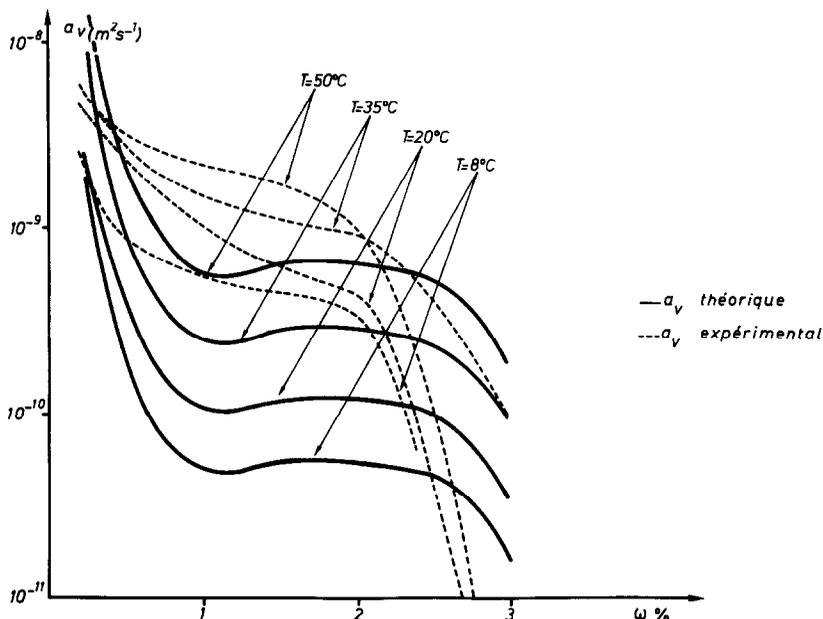


FIG. 8. Coefficient de diffusion massique en phase vapeur  $a_v$ , comparaison entre formulation théorique et résultats expérimentaux.

à cette valeur et notamment dans le domaine des fortes valeurs précédemment analysé.

Le raccordement des valeurs de  $a(\omega)$  étant ainsi réalisé sur toute la plage de variation de  $\omega$ , l'évolution du coefficient de diffusion global tracée à partir des mesures effectuées en 4.1.1 et des déterminations de 4.2.2 est présentée sur la Fig. 7. La zone en tirets portée sur cette figure correspond à un raccordement arbitraire entre domaines à forte et faible teneur en eau.

L'évolution du coefficient de diffusion de masse en phase vapeur  $a_v(\omega)$  déduite de la différence,  $a(\omega) - a_l(\omega)$  obtenue à partir des résultats précédents (Fig. 5) est représentée et comparée avec la formulation théorique (6) sur la Fig. 8. Les valeurs de  $F(\omega)$ , choisies pour le calcul, ont été déduites d'une étude [31] concernant la détermination de l'influence de la température sur la conductivité thermique  $\lambda^*(\omega)_T$ , d'après les résultats obtenus par De Vries.

Mis à part l'accord qualitatif qui se dégage de la comparaison, on notera néanmoins les écarts relativement importants qui apparaissent entre valeurs calculées et expérimentales. Cette estimation par défaut du coefficient de transfert de masse en phase vapeur, à partir de l'expression théorique (6) a déjà été soulignée par certains auteurs, dont De Vries, mais aucune explication pleinement satisfaisante n'a pu être proposée jusqu'à présent.

En ce qui concerne les valeurs du thermogradient,  $\delta$ , elles sont représentées sur la Fig. 9. Ces valeurs ont été calculées en utilisant les données expérimentales:  $\psi(\omega, T)$ , permettant d'accéder aux coefficients  $\delta_1$  et  $\delta_2$ , à partir des relations (5) et (8),  $a(\omega, T)$ ,  $a_l(\omega, T)$ , et

$a_v(\omega, T)$ , au moyen de l'expression

$$\delta = \frac{a_l \delta_1 + a_v \delta_2}{a}$$

Les deux maxima qui apparaissent dans l'évolution de ce coefficient correspondent respectivement au

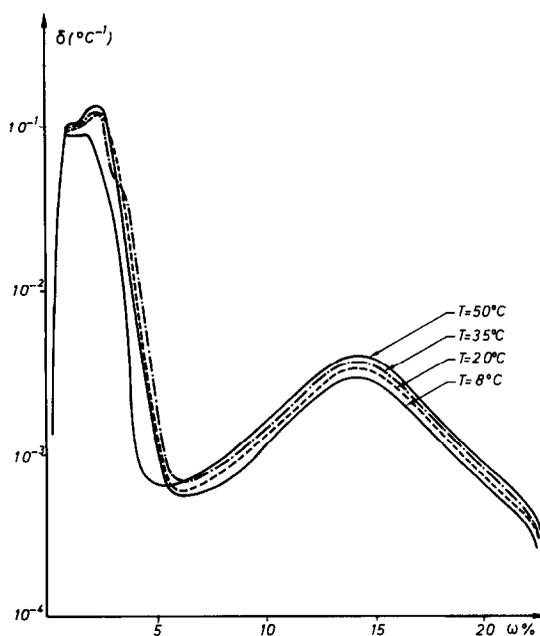


FIG. 9. Coefficient de thermomigration  $\delta$ .

