

0017-9310(94)00366-1

Diffusion d'air humide avec condensation de vapeur d'eau en milieu poreux

S. LARBI, G. BACON et S. A. BORIES

Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, Laboratoire Associé au C.N.R.S. 0005-INP-ENSEEIH, Avenue du Professeur Camille Soula-31400 Toulouse France

(Reçu 15 novembre 1993 et sous forme finale 28 novembre 1994)

Résumé—Une étude expérimentale et une simulation numérique des mécanismes de diffusion d'air humide, avec condensation de vapeur d'eau au sein d'un matériau capillaro-poreux, sont présentées. La comparaison des résultats obtenus par ces études complémentaires a permis : de justifier partiellement l'usage du modèle de de Vries comme modèle de prédiction, de comprendre les causes de défaillances des modèles théoriques simplifiés pour décrire la condensation, et enfin de dégager le rôle et l'importance relative des différents mécanismes de transfert de masse et d'énergie dans la cinétique de diffusion-condensation.

1. INTRODUCTION

Indépendamment de leur richesse et de leur intérêt scientifique, les phénomènes de diffusion de vapeur et de condensation en milieu poreux jouent un rôle capital dans de très nombreux problèmes industriels et d'environnement. Du point de vue pratique, il convient de rappeler en effet que la fixation d'eau par condensation a des conséquences néfastes sur les propriétés thermique et mécanique des matériaux et que la compréhension de certains phénomènes naturels (échanges sol-atmosphère) ainsi que la maîtrise, le contrôle et l'optimisation de différents procédés techniques (récupération assistée du pétrole, contacteurs, échangeurs, ...) dépendent fondamentalement des connaissances acquises sur les mécanismes de changement de phase, liquide-vapeur, en milieu poreux.

Selon les secteurs d'applications concernés, ou les problèmes pratiques rencontrés, diverses tentatives de description physique et de modélisation mathématique des phénomènes de changement de phase en milieu poreux ont été effectuées au cours des dernières décennies. C'est ainsi qu'après les premiers travaux de Comings *et al.* [1] et de Glaser [2] fondés sur la prise en compte exclusive du transfert en phase vapeur, des améliorations sensibles ont été apportées à la modélisation par Vos *et al.* [3], Krischer *et al.* [4], de Vries [5], Luikov [6], Marle [7], Whitaker [8], en prenant en considération les transferts simultanés en phases liquide et vapeur ainsi que leurs effets de couplage et d'interaction.

S'il est possible de noter aujourd'hui que de nombreux travaux ont été consacrés à l'évaluation des modèles, lorsque le rôle de la phase condensée est prédominant (ce qui est notamment le cas en séchage), Bories [9], Perre [10], il n'existe par contre que peu d'études ayant pour objectif leur validation dans des situations de condensation thermique [11–14].

Comme cela a été souligné, aussi bien du point de vue théorique qu'expérimental, de nombreux indices justifient pourtant la nécessité d'une telle évaluation. Ces indices concernent :

(1) les hypothèses généralement admises en séchage, qui ne sont plus forcément acceptables en-deçà d'une certaine saturation en liquide [15] et par suite au début de la condensation dans les milieux initialement secs

(2) le mécanisme physique même de la condensation (nucléation) pouvant conduire à l'existence de configurations topologiques de la phase liquide [16], (phase dispersée) modifiant sensiblement les propriétés de transport du matériau.

Les résultats présentés ici s'inscrivent dans cette double préoccupation d'analyse et de validation. Ils visent, d'une part à compléter notre compréhension des mécanismes de base liés au processus de diffusion et de condensation de vapeur d'eau dans des matériaux capillaro-poreux, d'autre part à tester les modèles proposés pour décrire ces phénomènes. Le travail, conduit dans cette perspective, s'articule autour d'objectifs complémentaires : l'étude expérimentale et la simulation numérique correspondante d'un processus de diffusion et de condensation unidirectionnel d'air humide au sein d'un milieu poreux indéformable, homogène, isotrope.

2. ETUDE EXPERIMENTALE

2.1. Moyens d'essais

Le modèle physique est constitué par un échantillon de milieu poreux mis en place dans une cellule cylindrique d'axe horizontal, ouverte à l'une de ses extrémités (Fig. 1). L'extrémité ouverte en $x = 0$ est en contact avec une atmosphère dont la température T_c et le taux d'humidité ϕ sont contrôlés. L'extrémité

NOMENCLATURE			
a	diffusivité [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]	λ^*	conductivité thermique [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]
C	chaleur spécifique [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]	δ	coefficient de thermomigration [K^{-1}]
h_c	coefficient de transfert de chaleur [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$]	ω	teneur en eau
h_m	coefficient de transfert de masse [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$]	χ	coefficient [K^{-1}]
L	longueur des cellules d'essais [m] ou chaleur latente de vaporisation [J kg^{-1}]	ϕ	humidité relative [%]
$m(t)$	loi de condensation expérimentale [kg s^{-1}]	ρ	masse volumique [kg m^{-3}].
t	temps [s]	Indices	
T	température [$^{\circ}\text{C}$ ou K]	o	matrice poreuse
x	distance [m].	c	chaud
Symboles grecs		f	froid
α	coefficient	l	liquide
		v	vapeur
		vs	vapeur saturante
		*	caractérise une grandeur apparente du milieu poreux humide.

fermée par une surface imperméable en $x = L$ est maintenue à température constante, $T_f < T_c$. La surface latérale du milieu est imperméable et adiabatique, Larbi [16].

Le dispositif expérimental comprend les éléments suivants: un système de production d'air humide, associé à une régulation thermique, une veine d'essai, des cellules contenant les échantillons de milieu poreux (Fig. 2).

Le taux d'humidité de l'air est fixé par mise en équilibre de l'atmosphère circulant dans la veine avec des solutions salines saturées. Ces solutions, qui s'écoulent en circuit fermé dans un contacteur à film ruisselant, au contact de l'air dont on veut fixer l'humidité relative, permettent d'assurer le contrôle et la maîtrise de ce paramètre avec une bonne précision dans une gamme de température variant entre 20 et 60°C. La température de l'air est fixée par un échangeur air-eau piloté par un thermostat à circulation.

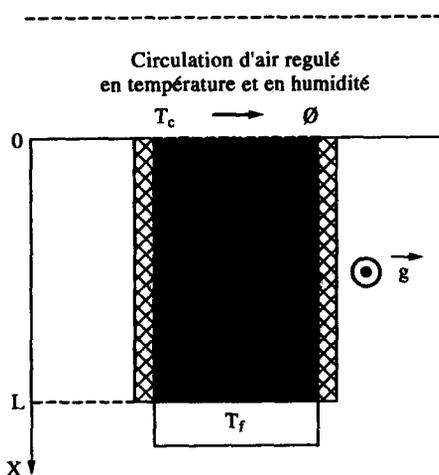


Fig. 1. Modèle physique.

L'écoulement d'air à humidité et température contrôlées est assuré à l'aide d'un ventilateur relié à un variateur de vitesse; il s'effectue également en circuit fermé depuis une chambre de tranquillisation vers la veine d'expérience, constituée par un canal de section droite rectangulaire, suffisamment long pour permettre l'établissement d'un régime d'écoulement turbulent. Six cellules d'essais contenant les milieux poreux peuvent être fixées horizontalement sur les faces latérales de la veine (Fig. 3).

Le matériau utilisé pour constituer les échantillons est un sable quartzé de granulométrie 100–125 μm dont les propriétés thermophysiques et les coefficients de transfert ont été déterminés au moyen d'expériences spécifiques et font partie d'une banque de données établie et publiée par Crausse [17] et Crausse *et al.* [18].

Le milieu poreux est obtenu par compactage du sable dans des tubes cylindriques en plexiglas de 6 cm de diamètre intérieur (i.d.), de 5 mm d'épaisseur et de 20 cm de longueur. Ces tubes sont introduits dans des cylindres en duralumin, jouant le rôle de garde thermique, enveloppés extérieurement par un isolant, Crausse *et al.* [18] et Prat [19].

L'extrémité ouverte en $x = 0$, de chaque cellule est entourée d'un collier chauffant électrique relié à une chaîne de régulation, permettant d'équilibrer la température de surface avec celle de l'air en circulation. Une grille métallique assure le maintien du sable en place. L'extrémité fermée en $x = L$ est obturée par un embout métallique refroidi par circulation d'eau.

Les grandeurs mesurées au cours des essais, aussi bien dans le milieu poreux que dans l'écoulement d'air, sont la teneur en humidité et la température. La distribution d'humidité à l'intérieur du milieu poreux (essentiellement l'eau liquide) est obtenue par une méthode pondérale après découpage des échantillons puis pesées avant et après passage en étuve à 120°C.

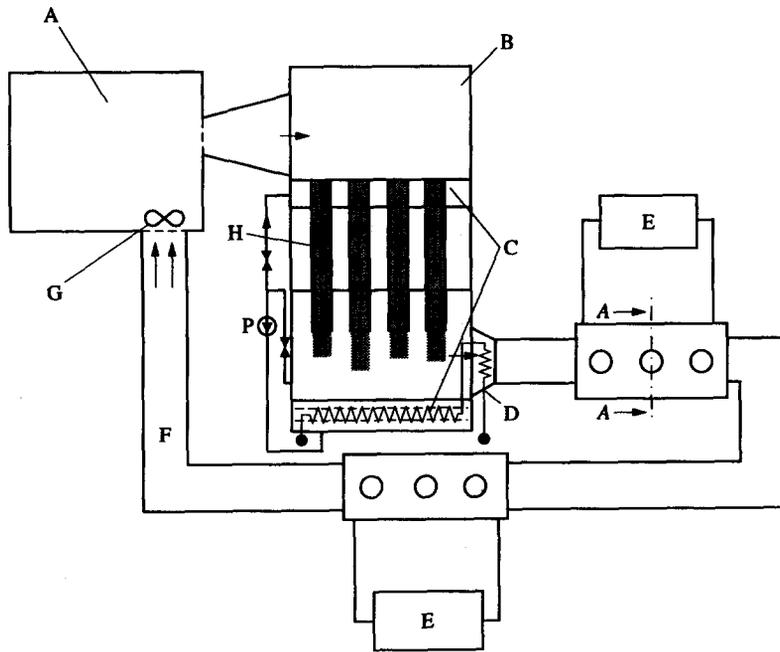


Fig. 2. Schéma de l'installation expérimentale : A, chambre de tranquillisation ; B, humidificateur d'air ; C, solution aqueuse ; D, échangeur thermique eau-air ; E, thermostat à circulation ; F, veine ; G, ventilateur ; H, film liquide ruisselant ; P, pompe.