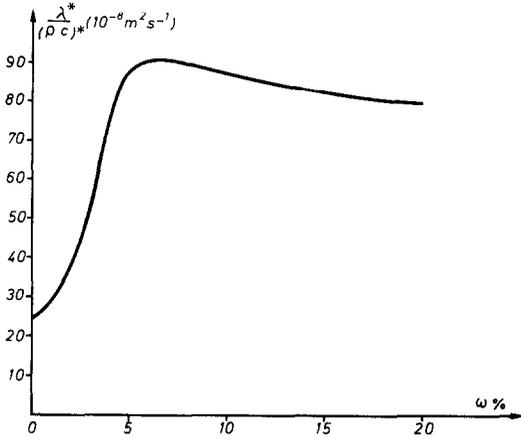


FIG. 10. Diffusivité thermique du matériau.

point d'inflexion de la courbe  $\psi(\omega)_T$  ( $\partial\psi/\partial\omega$  minimum  $\rightarrow \delta_{max}$ ) dans le domaine des fortes teneurs en eau et au passage du transfert de masse à prédominance liquide à un transfert à prédominance vapeur dans le domaine des teneurs en eau inférieur à 3% environ [valeur minimale de  $a(\omega)$ ].

4.2. Paramètres thermophysiques :  $\lambda^*$  et  $(\rho C)^*$

La conductivité thermique,  $\lambda^*(\omega, T)$ , a été déterminée expérimentalement au moyen d'un appareillage classique : conductivimètre à cylindres coaxiaux.

En ce qui concerne la chaleur volumique  $(\rho C)^*$  elle a été directement calculée en utilisant la relation

d'additivité des enthalpies :  $(\rho C)^* = \rho_0 C_0 + \rho_0 C_1 \omega$ , la chaleur volumique résultant de la contribution de la phase vapeur étant négligée.

Les valeurs moyennes de la diffusivité thermique du matériau sont représentées sur la Fig. 10.

5. ETUDE EXPERIMENTALE ET SIMULATION NUMERIQUE

5.1. Etude expérimentale

Pour des raisons de simplicité, l'étude a été limitée à l'examen des transferts unidirectionnels. Le modèle physique retenu était constitué par un échantillon de milieu poreux non saturé (sable quartzique de granulométrie serrée, 100, 125  $\mu\text{m}$ ), mis en place dans une cellule cylindrique d'axe horizontal, de 35 cm de longueur et 6 cm de diamètre. Les extrémités de la cellule,  $x = 0$  et  $L$ , étaient fermées par des surfaces métalliques maintenues à température constante par circulation d'eau thermostatée. La surface latérale était thermiquement isolée par un dispositif de garde et percée de quelques événements, de 1 mm de diamètre, permettant de maintenir la pression de la phase gazeuse uniforme et égale à la pression atmosphérique [Fig. 11(a)].

Les conditions initiales étant définies par  $\omega_0$  et  $T_0$  uniformes, les transferts étaient déclenchés et entretenus en portant la surface  $x = 0$  à  $T_1 > T_0$ . Pour l'ensemble du programme expérimental réalisé :  $\Delta T = T_1 - T_0 \approx 35^\circ\text{C}$ . Contrairement à ce qui se passe dans un processus d'évaporation classique (existence d'un flux de masse non nul sur les frontières limites  $x = 0$  et/ou  $x = L$ ) on notera, par référence à l'équation du transfert de masse que, dans cette configuration, le démarrage du transfert d'humidité est principalement

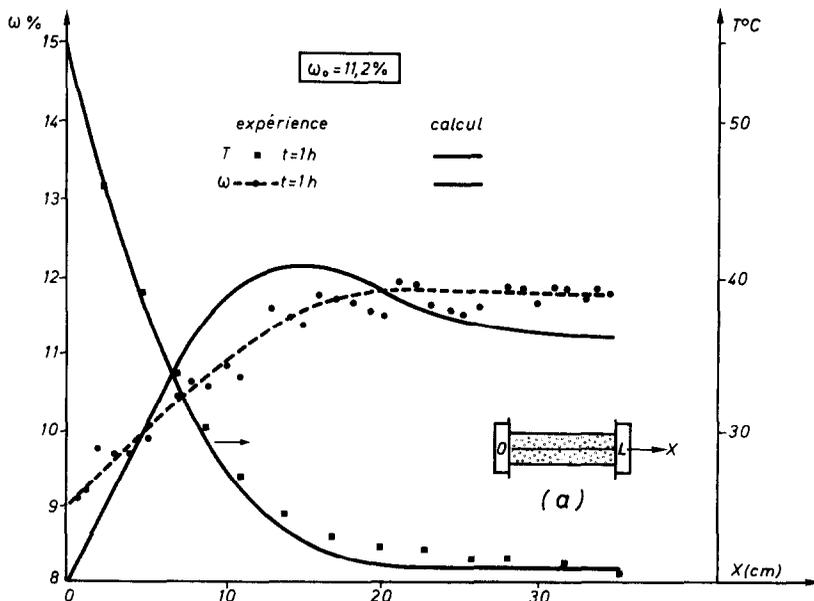


FIG. 11. Simulations expérimentale et numérique, régimes transitoires. (a) Schéma du dispositif expérimental.

lié au développement du gradient de température. Outre l'avantage d'une définition rigoureuse des conditions aux limites, un tel système est donc particulièrement adapté pour mettre en évidence l'effet de couplage entre les différents transferts.

L'évolution du phénomène a été suivie : au point de vue thermique au moyen de thermocouples mis en place au sein du milieu poreux dans une cellule témoin, et au point de vue massique par découpage et pesée en différents temps d'échantillons initialement identiques. Des bilans de masse et des tests de reproductibilité ont permis de s'assurer de la qualité des résultats. Les expériences ont été effectuées dans les deux domaines de teneurs en eau pour lesquels la détermination expérimentale des coefficients a été réalisée.

5.2. Simulation numérique

La résolution numérique des équations (1) et (2) a été effectuée en utilisant une méthode d'intégration aux éléments finis. Compte tenu de la configuration du modèle physique :  $\nabla = i\partial/\partial x$  et des conditions aux limites associées (Dirichlet pour  $T$  et Neuman pour  $\omega$ ), le système considéré s'écrit

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( a \frac{\partial \omega}{\partial x} + a\delta \frac{\partial T}{\partial x} \right);$$

$$(\rho C)^* \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

où

$$\chi = \epsilon' L \rho_0$$

avec pour  $t \leq 0$

$$\omega = \omega_0 \quad T = T_0 = \text{cte} \quad \forall x$$

et pour  $t > 0$

$$a \frac{\partial \omega}{\partial x} + a\delta \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad T = T_1 > T_0 \quad \text{à} \quad x = 0$$

$$a \frac{\partial \omega}{\partial x} + a\delta \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad T = T_0 \quad \text{à} \quad x = L.$$

Le domaine physique,  $R$ , étant discrétisé en éléments finis linéaires,  $R_e$ , de longueurs égales  $\Delta x = 0,5 \text{ cm}$ , en un point  $M$  d'abscisse  $x$ , d'un élément  $R_e$ , les valeurs approchées des fonctions  $T$  ou  $\omega$  soit  $U$  sont obtenues par interpolation linéaire

$$U[M(x), t] = U_j \xi_j + U_i \xi_i$$

avec

$$\xi_i = \frac{x_j - x}{x_j - x_i}; \quad \xi_j = \frac{x - x_i}{x_j - x_i}$$

où  $\xi_i$ , coordonnée généralisée varie linéairement entre  $i$  et  $j$ , vaut 1 si  $i$  en  $M$ , 0 si  $M$  en  $j$  at vérifie

$$\sum_{i=1}^N \xi_i = 1.$$

Les coefficients  $a$ ,  $a\delta$ ,  $(\rho C)^*$ ,  $\lambda^*$  et  $\chi$  sont interpolés linéairement comme la fonction  $U$ .

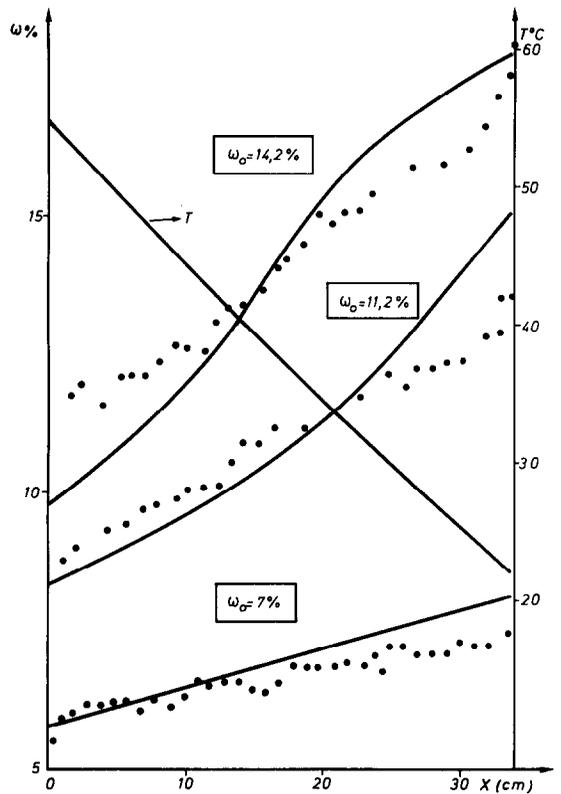


FIG. 12. Simulations expérimentale et numérique, régimes permanents.

En utilisant la convention de sommation implicite, la solution approchée est donc de la forme :  $\hat{\omega} = \omega_n \xi_n$ ;  $\hat{T} = T_n \xi_n$ , où  $\omega_n$  et  $T_n$  sont les valeurs de la teneur pondérale en eau et de la température au noeud  $n$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ).