Cette méthode, évaluée par Crausse [17], est actuellement bien maîtrisée. Elle conduit à l'obtention de résultats d'une précision tout à fait satisfaisante, notamment dans le domaine des faibles teneurs en eau, lorsque les méthodes gammamétriques sont plutôt défaillantes.

En ce qui concerne la mesure des températures à l'intérieur du milieu poreux elle est effectuée à l'aide de 13 thermocouples placés sur une génératrice d'une cellule témoin. La partie sensible des thermocouples est localisée le long de l'axe de la cellule. Leur espacement est variable. Ils sont plus rapprochés près de la plaque froide imperméable afin de détecter l'évolution du profil axial de température résultant des variations de la conductivité thermique du milieu avec la teneur

en eau et du changement de phase. Deux thermocouples respectivement placés sur l'interface chaude en contact avec l'air humide, et sur la plaque froide imperméable, permettent le suivi des conditions aux limites thermiques.

L'estimation des erreurs commises sur l'évaluation des teneur en eau et la température au cours des essais montre que ces grandeurs sont mesurées avec des précisions respectivement égales à ± 4 et 5%, Larbi [16].

Les difficultés technologiques liées au problème de la maîtrise des fuites thermiques ont été assez complexes à résoudre. Malgré les efforts mis en oeuvre pour réaliser une installation expérimentale garantissant des conditions opératoires rigoureuses, il n'a pas été possible de les surmonter totalement. Compte tenu

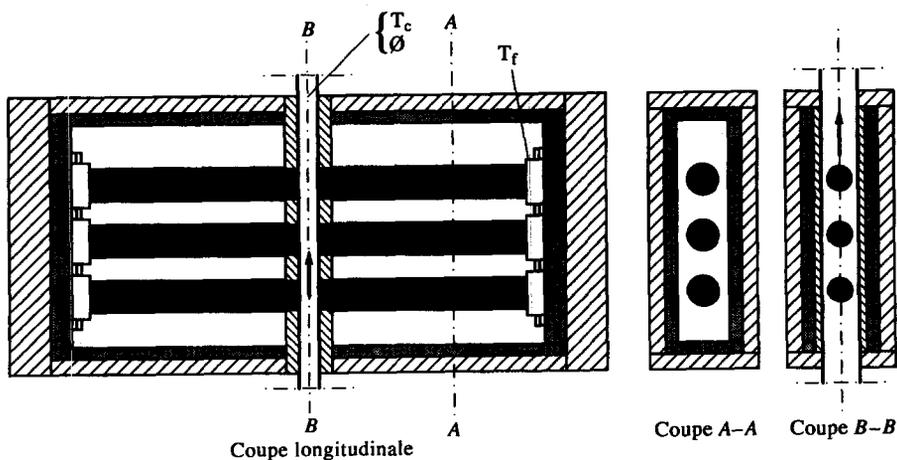


Fig. 3. Schéma de l'installation expérimentale.

de l'étude critique effectuée par Prat [19], concernant l'influence de ce phénomène sur la thermomigration et des écarts observés expérimentalement en conduction pure (milieu complètement sec et transfert de masse nul), nous estimons toutefois que ce phénomène n'a pas altéré notablement le déroulement du processus de condensation, même s'il nous a gênés pour l'obtention des profils axiaux de température dans certaines séries d'essais.

2.2. Conditions initiales et déroulement d'une expérience

Pour l'ensemble des essais, les conditions initiales sont caractérisées par une saturation en liquide pratiquement nulle (milieu sec) compte tenu du comportement faiblement hygroscopique du matériau [17] et une température uniforme et égale à la température de l'air humide circulant dans la veine. Ces conditions sont réalisées, après compactage du sable sec dans les cellules, en imperméabilisant les extrémités $x = 0$, en contact avec la veine et en portant les extrémités $x = L$, imperméables, à la température de la veine. Lorsque le profil de température dans la cellule témoin est uniforme, l'imperméabilisation des cellules en $x = 0$ est supprimée et un gradient de température est créé en portant l'extrémité $x = L$ à $T = T_f < T_{sv} \leq T_c$ (T_{sv} : température de saturation de l'air humide dans la veine).

Sous l'influence du gradient de pression de vapeur, associé au gradient de température, un processus de diffusion moléculaire puis de condensation de la vapeur d'eau depuis la veine vers la paroi froide au sein du milieu poreux se met en place. Tandis que le profil de température, est suivi en continu durant l'expérience de condensation grâce à la cellule témoin, les profils de teneur en eau sont analysés en retirant les cellules de la soufflerie à différents intervalles de temps, en découpant les échantillons en tranches perpendiculaires à l'axe, d'épaisseurs 0.5 et 1 cm puis en pesant ces tranches avant et après passage à l'étude. Dans chaque cas, des tests sont effectués afin d'apprécier tout à la fois incertitudes de mesures et reproductibilité.

2.3. Résultats expérimentaux et discussion

2.3.1. *Programme d'essais.* Les conditions expérimentales correspondant aux différentes séries d'essais, respectivement identifiées par A, B, C et D, sont regroupées dans le Tableau 1, où T_c représente la température de l'air humide dans la veine, $P_v(T_c)$ la

pression de vapeur d'équilibre avec la solution utilisée, T_f la température de la surface froide imperméable située en $x = L$ et $P_{vs}(T_f)$ la pression de vapeur saturante correspondant à cette température. En termes de températures de rosée ces atmosphères circulant dans la veine sont respectivement caractérisées par 20°C pour la série d'essais (A), 26°C pour la série (B), 32.6°C pour la série C et 25°C pour la série D.

Au cours des essais, ont été successivement analysés :

- (1) l'influence du gradient moyen de température pour une humidité relative fixée ;
- (2) pour un même gradient thermique moyen et une même humidité relative, l'influence de la température moyenne ;
- (3) pour un même gradient moyen de température, l'influence d'une humidité relative proche de la saturation (nous verrons ultérieurement l'intérêt spécifique de cette situation lié à un développement particulier de la condensation).

Dans chaque cas, la simulation numérique du processus de condensation correspondant a été effectuée afin d'évaluer les modèles de transfert.

2.3.2. *Résultats.* Les résultats concernant l'évolution du profil de teneur en eau liquide condensée au cours du temps pour les différentes séries d'essais réalisées sont présentes sur les Figs. 4 à 7. Comme nous le verrons en détail dans le paragraphe suivant, la saturation observée est loin de correspondre aux prévisions déduites des travaux théoriques de Glaser [2] et de Vos [3], couramment utilisés pour l'étude de la condensation dans les matériaux de construction.

Les profils de température axiaux correspondant à la série B sont donnés à titre d'exemple sur la Fig. 8.

2.3.3. *Analyse des résultats.* On notera tout d'abord que les profils de saturation, correspondant à l'ensemble des séries A, B et C, présentent deux zones bien distinctes :

- (1) une zone sèche, comprise entre la face exposée dans la veine et l'interface de condensation et
- (2) une zone humide, partiellement saturée en liquide condensé, comprise entre l'interface de condensation et la surface froide en $x = L$.

Dans la zone sèche, l'évolution de la teneur en eau suit la loi d'adsorption du matériau, tandis que dans la zone humide, dont l'interface progresse au cours du temps sous l'influence conjointe des effets thermiques

Tableau 1.

Essais serie	T_c [°C]	$P_v(T_c)$ [Pa]	T_f [°C]	$P_{vs}(T_f)$ [Pa]	ϕ (%)	Durée des essais en jours
A	25	2375.25	5	871.85	75	4, 9, 16, 24, 40
B	30	3182.17	10	1227.1	75	4, 9, 16, 24, 30, 40, 50, 62, 135
C	40	5531.25	10	1227.1	75	4, 9, 16
D	25	3103.66	5	871.85	88	2, 4, 12

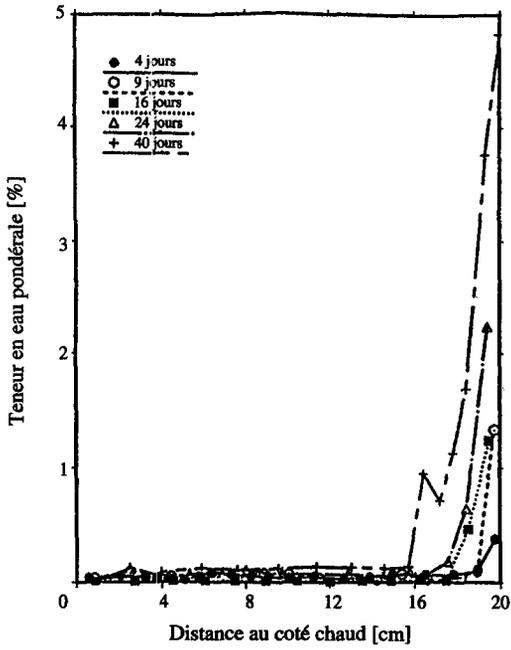


Fig. 4. Distributions d'humidité à différents temps. Type A de conditions expérimentales.

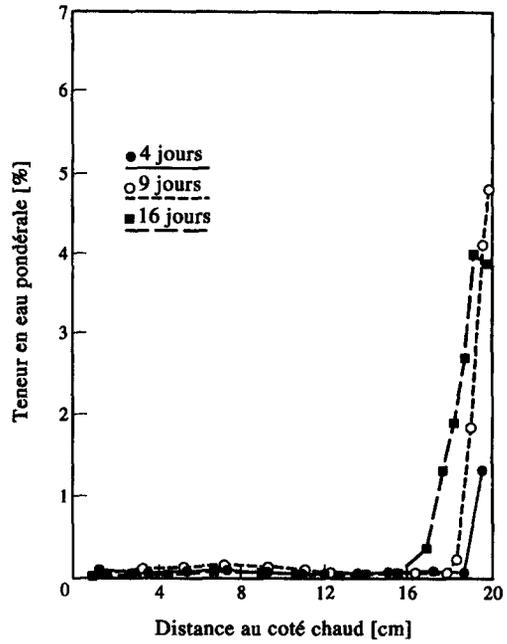


Fig. 6. Distributions d'humidité à différents temps. Type C de conditions expérimentales.

et hydriques (cf. Section 5), la condensation se poursuit.

Qu'il s'agisse de l'évolution de la teneur en eau moyenne ou de l'extension de la zone de condensation, rien de très spectaculaire n'est à noter dans les comparaisons effectuées entre les résultats des différentes séries d'essais. On observe, en effet, très logiquement, que la cinétique de condensation est bien pilotée par

la différence des pressions de vapeur en $x = 0$ et $x = L$. La masse d'eau condensée et l'extension de la zone de condensation croissant avec la différence $P\sigma|_{x=0} - P\sigma|_{x=L}$.

Comme en thermomigration, Crausse [17, 18], les profils de température présentent, quant à eux, des discontinuités de pentes traduisant principalement

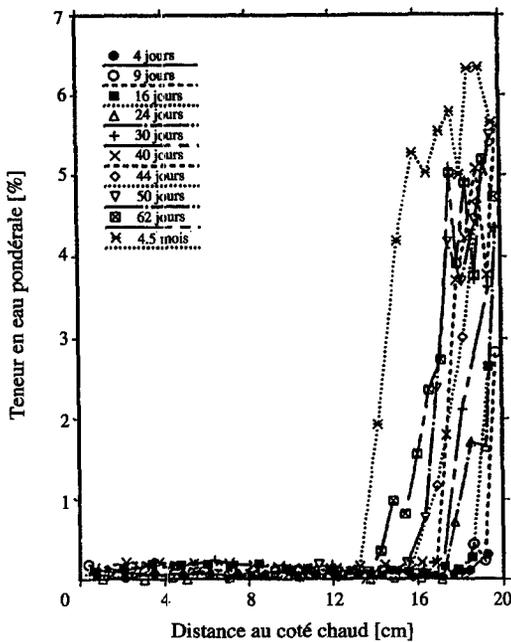


Fig. 5. Distributions d'humidité à différents temps. Type B de conditions expérimentales.

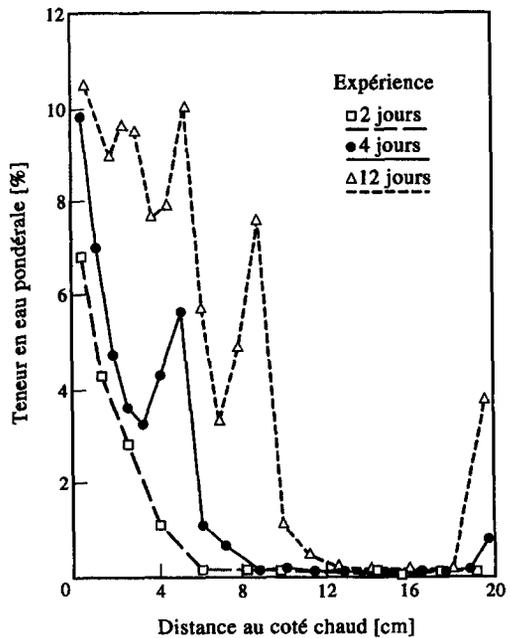


Fig. 7. Distributions d'humidité à différents temps. Type D de conditions expérimentales.

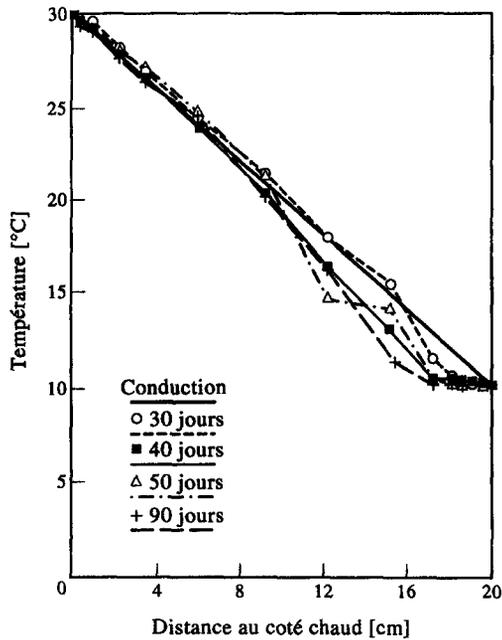


Fig. 8. Distributions de température à différents temps. Type B de conditions expérimentales.

l'évolution de la conductivité thermique apparente du matériau avec la teneur en eau.

Des tentatives de corrélation concernant l'évolution des teneurs en eau, masses d'eau condensées et extension de la zone humide en fonction du temps, ont été effectuées. Elle font apparaître une quasi-linéarité de la relation teneur en eau—temps et une évolution suivant une loi en at^n ($n \cong 1$) de l'extension de la zone partiellement saturée en liquide. Les résultats acquis sont cependant trop peu nombreux et les périodes d'essais de trop courte durée pour considérer ces propositions comme définitives, Larbi [16].

Comme nous l'avons suggéré antérieurement, la distribution d'humidité dans les essais de la série D se caractérise par une situation tout à fait singulière et fort appropriée à l'évaluation du système d'équations. Il est en effet remarquable de constater, dans ce cas, la formation de deux zones à forte condensation au cours du temps : une première zone au contact de la veine et une seconde au contact de la surface imperméable froide. Ces deux zones sont séparées par une troisième, pratiquement sèche en début d'expérience, qui se résorbe progressivement au cours du temps. L'existence de cette zone résulte des effets conjoints de réduction de l'humidité relative par condensation, dans la proche région de la veine et de maintien de la température, au-dessus de la température humide, par le changement de phase. Comme nous le verrons en détail, dans l'examen des résultats numériques, cette situation met en jeu des interactions complexes de diffusion—condensation, sous l'influence conjuguée des gradients de teneur en eau, et de température.

3. SIMULATION NUMERIQUE DE LA DIFFUSION—CONDENSATION

3.1. Modèle mathématique

Les premiers modèles théoriques qui ont été utilisés pour décrire les transferts couplés de chaleur et de masse avec changement de phase, mis en jeu dans les processus d'humidification des structures, considéraient uniquement les phénomènes de condensation liés au mécanisme de diffusion de la vapeur au sein du matériau Glaser [2]. Modifiée par Vos [3], puis par Kricher [4], pour prendre en compte l'influence des effets capillaires sur la phase fluide condensée, cette modélisation a été établie dans sa forme actuelle, faisant intervenir les effets de couplage entre transfert de masse et transfert de chaleur, respectivement par de Vries [5] en 1957 puis Luikov [6] en 1958. Ce modèle fondé sur l'identification du milieu poreux à un milieu continu fictif équivalent, a enfin été formellement justifié par Whitaker [8], en 1977.

Dans le cadre des hypothèses et restrictions précisées dans ref. [8] et généralement satisfaites dans les processus de condensation en régime diffusionnel, le formalisme proposé en ref. [5] apparaît actuellement comme celui dont le niveau de description des phénomènes est le plus complet. Il sera donc choisi comme référence, aussi bien pour conduire l'analyse et l'interprétation des résultats expérimentaux, que pour examiner les possibilités de simplification théorique comme suite à l'étude de sensibilité aux paramètres.

Dans le cas des transferts unidirectionnels étudiés ici, le système d'équations proposé par de Vries [5] pour décrire la condensation s'exprime sous sa forme complète par :

$$(1 + \alpha) \frac{\partial \omega}{\partial t} + \chi \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left((a_1 + a_v) \frac{\partial \omega}{\partial x} + (a_1 \delta_1 + a_v \delta_v) \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$\rho_0 L \alpha \frac{\partial \omega}{\partial t} + ((\rho C)^* + \rho_0 L \chi) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left((\lambda^* + \rho_0 L a_v \delta_v) \frac{\partial T}{\partial x} + \rho_0 L a_v \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) \quad (2)$$

Dans ces équations représentant respectivement les bilans de masse (1) et d'énergie (2), t est le temps, ρ_l la masse volumique du liquide, ρ_0 la masse volumique apparente du milieu poreux sec, ω la teneur pondérale en eau liquide, L l'enthalpie de changement de phase, λ^* et $(\rho C)^*$ la conductivité thermique et la chaleur volumique effectives du milieu poreux, T la température et a_1 , a_v , δ_1 , δ_v des coefficients, dépendant de la teneur en eau et de la température, traduisant les propriétés de transport de masse du matériau [5, 15, 16]. Les coefficients α et χ résultent quant à eux de l'expression de $(\partial \omega_v / \partial t)$, avec $\omega_v(\omega, T)$ teneur pondérale en vapeur d'eau, dans le bilan de masse. Comme les précédents ces coefficients sont de fonctions compliquées

de la teneur en eau, de la température et des caractéristiques de la microstructure du matériau considéré [20].

3.2. Conditions aux limites

Elles correspondent à celles des expériences. Le milieu poreux est supposé initialement sec à température uniforme, égale à celle de l’air circulant dans la veine.

Du point de vue des conditions aux frontières, en $x = 0$ et $x = L$, elles expriment respectivement : la condition de flux de masse nul et une température constante en $x = L$, la continuité des densités de flux de masse et d’énergie en $x = 0$.

La densité de flux de chaleur G , sur l’interface $x = 0$, somme du flux conductif et éventuellement du changement de phase (vapeur–liquide), Recan [21], s’exprime par :

$$G = -(\lambda^* + \rho_0 L a_v \delta_v) \frac{\partial T}{\partial x} - \rho_0 L a_v \frac{\partial \omega}{\partial x}. \quad (3)$$

En ce qui concerne la densité du flux massique W , elle correspond à l’addition des densité de flux de masse en phase vapeur et liquide, et s’exprime par :

$$W = -\rho_0 \left((a_l + a_v) \frac{\partial \omega}{\partial x} + (a_l \delta_l + a_v \delta_v) \frac{\partial T}{\partial x} \right). \quad (4)$$

Côté externe, c’est à dire dans l’atmosphère en contact avec le milieu poreux et plus précisément sur l’interface, les échanges convectifs sont communément régis par :

$$H = h_c(T_c - T_s) \quad \text{pour la densité de flux de chaleur} \quad (5)$$

où h_c est le coefficient de transfert de chaleur par convection et par :

$$E = h_m(P_v - P_s) \quad \text{pour la densité de flux de masse} \quad (6)$$

où h_m est le coefficient de transfert de masse.