L'utilisation du principe de Galerkin permet d'écrire les relations intégrales

$$\int_R \left[ \frac{\partial \omega}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left( a \frac{\partial \omega}{\partial x} + a\delta \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right] \cdot \xi_n dR = 0$$

$$\int_R \left[ (\rho C)^* \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \chi \frac{\partial \omega}{\partial t} \right] \cdot \xi_n dR = 0$$

relations qui une fois transformées afin de pouvoir prendre en compte les conditions aux frontières deviennent

$$\int_R \left( a \frac{\partial \omega}{\partial x} + a\delta \frac{\partial T}{\partial x} \right) \frac{\partial \xi_n}{\partial x} dR + \int_R \frac{\partial \omega}{\partial t} \xi_n dR = \int_A \underbrace{\left( a \frac{\partial \omega}{\partial x} + a\delta \frac{\partial T}{\partial x} \right) \xi_n n_x dA}_I$$

$$\int_R (\rho C)^* \frac{\partial T}{\partial t} \xi_n dR + \int_R \lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial \xi_n}{\partial x} dR - \int_R \frac{\partial \omega}{\partial t} \xi_n dR = \int_A \underbrace{\lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} \xi_n n_x dA}_{II}$$

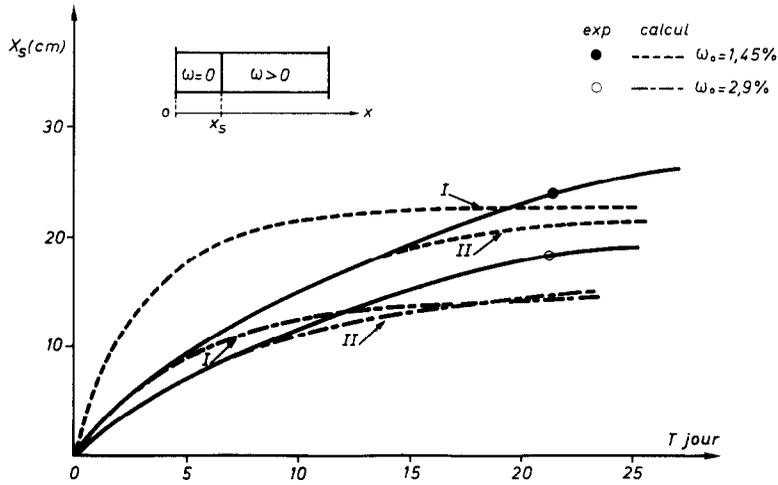


FIG. 13. Simulations expérimentale et numérique, évolution de la zone sèche ( $\omega_0 = 1,45\%$  et  $2,9\%$ ).

A étant la frontière du domaine  $R$  et  $n_x$  la normale à cette frontière, orientée vers l'extérieur, les intégrales précédentes (I) et (II) représentent respectivement les flux massique et thermique à travers  $A$ . Les dérivées partielles par rapport au temps sont explicitées quant à elles par les relations pondérales suivantes

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} \Big|_n = \int_R \frac{\partial \omega}{\partial t} \xi_n dR \Big/ \int_R \xi_n dR$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} \Big|_n = \int_R (\rho C)^* \frac{\partial T}{\partial t} \xi_n dR \Big/ \int_R (\rho C)^* \xi_n dR$$

et permettent d'obtenir ainsi un système d'équations différentielles où les inconnues sont  $T_n$  et  $\omega_n$ .

L'intégration est alors effectuée à l'aide d'un schéma implicite centré tel que

$$\left( \frac{\partial U}{\partial t} \right)_n^{m+1/2} = \frac{U_n^{m+1} - U_n^m}{\Delta t} \quad \text{et}$$

$$U_n^{m+1/2} = \frac{1}{2}(U_n^{m+1} + U_n^m)$$

$U_n^{m+1}$  = valeur de  $\omega$  ou  $T$  au noeud  $n$  et au temps  $(m + 1)\Delta t$

$\Delta t$  = pas de temps variable (0,5 s à 1200 s).

Compte tenu de ces remarques, les relations intégrales conduisent aux deux systèmes linéaires

$$A_1 \Omega^{m+1} + B_1 \theta^{m+1} = C_1 \Omega^m + D_1 \theta^m$$

$$A_2 \Omega^{m+1} + B_2 \theta^{m+1} = C_2 \Omega^m + D_2 \theta^m$$

où  $\Omega^m$  est le vecteur des  $N$  composantes de  $\omega^m$  et  $\theta^m$  est le vecteur des  $N$  composantes de  $T^m$ .

Ces deux systèmes de  $N$  équations linéaires sont transformés en un système linéaire de  $2N$  équations dans lequel le vecteur des inconnues admet pour composantes  $T_1, \omega_1, T_2, \omega_2, \dots, T_N, \omega_N$ . La matrice des coefficients devient alors une matrice bande de largeur 7.

La résolution de ce système a été effectuée par

méthode directe d'élimination de Gauss, la solution étant obtenue lorsque la différence entre deux estimations successives des inconnues devient inférieure à une valeur donnée ( $10^{-5}$ ).

## 6. PRESENTATION DES RESULTATS

### 6.1. Fortes teneurs en humidité

Les expériences ont été réalisées pour trois valeurs de la teneur en humidité initiale :  $\omega_0 = 14,2\%$ ,  $11,2\%$  et  $7\%$ , afin de couvrir largement le domaine des variations des coefficients déterminés par ailleurs à l'exception, toutefois, du domaine dans lequel les effets gravitaires deviennent négligeables.

Les résultats obtenus par voie expérimentale et simulation numérique sont représentés sur la Fig. 11 en ce qui concerne le régime transitoire et sur la Fig. 12 en ce qui concerne le régime permanent. On notera que pour l'ensemble des conditions choisies  $\omega_0 \in [14,2\%, 7\%]$ , le modèle considéré est très largement représentatif de la réalité physique. Les écarts sensiblement plus importants qui apparaissent entre expérience et simulation numérique par rapport aux résultats publiés antérieurement [29, 30], résultent des modifications qui ont été apportées aux coefficients  $\delta$ , lors du tracé de la fonction  $\psi(\omega)_T$  à partir de l'ensemble des valeurs déterminées sur toute la plage de variation de  $\omega$ , et dont l'influence sur la pente du profil d'humidité est extrêmement sensible.