T_s, T_c, P_s, P_v , correspondent respectivement aux températures et aux pressions partielles de vapeur d’eau à la surface du matériau $x = 0$ et dans l’air.

Les définitions qui précèdent conduisent dès lors aux expressions suivantes pour les conditions aux limites sur l’interface air–milieu poreux :

$$-\rho_0 \left((a_l + a_v) \frac{\partial \omega}{\partial x} + (a_l \delta_l + a_v \delta_v) \frac{\partial T}{\partial x} \right) = h_m(P_v - P_s) \quad (7)$$

pour la densité de flux de masse et :

$$-(\lambda^* + \rho_0 L a_v \delta_v) \frac{\partial T}{\partial x} - \rho_0 L a_v \frac{\partial \omega}{\partial x} = h_c(T_c - T_s) + L h_m(P_v - P_s) \quad (8)$$

pour la densité de flux de chaleur.

Comme l’a cependant montré Masmoudi [22], si les mécanismes physiques mis en jeu dans les processus de transfert au sein du milieu poreux sont relativement

bien décrits actuellement, le niveau de connaissances concernant les problèmes d’interface est, par contre, dans un état embryonnaire. Hormis quelques travaux récents, Larrea [23], Rogers *et al.* [24], sur la modélisation des échanges à l’interface air–milieu poreux, dans le cas de géométries de pores assez spécifiques, il convient de souligner en effet que les expressions des coefficients h_c et h_m sont généralement d’origine empirique, ce qui n’est pas sans poser de sérieuses difficultés de détermination dans la plupart des cas.

Pour respecter de manière rigoureuse les conditions de réalisation des essais, il aurait été nécessaire de prendre en compte, dans la simulation, les conditions de raccordement entre le milieu poreux et l’atmosphère (équations (7) et (8)), et par suite, de procéder à la détermination spécifique des coefficients de transfert. En fait, compte tenu des difficultés que présente une telle détermination mais aussi en raison du caractère artificiel de ces coefficients, nous avons opté pour une procédure semi-empirique consistant à imposer, sur l’interface, les température et densité de flux de masse déduites de l’expérience. Comme évoqué dans [18] étant donné que l’objectif essentiel de l’étude concerne l’analyse des phénomènes qui se développent au sein du milieu poreux, il est en effet équivalent de ce point de vue, d’étudier ces phénomènes en imposant sur l’interface les lois expérimentales qui rendent compte explicitement et précisément du couplage et des interactions entre couches limites externes et milieu poreux.

Compte tenu de ces remarques, les conditions aux limites retenues pour la résolution du système d’équations (1) et (2) ont été les suivantes : sur la surface libre $x = 0$:

$$\left. \begin{aligned} -\rho_0 \left((a_l + a_v) \frac{\partial \omega}{\partial x} + (a_l \delta_l + a_v \delta_v) \frac{\partial T}{\partial x} \right) &= m(t) \\ T &= T_s(t) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

avec $m(t)$ et $T_s(t)$ correspondant aux résultats expérimentaux, et à l’extrémité $x = L$ où la densité de flux de masse est nulle et la température T_f imposée :

$$\left. \begin{aligned} -\rho_0 \left((a_l + a_v) \frac{\partial \omega}{\partial x} + (a_l \delta_l + a_v \delta_v) \frac{\partial T}{\partial x} \right) &= 0 \\ T &= T_f = cte \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Les conditions initiales relatives à la teneur en eau et à la température étant données, quant à elles par :

$$\left. \begin{aligned} t \leq 0 & \left\{ \begin{aligned} \omega &= \omega_0 = 0.02\% \\ T &= T_c \end{aligned} \right. \quad (11) \\ x \in (0, L) & \end{aligned} \right\}$$

le milieu poreux étant en équilibre hygrothermique dans l’atmosphère du laboratoire.

La technique numérique mise en oeuvre pour résoudre le système d’équations (1) et (2) associé aux conditions aux limites (9) à (11) est une méthode aux éléments finis dont la présentation détaillée a été faite dans refs. [18] et [25].

Les coefficients de transfert de masse et les proprié-

tés thermophysiques du milieu poreux utilisés dans le calcul résultent de la banque de données antérieurement publiée [17, 18, 20]. De plus amples détails pourront d'ailleurs être trouvés dans ces documents, tant en ce qui concerne les méthodes expérimentales mises en oeuvre pour procéder à ces déterminations qu'en ce qui concerne les valeurs numériques des coefficients.

4. COMPARAISON THEORIES-EXPERIENCES

Les résultats d'expériences ont tout d'abord été comparés avec les résultats déduits des modèles simplifiés de Glaser et de Vos, couramment utilisés pour estimer les condensations dans les matériaux de construction, avant d'être comparés aux prédictions du modèle de de Vries.

4.1. Modèles de Glaser et de Vos

Compte tenu des spécificités de ces modèles, les comparaisons portent respectivement sur les masses de vapeur d'eau condensée (Glaser) et sur l'extension de la zone de condensation (Vos).

Comme cela avait déjà été montré par Kooi [26] et comme le confirment les résultats présentés dans le Tableau 2 ci-dessous, on peut constater que le modèle de Glaser est un outil particulièrement grossier d'évaluation de la masse de vapeur d'eau condensée dans les matériaux capillaro-poreux.

Les écarts observés ont notamment pour causes :

(1) la non-prise en compte de l'évolution de la conductivité thermique apparente du matériau avec la teneur en eau : phénomène qui a pour effet, compte tenu des conditions aux limites fixées, de rapprocher l'isotherme de saturation de la face chaude et

(2) la non-prise en compte de l'écoulement en phase liquide sous l'influence de forces capillaires.

Ces deux phénomènes, dont on appréciera mieux le rôle tout à fait capital dans l'étude de sensibilité aux paramètres, ont en effet pour conséquence, dès lors qu'ils sont négligés, de sous-estimer les masses d'eau condensées.

Comme on peut le constater sur la Fig. 9, la méthode de Vos, appliquée au calcul de l'extension de la zone de condensation, n'est pas plus adéquate que la méthode de Glaser pour le calcul des masses d'eau condensées. De notre point de vue, les écarts entre les résultats théoriques et expérimentaux concernant ce phénomène ont pour origine les limitations induites sur le flux de masse, par le gradient de température. La description de la cinétique de condensation en milieu

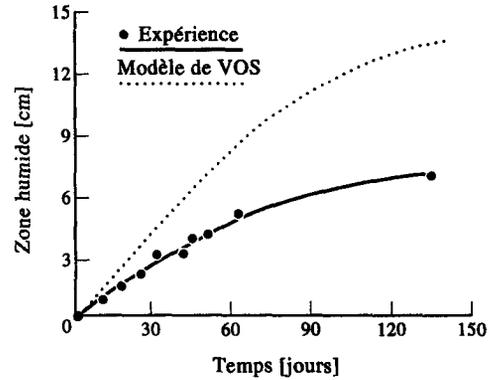


Fig. 9. Evolution de la zone humide au cours du temps. Comparaison expérience-modèle de Vos.

poreux, proposée par Vos ne prend en effet en considération que le flux de masse en phase liquide résultant des gradients de teneur en eau, l'effet du gradient thermique étant négligé. Or, comme l'indique le modèle de de Vries et comme le confirme l'analyse des mécanismes, dans ces phénomènes couplés, les flux de masse en phase liquide, induits par les forces capillaires et dus aux gradients de température et de saturation sont à contre-courant.

Il convient de souligner enfin qu'aussi bien dans la théorie de Glaser que dans celle de Vos les coefficients de transferts sont considérés constants ce qui conduit à une inadaptation totale de ces modèles pour décrire certains phénomènes observés par ailleurs.

4.2. Modèle de de Vries

Quelques résultats de simulation numérique du processus de condensation le plus complexe que nous ayons observé et correspondant à la série d'essais D, sont présentés sur les Fig. 10–12. Une comparaison plus large des résultats de simulation avec les expériences est effectuée quant à elle sur les Fig. 13–17 pour les profils de saturation, sur la Fig. 18 pour les profils de température.

D'une manière générale, ces comparaisons confirment le caractère satisfaisant du modèle de de Vries pour décrire les phénomènes observés expérimentalement. Si l'on veut bien convenir, comme cela a été montré en thermomigration, Recan [20], Prat [19], que les écarts observés sur la valeur maximale de la teneur en eau en $x = 0$ peuvent provenir de l'influence de la gravité (non prise en compte dans nos calculs, et dont le rôle devient appréciable lorsque la teneur en

Tableau 2. Masses d'eau condensées au terme de différents essais de durée 16 jours. Comparaison expérience-modèle de Glaser

Conditions expérimentales	$T_c = 25^\circ\text{C}, T_f = 5^\circ\text{C}, \phi = 75\%$	$T_c = 30^\circ\text{C}, T_f = 10^\circ\text{C}, \phi = 75\%$	$T_c = 40^\circ\text{C}, T_f = 10^\circ\text{C}, \phi = 75\%$
Résultats expérimentaux	2.34 g	2.57 g	3.7 g
Résultats du modèle	0.96 g	1.08 g	2.03 g

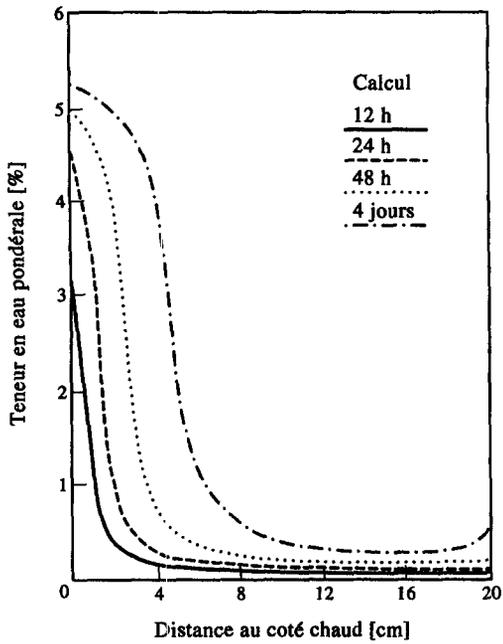


Fig. 10. Distributions d'humidité (calcul numérique). Type D de conditions expérimentales.

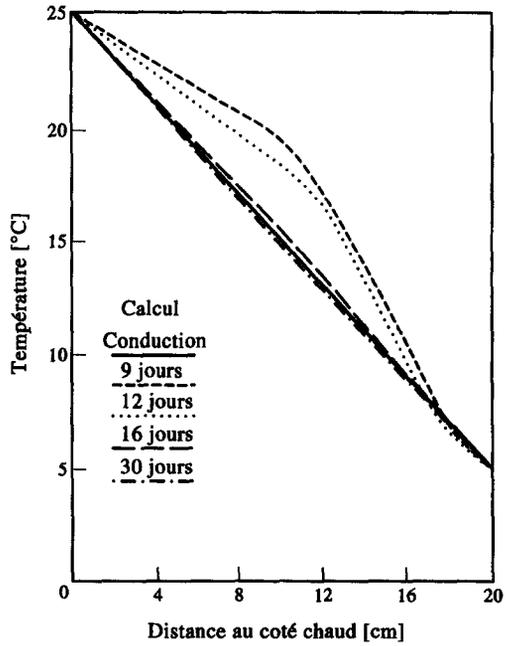


Fig. 12. Distributions de température (calcul numérique). Type D de conditions expérimentales.

eau pondérale dépasse 3–4% pour le matériau choisi) ou de condensations parasites sur les parois de la soufflerie, on notera en effet que les équations (1) et (2) décrivent bien l'essentiel des observations effectuées lors des essais.

Le changement de pente des profils de température résulte, quant à lui, de l'influence des mécanismes de changement de phase mais surtout de l'évolution de

la conductivité thermique du milieu avec la teneur en eau. Comme nous l'avons évoqué précédemment à propos de l'hypothèse de Glaser, consistant à considérer un profil thermique de conduction linéaire, et comme les résultats suivants l'illustreront encore mieux, ces aspects thermiques et en particulier l'évolution des profils de température, jouent un rôle tout à fait capital, non seulement sur la cinétique de

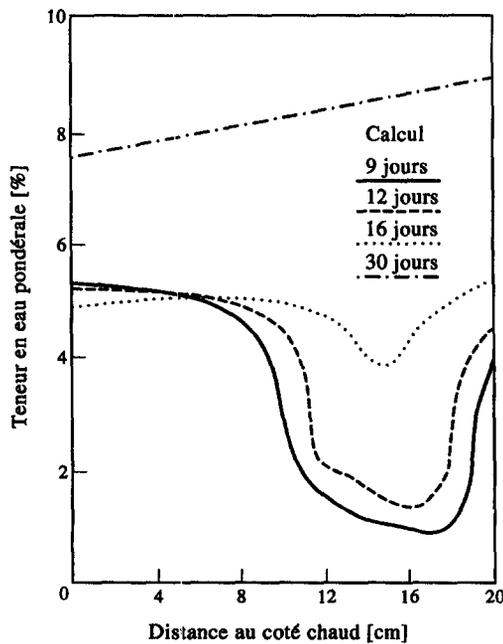


Fig. 11. Distributions d'humidité (calcul numérique). Type D de conditions expérimentales.

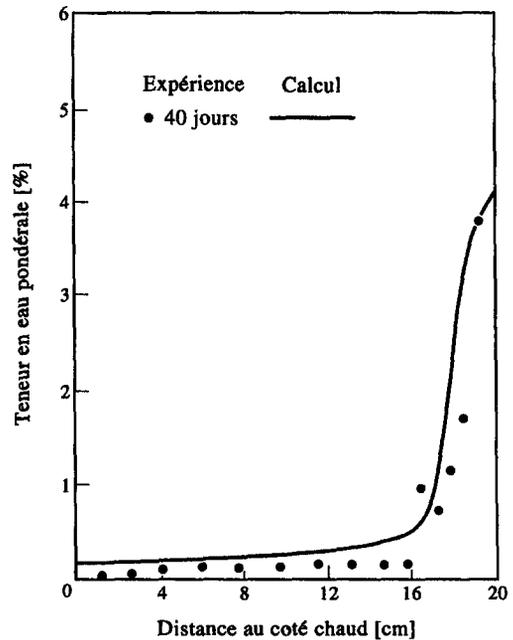


Fig. 13. Distributions d'humidité (comparaison expérience-calcul). Type A de conditions expérimentales.

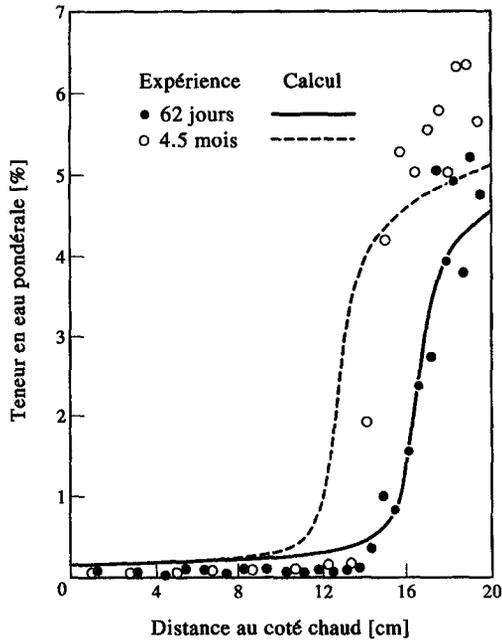


Fig. 14. Distributions d'humidité (comparaison expérience-calcul). Type B de conditions expérimentales.

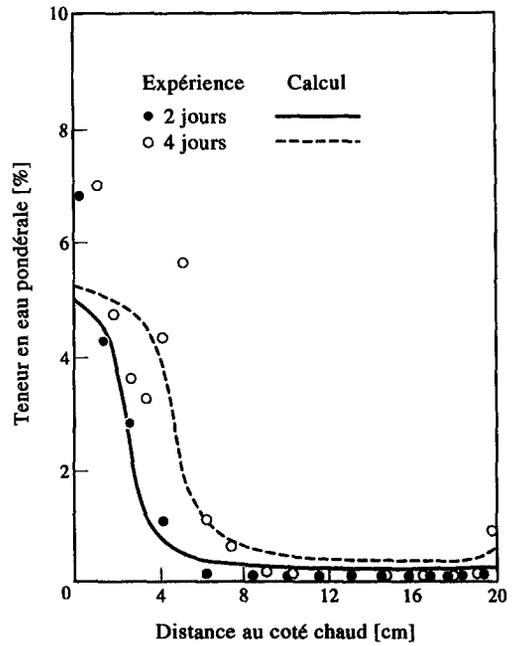


Fig. 16. Distributions d'humidité (comparaison expérience-calcul). Type D de conditions expérimentales.

condensation mais aussi sur la localisation des zones de condensation au sein du matériau au cours du temps.

C'est à la suite de cette remarque qu'on été décidées les expériences particulières, conduisant à l'apparition et au développement quasi-simultané de plusieurs zones de condensation au sein du milieu poreux. Dans le cadre de notre programme, cette situation qui en

raison de sa complexité constitue un excellent test d'évaluation du modèle correspond aux conditions réalisées dans la série d'essais D. Comme nous avons pu le constater expérimentalement et comme le confirment les simulations numériques, ces conditions conduisent effectivement à la formation d'un profil de teneur en eau original caractérisé par le développe-

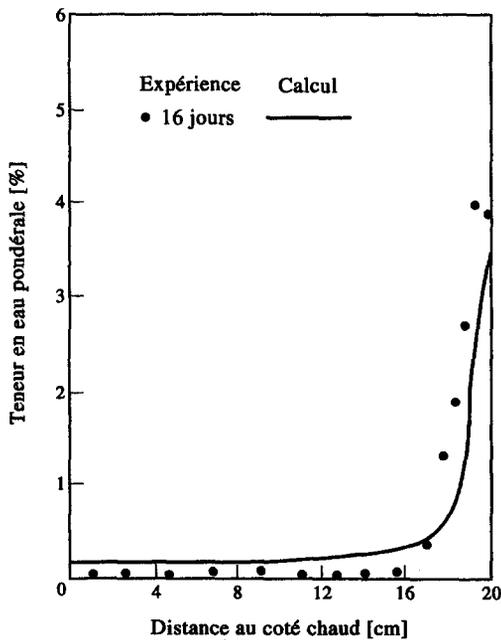


Fig. 15. Distributions d'humidité (comparaison expérience-calcul). Type C de conditions expérimentales.

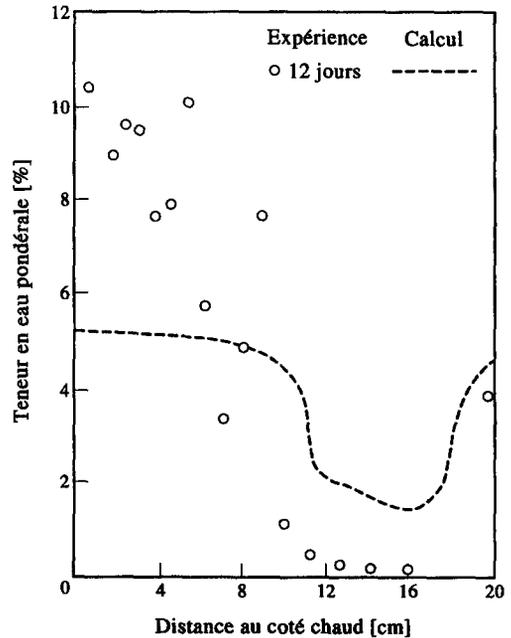


Fig. 17. Distributions d'humidité (comparaison expérience-calcul). Type D de conditions expérimentales.