Etant donné que pour les valeurs de  $\omega_0$  retenues, les coefficients de diffusion de la vapeur sont, sinon nuls, tout au moins négligeables par rapport à ceux de la phase liquide, les résultats présentés indiquent, par ailleurs, le rôle déterminant du transfert d'eau en masse, sur la redistribution de l'humidité due au gradient de température, dans le matériau choisi. Cette redistribution étant directement dépendante de  $\delta$ , c'est à dire principalement de  $(\partial \psi / \partial \omega)_T$ , peut donc être très

variable, à  $\Delta T = T_1 - T_0$  fixé, selon le type de relation  $q(\pi, \omega)$  soit en définitive selon le milieu poreux considéré caractérisé par ses propriétés structurales  $\pi$ . Cette conclusion est susceptible d'expliquer la raison pour laquelle certains auteurs ont été conduits à affirmer la prédominance des transferts en phase liquide, alors que d'autres observaient une influence négligeable de ce mécanisme.

### 6.2. Faibles teneurs en humidité

L'intérêt d'une comparaison entre résultats expérimentaux et simulation numérique dans le domaine des faibles teneurs en humidité, en tant que situation de référence permettant d'apprécier la validité du modèle de description mathématique, résulte du caractère particulier des phénomènes qui apparaissent dans ce domaine et des contraintes qu'ils imposent, par suite des fortes non linéarités, dans la recherche des solutions.

La mise en évidence du caractère particulier des phénomènes, peut être qualitativement réalisée en recherchant la solution du système d'équations linéarisées. Dans le cadre du problème considéré, cette solution peut être obtenue par voie analytique et conduit aux relations suivantes pour les distributions de température et d'humidité en régime permanent [27]

$$T = T_0 + (T_1 - T_0) \left(1 - \frac{x}{L}\right)$$

$$\omega = \omega_0 + \delta(T_1 - T_0) \left(\frac{x}{L} - 0,5\right).$$

Etant donné que la teneur en humidité,  $\omega$ , ne peut

devenir négative, la solution afférente à cette variable n'a de sens physique que dans la mesure où  $\omega$  reste positif ou nul dans tout le domaine  $\in [0, L]$ , c'est à dire si  $\delta(T_1 - T_0)/\omega_0 \leq 2$ . Lorsque les conditions expérimentales sont telles que  $\delta(T_1 - T_0)/\omega_0 \geq 2$ , la solution proposée permet donc d'induire l'existence d'une situation particulière caractérisée par l'assèchement partiel,  $\omega = 0$ , pour  $x \in [0, x_s]$  du milieu poreux ( $x_s$  extension de la zone sèche).

Pour le gradient moyen de température choisi ( $\sim 1^\circ\text{C cm}^{-1}$ ) deux séries d'essais correspondant respectivement aux teneurs en eau initiales  $\omega_0 = 1,45\%$  et  $\omega_0 = 2,9\%$  ont été réalisées. Les comparaisons entre expériences et simulations numériques ont principalement porté sur le développement de la zone sèche et l'évolution des profils d'humidité en fonction du temps.

Les résultats concernant l'évolution de la zone sèche sont représentées sur la Fig. 13. Les commentaires I et II portés sur ces figures, correspondent respectivement à la prise en compte dans la simulation numérique: I (des coefficients déterminés expérimentalement), et II d'une tentative de calage des valeurs de  $\delta$  permettant d'assurer une bonne concordance entre résultats expérimentaux et simulations numériques.

Le choix de la procédure de calage fondée sur l'adaptation des valeurs de  $\delta$  a été essentiellement guidé par l'allure des pentes des profils de teneur en humidité expérimentaux (les valeurs de ces pentes étant très sensibles aux variations de ce coefficient) et par le rôle privilégié que joue ce paramètre sur l'apparition de la zone sèche (Section 6.2).

Les comparaisons entre les coefficients  $\delta$  utilisés dans les approches I et II sont indiqués sur la Fig. 14. On