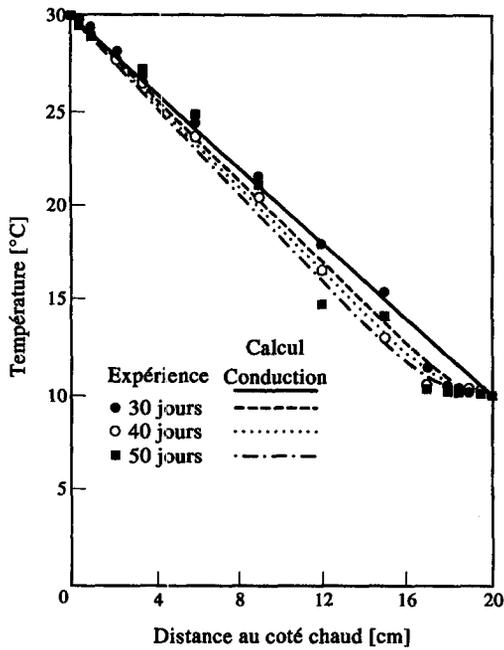


Fig. 18. Distributions de température (comparaison expérience-calcul). Type B de conditions expérimentales.

ment de deux zones de condensation, limitant une zone pratiquement sèche qui se résorbe progressivement (Fig. 11 et 17). Ces profils, fortement influencés par l'évolution du profil de température (Fig. 12) sont le résultat de processus simultanés de condensation-diffusion-condensation (cf. Section 5).

La comparaison des résultats numériques et expérimentaux relatifs aux distributions d'humidité, correspondant à la série d'essais D est effectuée sur les Figs. 16 et 17. Cette comparaison, qualitativement satisfaisante, fait cependant apparaître des différences importantes sur le profil de teneur en eau. Compte tenu des conditions expérimentales (taux d'humidité dans l'air proche de 1), ces différences ont vraisemblablement pour origine les condensations parasites et le ruissellement observés dans la veine de la soufflerie en cours d'essais.

On notera enfin (Figure 19) le bon accord qui se dégage de la comparaison entre les résultats fournis par le modèle et les mesures, concernant l'extension, de la zone de condensation en fonction du temps dans le voisinage de la surface froide.

5. ANALYSE DES MECANISMES MIS EN JEU

Compte tenu de l'accord plutôt satisfaisant qui se dégage des comparaisons précédentes, il nous a paru utile d'exploiter le code de calcul en vue de préciser la contribution des différents mécanismes sur le développement de la condensation. Dans cette perspective, nous nous sommes attachés, d'une part à l'examen des différents flux instantanés globaux (massique et thermique), d'autre part, dans l'expression de ces flux, à identifier les contributions provenant des gradients

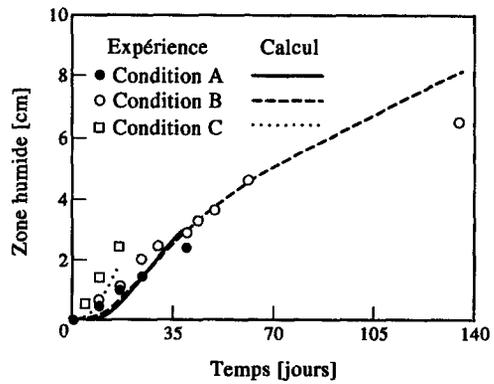


Fig. 19. Evolution de la zone humide au cours du temps. Comparaison expérience-calcul.

de saturation et de température. L'analyse ainsi effectuée, non seulement fournit les éléments de compréhension détaillés du processus de condensation mais permet également de prévoir les éventuelles simplifications qui peuvent être apportées dans la modélisation (étant entendu que la procédure spécifique de détermination de ces flux mérite d'être améliorée pour limiter les sur et sous-déterminations des grandeurs calculées dans les zones à fortes variations de gradients, c'est-à-dire au front de condensation).

En raison de la similitude des résultats relatifs aux essais A, B et C, les commentaires qui suivent s'appliquent exclusivement sur la série B mais valent sans distinction pour les trois séries. Des commentaires spécifiques seront associés aux résultats de la série d'essais D, compte tenu du déroulement particulier du processus de condensation dans ce cas.

5.1. Flux de masse en phase liquide

On notera, tout d'abord, que la densité de flux de masse en phase liquide \bar{J}_1 (Fig. 20) est toujours négative. Compte tenu de la convention adoptée : flux positif dirigé de la veine vers le milieu poreux, le liquide a donc tendance à envahir le milieu depuis la plaque froide, sur laquelle démarre la condensation, vers l'interface $x = 0$. Conformément à l'évolution des coefficients de transfert de masse, cette densité de flux est nulle dans la zone d'adsorption (côté veine) puis croît et passe par un maximum dans la zone de condensation. En début d'essai, ce flux est évidemment égal à zéro puisque la masse de liquide condensé est elle-même nulle.

Si l'on examine l'évolution des différentes composantes du flux liquide, Figs. 21 et 22, on note que la densité de flux induite par le gradient de température, ∇T , est positive et sensiblement plus faible, en valeur absolue, que celle, négative, induite par le gradient de teneur en eau $\nabla \omega$. Bien que la contribution thermique ne devienne significative qu'assez tard (au-delà de 40 jours), ce phénomène a pour effet de ralentir la vitesse d'imbibition de la zone sèche par le front de condensation, d'où les différences observées, concernant l'ex-

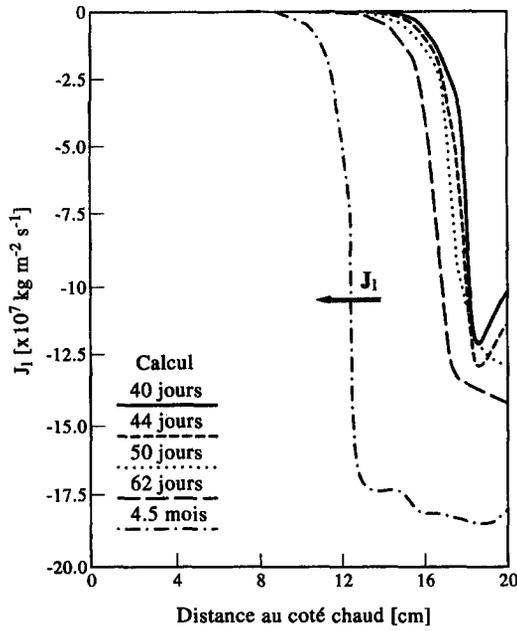


Fig. 20. Distributions de densité de flux en phase liquide. Type B de conditions expérimentales.

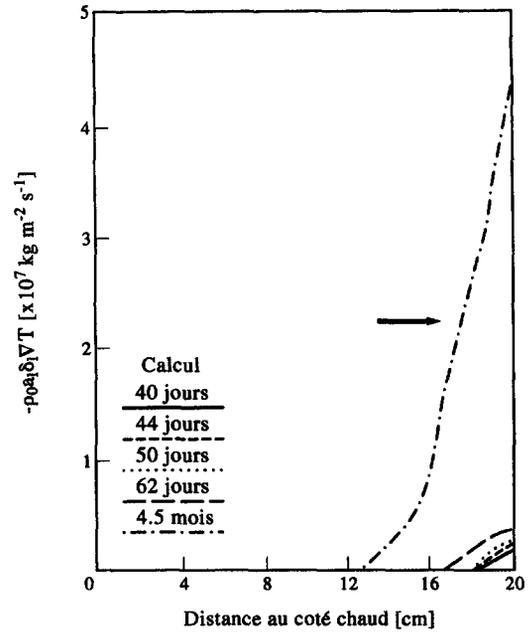


Fig. 22. Distributions de densité de flux en phase liquide due au gradient thermique. Type B de conditions expérimentales.

tension de la zone humide, avec les prédictions du modèle de Vos [3].

5.2. Flux de masse en phase vapeur

Outre l'évolution décroissante, au cours du temps, de la densité de flux de masse en phase vapeur J_v sur

la face d'entrée, $x = 0$, on notera que contrairement au flux de masse liquide :

- (1) le flux de masse en phase vapeur est positif et par conséquent dirigé de la face d'entrée vers la face froide imperméable (Fig. 23) et
- (2) la composante de la densité de flux due au gra-

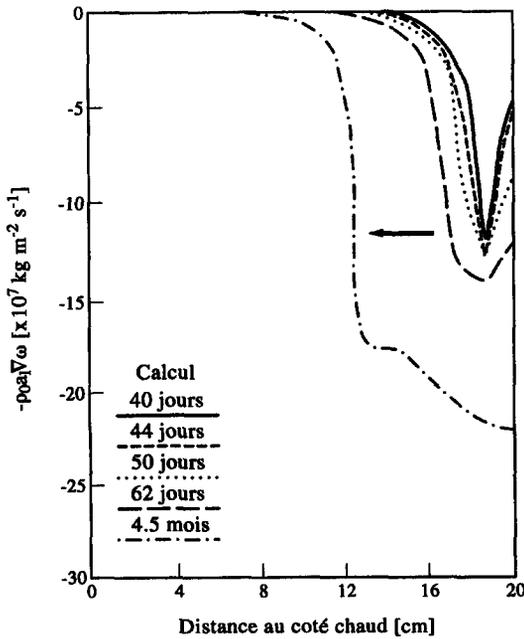


Fig. 21. Distributions de densité de flux en phase liquide due au gradient d'humidité. Type B de conditions expérimentales.

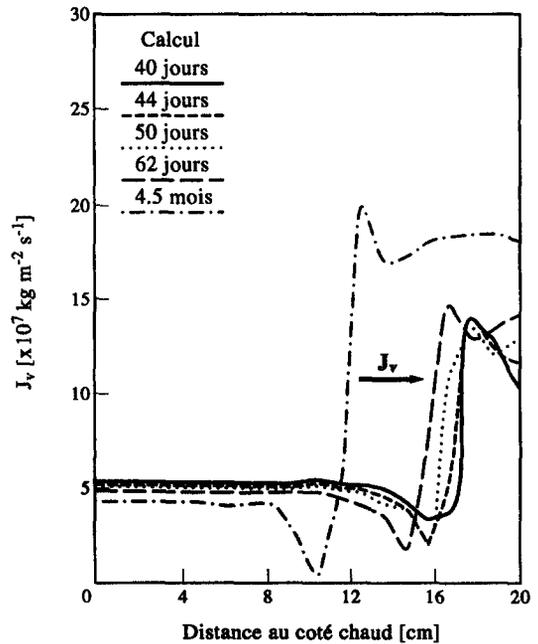


Fig. 23. Distributions de densité de flux en phase vapeur. Type B de conditions expérimentales.