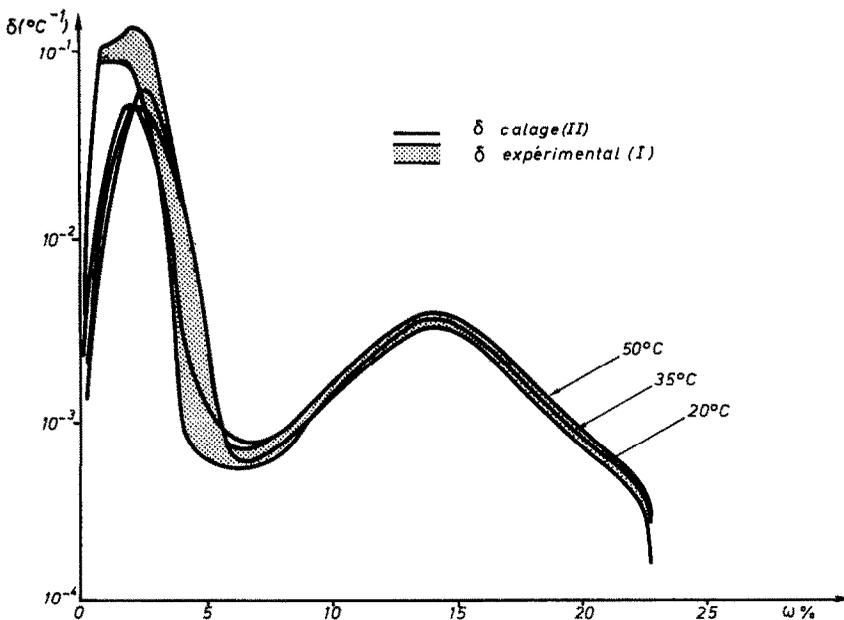


FIG. 14. Coefficients  $\delta$ , comparaison entre les déterminations I et II.

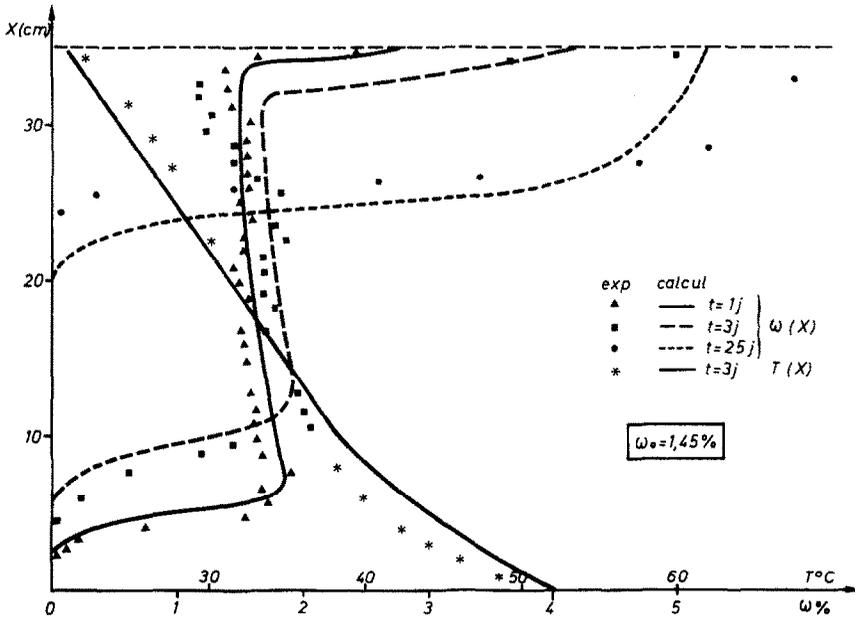


FIG. 15. Simulations expérimentale et numérique (II)  $\omega_0 = 1,45\%$ .

notera que la mise en oeuvre de la procédure de calage ne modifie pas qualitativement l'allure des courbes  $\delta$  et qu'en outre ces courbes respectent bien quantitativement les ordres de grandeur des valeurs déterminées expérimentalement.

Les comparaisons entre profils d'humidité expérimentaux et numériques (II) sont présentées sur les Figs.

15 et 16. Comme on peut le constater, la concordance est dans l'ensemble satisfaisante, notamment pour  $\omega_0 = 2,9\%$ , alors même que dans ce cas, les valeurs adoptées pour  $\delta$  ne sont pas sensiblement modifiées par la procédure de calage.

L'extension de la zone sèche étant par ailleurs très largement dépendante de la teneur en eau moyenne

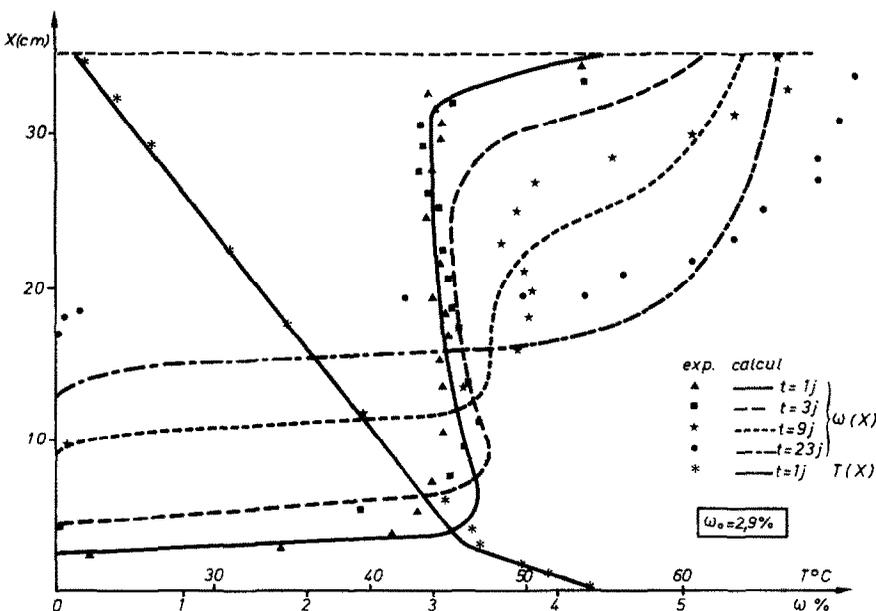


FIG. 16. Simulations expérimentale et numérique (II)  $\omega_0 = 2,9\%$ .

d'après la relation :  $\omega = \omega_0 + \delta(T_1 - T_0)(x/L - 0,5)$ , les écarts observés pour les situations d'équilibre final pourraient être attribuées aux inévitables pertes de masse dues à la diffusion de la vapeur à travers les événements lorsque les expériences sont conduites sur de longues périodes.

Si l'on veut bien considérer qu'en raison des difficultés expérimentales de détermination des coefficients aux faibles teneurs en eau, les erreurs commises dans ces déterminations sont largement de l'ordre de grandeur de l'écart entre valeurs tabulées et calées, les résultats présentés permettent d'affirmer que dans ce domaine également, la description mathématique proposée est bien représentative des phénomènes observés.

En vue d'apprécier la sensibilité du modèle à l'ensemble des paramètres ou à certains phénomènes non pris en considération dans la simulation numérique, une étude systématique a d'autre part été entreprise afin de déterminer l'influence : des effets d'hystérésis, du taux de changement de phase  $\epsilon'$  et des coefficients  $a$  et  $\delta$  sur le processus de thermomigration. Les résultats de cette analyse paramétrique ont permis de montrer la grande sensibilité du modèle aux valeurs des coefficients  $a$  et  $\delta$  ainsi que le caractère limitatif des effets d'hystérésis sur la redistribution d'eau dans la zone froide. L'influence de  $\epsilon'$  est quant à elle beaucoup plus discrète; elle ne se traduit que par un léger accroissement de la vitesse du front sec lorsque  $\epsilon'$  passe de la valeur maximale 1 à la valeur minimale 0 [32].

## 7. CONCLUSION

La description des phénomènes couplés de transferts de chaleur et de masse en milieu poreux, tels qu'ils se manifestent dans certaines situations industrielles et notamment lors du séchage, est généralement effectuée à l'aide d'un système d'équations qui a été proposé il y a deux décennies environ par Luikov et Philip-de-Vries. Malgré les nombreux travaux théoriques qui ont été développés à partir de tels modèles, peu d'études expérimentales ont été entreprises jusqu'à présent en vue d'assurer leur validation.

Les résultats présentés dans cette communication n'ont pas la prétention d'apporter une conclusion définitive à un problème aussi vaste que complexe dans lequel les paramètres qui interviennent demeurent de surcroît difficilement accessibles en regard des moyens expérimentaux disponibles. Néanmoins, compte tenu de la procédure mise en oeuvre dans le cadre de cette étude (détermination des coefficients à partir d'expériences spécifiques) et de l'accord quantitativement satisfaisant qui se dégage des comparaisons établies, nous pensons pouvoir affirmer qu'en dehors du domaine hygroscopique, la modélisation proposée constitue un moyen de description satisfaisant des phénomènes.

L'apport de cette étude reste toutefois limité en ce qui concerne la compréhension de certains mécanismes physiques mis en jeu aux faibles teneurs en humidité, notamment lorsqu'il s'agit d'apprécier

l'influence de la présence d'eau en phase liquide sur le processus de diffusion de la vapeur.

*Remerciements*—Nous tenons à exprimer nos remerciements à Messieurs Lemarchand et Zarccone pour leur contribution à l'étude expérimentale.

## REFERENCES

1. G. Bouyoucos, Effect of temperature on the movement of water vapor and capillary moisture in soils, *J. Agricultural Research* **5**, 141-172 (1915).
2. A. F. Lebedeff, The movement of ground and soils waters, *First International Congress of Soil Science, Proceedings* **1**, 459-494 (1927).
3. W. D. Smith, Thermal conductivities in moist soils, *Soil Science Society of America Proceedings* **4**, 32-40 (1940).
4. W. D. Smith, Thermal transfer of moisture in soils, *American Geophysical Union Transactions* **24**, 511-523 (1943).
5. H. Trejo, Jaime, Water movement in soils under thermic potential, Master Thesis, Princeton University, School of Engineering (1946).
6. D. Croney and J. O. Coleman, Soil thermodynamics applied to movement of moisture in road foundations, *Seventh Int. Congress for Applied Mechanics Proceedings* **3**, 163-177 (1948).
7. E. Tones Harold and H. Kohnke, The influence of soil moisture tension on vapor movement of soil water, *Soil Science Society of America, Proceedings* **16**, 245-248 (1957).
8. C. G. Gurr, T. J. Marshall and J. T. Hutton, Movement of water in soil due to a temperature gradient, *Soil Science* **74**, 335-345 (1952).
9. R. L. Rollins, M. G. Spangler and D. Kirkham, Movement of soil moisture under a thermal gradient, *Highway Res. Board Proc.* **33**, 492-508 (1954).
10. Av. Luikov, *Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies*. Pergamon Press, Oxford (1966).
11. D. A. De Vries and J. Philip, Moisture movement in porous materials under temperature gradients, *Trans. Am. Geophys. Union* **38**, 222-232 (1957).
12. D. A. De Vries, Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media, *Trans. Am. Geophys. Union* **39**, 909-916 (1958).
13. J. W. Cary and S. A. Taylor, The interaction of the simultaneous diffusions of heat and water vapor, *Soil Science Society Proceedings* 413-416 (1962).
14. H. W. Cary, Onsager's relation and the non-isothermal diffusion of water vapor, *J. Phys. Chem.* **67**, 126 (1963).
15. J. W. Cary, An evaporation experiment and its irreversible thermodynamics, *Int. J. Heat Mass Transfer* **7**, 531-538 (1964).
16. J. W. Cary, Water flux in moist soil: thermal versus suction gradients, *Soil Sci.* **100**, 168-175 (1964).
17. D. K. Cassel, D. R. Nielsen and J. W. Biggar, Soil water movement in response to imposed temperature gradients, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **32**, 183-189 (1969).
18. A. H. van der Kooi, Moisture transport in cellular concrete roof, Ph.D. Thesis, Univ. of Technology, Waltmon, Delft (1971).
19. W. A. Jury, Simultaneous transport of heat and moisture through a medium sand, Ph.D. Thesis, Univ. of Wisconsin (1973).
20. V. Novak, Non isothermal flow of water in unsaturated soil, *J. Hydrological Sci.* **1**, 37-51 (1975).
21. F. Klockenbring and S. Bories, Transfert de chaleur avec changement de phase en milieu poreux. Méthode de mesure des saturations. Note G.Et. 29, Institut de Mécaniques des Fluides de Toulouse (1975).
22. G. Vachaud, Contribution à l'étude des problèmes d'écoulement en milieux poreux non saturés, Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Grenoble (1968).