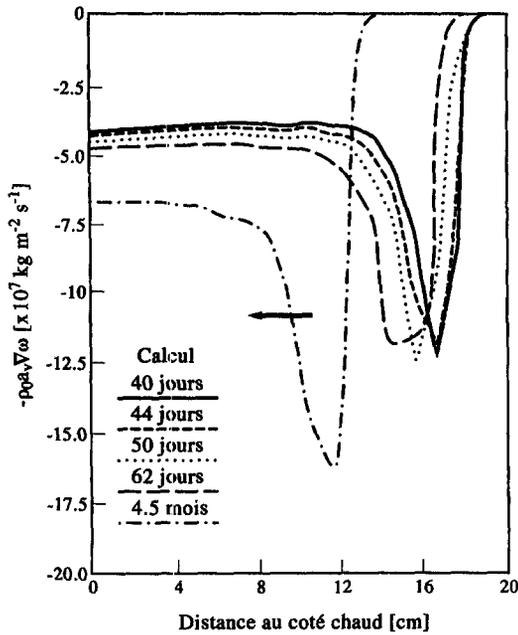


Fig. 24. Distributions de densité de flux en phase vapeur due au gradient d'humidité. Type B de conditions expérimentales.

dient thermique est positive (Fig. 25) et sensiblement plus importante que la composante négative induite par le gradient de saturation (Fig. 24).

Les profils des densités de flux de masse en phase vapeur sont linéaires aux premiers instants. Ils présentent ensuite une allure quasi-constante tout au long de la partie sèche de l'échantillon, puis des variations

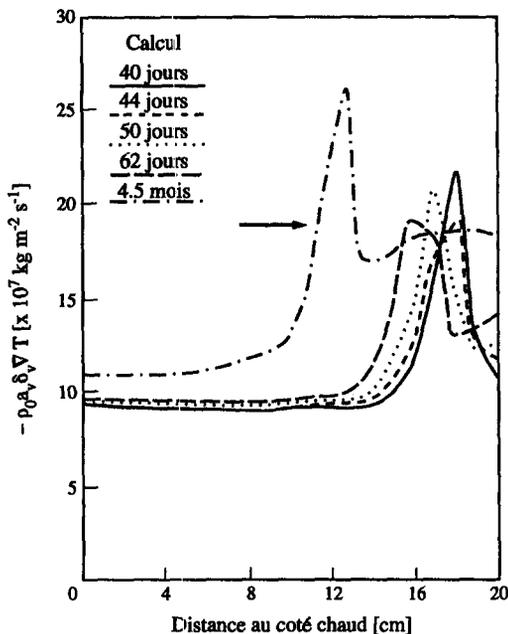


Fig. 25. Distributions de densité de flux en phase vapeur au gradient thermique. Type B de conditions expérimentales.

dans la zone humide. Comme dans le cas du liquide, ces variations sont le résultat de l'évolution conjointe des gradients locaux de saturation et de température ainsi que des évolutions complexes des coefficients de transfert en fonction de ces grandeurs, [17, 18, 20].

5.3. Flux de masse liquide et vapeur

Comme l'indiquent les résultats concernant les densités de flux de masse liquide et vapeur dues aux gradients thermique et de teneur en eau, on observera que la densité de flux en phase liquide est principalement induite par le gradient d'humidité. Par contre, dans le cas du flux en phase vapeur, c'est le gradient thermique qui joue le rôle prépondérant (nous verrons ultérieurement quel profit peut être tiré de cette remarque).

La densité de flux liquide + vapeur (Fig. 26), est positive décroissante au cours du temps sur la face en contact avec la veine (la valeur limite nulle correspondant à la saturation complète du milieu dans le domaine compris entre la surface isotherme froide et l'isotherme de saturation) et égale à zéro (conformément aux conditions d'imperméabilité et de conservation de la masse) sur la face $x = L$ et sur l'interface de condensation. L'annulation de cette densité de flux est le résultat de la compétition entre condensation de vapeur et succion capillaire agissant sur le fluide condensé.

5.4. Flux de chaleur

Les contributions respectives du changement de phase et de la conduction, sur l'évolution locale instantanée de la densité de flux de chaleur, sont représen-

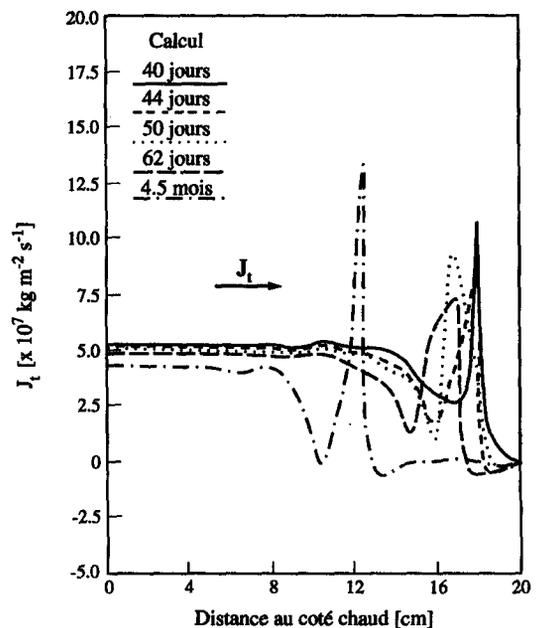


Fig. 26. Distributions de densité de flux de masse totale. Type B de conditions expérimentales.

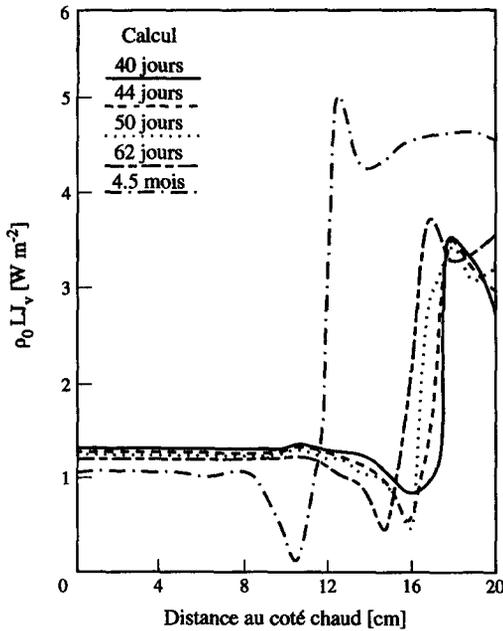


Fig. 27. Distributions de densité de flux de chaleur due au changement de phase. Type B de conditions expérimentales.

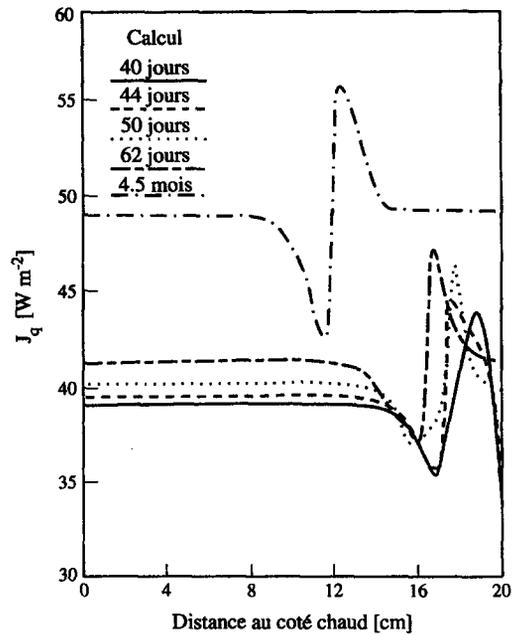


Fig. 29. Distributions de densité de flux de chaleur totale. Type B de conditions expérimentales.

tées sur les Figs. 27 et 28). On note que malgré le changement de phase, le mode de transfert thermique prédominant est de type conductif, mais que la densité de flux, due à la libération de chaleur latente par la condensation, peut représenter jusqu'à 10% de la seule contribution conductive.

L'évolution très importante de la conductivité thermique du milieu poreux avec la teneur en eau liquide

est à l'origine, quant à elle, des variations spatiales instantanées non monotones de la contribution conductive $-\lambda^*VT$ représentée Fig. 28.

Les effets conjoints de changement de phase et d'évolution de la conductivité thermique apparente du milieu poreux conduisent enfin à un accroissement significatif de la densité de flux de chaleur transmise (Fig. 29). Exprimé en nombre de Nusselt Nu^* , défini par le rapport de la densité de flux instantané qui transfère sur la densité de flux transférée par le milieu initialement sec, on observe, en effet, que l'échange thermique en régime de condensation est multiplié par 1.5 sur la durée d'expérience.

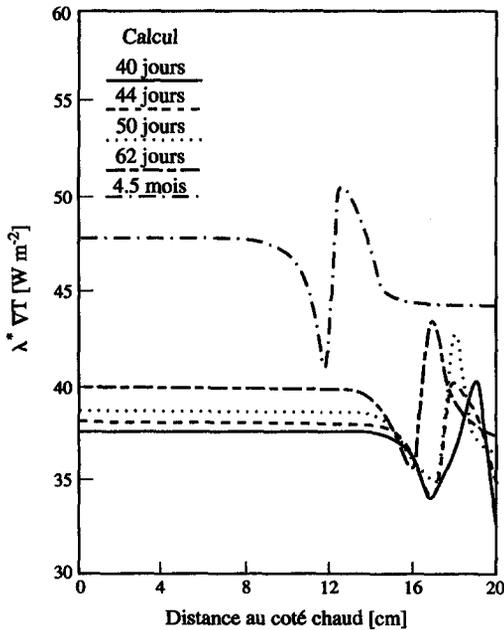


Fig. 28. Distributions de densité de flux de chaleur due à la conduction. Type B de conditions expérimentales.

5.5. Commentaires spécifiques à la série D

Comme le montre l'examen des profils de densités de flux de masse en phase liquide (Fig. 30), dans ce cas, la condensation se produit essentiellement sur la partie chaude en début d'essai puis l'extension de la zone humide se poursuit par le biais des forces capillaires.