23. R. D. Jackson, Temperature and soil-water diffusivity relations, *Soil Science Society of America* **27**, 363-366 (1963).
24. J. M. Dumore and R. S. Schols, Drainage capillary pressure functions and the influence of connate water, *Soc. Pet. Eng. J.* October, 437-444 (1974).
25. A. A. Rose, Water movement in porous materials — I. Isothermal vapor transfer, *Brit. J. Appl. Phys.* **14**, 256-262 (1963).
26. A. A. Rose, Water movement in porous materials — II. The separation of the components of water movement, *Brit. J. Appl. Phys.* **14**, 491-496 (1963).
27. S. Bories, P. Crausse et al., Thermomigration en milieu poreux — evolution de la zone sèche en système fermé, *C. r. hebd. Séanc. Acad. Sci., Paris* **280B**, 29-31 (1975).
28. S. Bories, P. Crausse and H. Nguyen Tan, Thermomigration en milieu poreux — étude des coefficients de diffusion capillaire, *C. r. hebd. Séanc. Acad. Sci., Paris* **284B**, 17-19 (1977).
29. S. Bories, P. Crausse, G. Bacon and R. Gaudu, Etude expérimentale et simulation numérique des transferts de chaleur et de masse en milieu poreux, 6ème Congrès International des Transferts de Chaleur et de Masse, Toronto, Publication HM 1, pp. 317-321 (1978).
30. G. Bacon, S. Bories, P. Crausse and R. Gaudu, Thermomigration en milieu poreux. Etude expérimentale et simulation numérique des transferts en phase liquide, *C. r. hebd Séanc. Acad. Sci., Paris* **285B**, 191-194 (1977).
31. S. Bories, G. Bacon and L. Monferran, Influence de la teneur en eau et de la température sur la conductivité thermique des milieux poreux non saturés, *G.Et.* **51**, Janvier (1980).
32. S. Bories, P. Crausse and G. Bacon, Etude fondamentale des transferts couplés chaleur-masse en milieu poreux, Rapport G.E. 18, Décembre (1979).

#### FUNDAMENTAL STUDY OF COUPLED HEAT AND MASS TRANSFER IN POROUS MEDIA

**Abstract**—Coupled transient heat and mass transfer at small temperature gradients, in unsaturated homogeneous and isotropic porous media, has been studied both experimentally and by numerical simulation. The pressure in the gas phase was uniform and constant and the effect of gravity could be neglected.

As the coefficients in the system of equations have been determined independently of the experimental procedure, the agreement found between the theoretical and experimental results verifies the mathematical model used.

#### EINE GRUNDSÄTZLICHE STUDIE ZUM GEKOPPELTEN WÄRME- UND STOFFÜBERGANG IN PORÖSEN STOFFEN

**Zusammenfassung**—Gekoppelter instationärer Wärme- und Stoffaustausch bei kleinen Temperaturgradienten in ungesättigten, homogenen und isotropen porösen Stoffen wurde sowohl experimentell als auch durch numerische Simulation untersucht. Der Druck in der Gasphase war gleichförmig und konstant. Der Einfluß der Gravitation konnte vernachlässigt werden.

Da die Koeffizienten im System der Gleichungen unabhängig vom experimentellen Vorgehen bestimmt werden, bestätigt die Übereinstimmung zwischen den theoretischen und experimentellen Ergebnissen die Gültigkeit des verwendeten mathematischen Modells.

#### ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗАННОГО ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

**Аннотация** — Проведено экспериментальное и численное исследование взаимосвязанного нестационарного тепло- и массопереноса в ненасыщенных однородных и изотропных пористых средах при небольших градиентах температур. Давление в газовой фазе было однородным и постоянным, а также пренебрегалось влиянием силы тяжести. В связи с тем, что значения коэффициентов в системе уравнений определялись независимо от проводимого эксперимента, полученное соответствие между теоретическими и экспериментальными данными подтверждает справедливость используемой математической модели.