L'intervention simultanée des mécanismes de diffusion-condensation explique par ailleurs la présence d'une densité de flux de masse en phase liquide sur la paroi imperméable, à contre-courant, par rapport à celle qui prend naissance sur l'interface chaude. Ces deux flux contribuent à la résorption de la zone sèche existant entre les deux zones de condensation.

Contrairement aux séries d'essais A, B et C on observe en outre que dans le voisinage de la face exposée à la veine le flux de masse en phase liquide joue un rôle pratiquement égal à celui de la phase vapeur et que, dans cette zone, la contribution de la composante thermique est du même ordre de grandeur que la com-

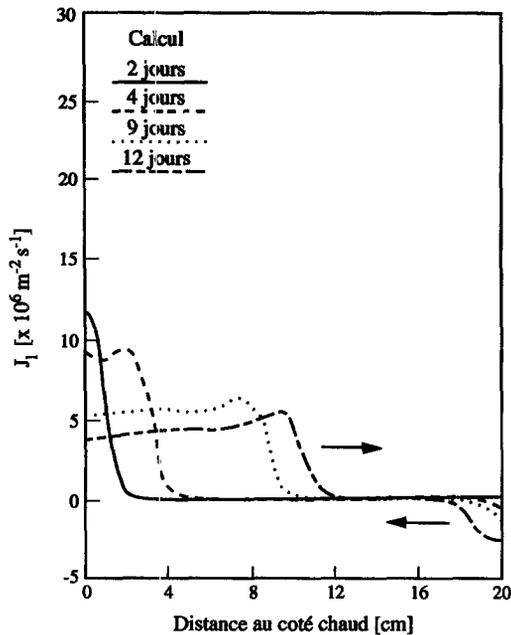


Fig. 30. Distributions de densité de flux en phase liquide. Type D de conditions expérimentales.

posante hydrique. Il est enfin important de noter que ces deux composantes sont orientées dans le même sens, ce qui favorise la progression (vitesse et extension) de la zone humide depuis l'interface $x = 0$ vers la surface froide $x = L$.

S'agissant de la densité de flux de chaleur, une constatation identique à celle déjà faite pour les essais A, B et C s'impose : le transfert de chaleur est principalement conductif mais le changement de phase conduisant à la condensation peut entraîner des accroissements tout à fait significatifs de la densité de flux transmise ($Nu^* \cong 2$ le douzième jour).

5.6. Etude de sensibilité aux paramètres

En vue d'apprécier l'importance relative des différents paramètres et par voie de conséquence les possibilités d'évaluation quantitative du modèle, une étude de sensibilité portant sur les termes d'accumulation en phase vapeur et sur les coefficients de transfert, a été effectuée.

5.6.1. Influence des termes d'accumulation en phase vapeur. Elle a été appréciée en comparant l'évolution des profils de teneur en eau, déduite de la résolution numérique du modèle complet, à celle déduite de la résolution numérique d'un modèle simplifié dans lequel les termes $\chi(\partial\omega/\partial t)$ et $\chi(\partial T/\partial t)$ sont considérés comme étant a priori négligeables.

Pour le matériau considéré, compte tenu des valeurs de α et χ ($\approx 10^{-6}$) comme le laisse prévoir un simple examen de l'équation de bilan de masse l'influence de ces termes n'est sensible qu'à très faible saturation et plus précisément ici, dans le domaine d'adsorption. Ce résultat est intéressant, dans la mesure où il confirme, comme en séchage, l'hypothèse consistant à négliger

les variations locales instantanées de la masse de vapeur, dans le bilan de masse total, lorsque le changement de phase s'effectue dans des conditions suffisamment éloignées des conditions de saturation Larbi [16].

5.6.2. Influence des coefficients de transfert de masse. Compte tenu des fortes non-linéarités des lois d'évolution des coefficients de transfert avec la teneur en eau, il est extrêmement difficile de dégager des tendances générales d'évolution des profils de saturation en fonction de ces paramètres. Cet aspect des choses mis à part, on note que cette influence (estimée sur la base de variations de $\pm 50\%$ des coefficients de transfert de masse a et $a\delta$) est cependant relativement grande et du même ordre de grandeur pour chaque couple de coefficients. On note aussi, que les écarts engendrés par les variations des coefficients, sur les profils de saturation, sont de même importance, voire même inférieurs, à ceux résultant des incertitudes de mesure Larbi [16].

Tandis que la première remarque écarte toute simplification du modèle a priori, la seconde, exclut donc, quant à elle, toute possibilité de validation quantitative précise. Comme en d'autres circonstances, nous touchons ici à l'un des problèmes majeurs des études en milieu poreux : l'écart considérable qui sépare actuellement le niveau de raffinement théorique dont on dispose pour étudier les phénomènes, des moyens pratiques, souvent grossiers, qu'il est possible de mettre en oeuvre pour effectuer leur investigation expérimentale.

5.6.3. Influence de la conductivité thermique. Compte tenu de l'évolution de la conductivité thermique du matériau avec la teneur en eau, l'influence de ce paramètre est d'autant plus sensible que la teneur en eau est forte. Dans ce cas, elle contribue à modifier le profil de condensation par déplacement de la température de saturation et donc de l'interface zone humide-zone sèche, vers l'extrémité $x = 0$ Larbi [16].

6. CONCLUSIONS

Situé dans le prolongement des recherches déjà effectuées sur la thermomigration et le séchage, le travail présenté ici concerne l'étude expérimentale et théorique de la diffusion d'air humide avec condensation de vapeur d'eau au sein d'un matériau capillaire poreux initialement sec.

Outre la complexité des interactions entre processus de condensation intervenant en régime transitoire pour certains types de conditions aux limites (cf. série d'essais D), la comparaison entre les résultats d'expériences et de simulation numérique nous a successivement permis de montrer :

(1) le rôle et l'importance relative des mécanismes de transfert de masse, ainsi que de leurs composantes, respectivement associées aux gradients de teneur en eau et de température, sur la formation des fronts de condensation et leur évolution ;

(2) qu'en dehors du domaine d'adsorption, où leur influence reste prépondérante, les termes d'accumulation en phase vapeur, de l'équation du bilan de masse total, deviennent rapidement négligeables pour décrire les transferts ;

(3) qu'en présence de gradients de température, la cinétique d'imbibition du milieu par la phase condensée se trouve ralentie ;

(4) que les modèles simplifiés : Glaser et Vos négligeant le transfert en phase liquide, le couplage du transfert de masse avec le transfert de chaleur, et supposant les coefficients constants, ne permettent pas d'effectuer des prédictions correctes tant en ce qui concerne les masses de vapeur d'eau condensées que l'évolution de la zone de condensation et

(5) enfin et surtout que le modèle de Vries constitue un outil de description tout à fait satisfaisant des processus de condensation interne et de leur évolution. Compte tenu des difficultés d'investigation expérimentales, aucune conclusion ne peut cependant être avancée concernant les capacités de prévision quantitative précise de ce modèle.

BIBLIOGRAPHIE

- E. W. Comings and T. K. Sherwood, The drying of solids—VII. Moisture movement by capillarity in drying granular materials. *Ind. Engng Chem.* **26**(10), 1096–1098 (1934).
- H. Glaser, Grafisches vehren zur Untersuchung von Diffusionvorgängen. *Kaptechnik* **11**, 467–477 (1959).
- B. H. Vos and E. Tammes, Condensation in structures (general aspects), *Build. Int.* **8**, 467–477 (1975).
- O. Krischer and K. Kroll, Technique du séchage, Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques, B.P. N° 9, 91402 Orsay (1978).
- D. A. de Vries, The theory of heat and moisture transfer in porous media revisited, *Int. J. Heat Mass Transfer* **30**(7), 1343–1350 (1987).
- A. V. Luikov, *Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies*. Pergamon Press, Oxford (1966).
- C. M. Marle, On macroscopic equations governing multiphase flow with diffusion and chemical reactions in porous media, *Int. J. Engng Sci.* **20**(5), 643–662 (1982).
- S. Whitaker, Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media. A theory of drying in porous media, *Adv. in Heat Transfer* **13**, 119–200 (1977).
- S. Bories, Fundamentals of drying of capillary porous bodies. In *Convective Heat Transfer*, pp. 391–434. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands (1991).
- P. Perre, M. Moser and M. Martin, Advances in transport phenomena during convective drying with superheated steam and moist air, *Int. J. Heat Mass Transfer* **36**(11), 2725–2746 (1993).
- P. Crausse, G. Bacon and Langlais C., Experimental and theoretical study of simultaneous heat and moisture transfer in a fibrous insulants, *J. Thermal Insulation* **9**, 46–67 (1985).
- Y. Ogniewicz and C. L. Tien, Analysis of condensation in porous insulations, *Int. J. Heat Mass Transfer* **24**(3), 421–429 (1981).
- K. Vafai and S. Sarkar, Condensation effects in a fibrous insulation slab, *Trans. ASME, J. Heat Transfer* **108**, 667–675 (1986).
- N. E. Wijesunaera, M. N. A. Hawlader and Y. T. Tan, Water vapour diffusion and condensation fibrous insulation, *Int. J. Heat Mass Transfer* **32**(10), 1865–1878 (1989).
- S. Bories, Transferts de chaleur et de masse dans les matériaux. Analyse critique de différents modèles. Dans *L'humidité dans le bâtiment* (Edited by Conseil International de la Langue Française), pp. 13–72 (1984).
- S. Larbi, Quelques aspects de la physique des transferts en milieu poreux lors d'un processus d'humidification par condensation, Thèse de l'INP de Toulouse, France (1990).
- P. Crausse, Etude fondamentale des transferts couplés de chaleur et d'humidité en milieu poreux non saturé, Thèse de Doctorat d'Etat, INP Toulouse, France (1983).
- P. Crausse, G. Bacon and S. Bories, Etude fondamentale des transferts couplés chaleur-masse en milieu poreux, *Int. J. Heat Mass Transfer* **24**(6), 991–1004 (1981).
- M. Prat, Analysis of experiments of moisture migration caused by temperature differences in unsaturated porous medium by means of two-dimensional numerical simulation, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **29**(7), 1033–1039 (1986).
- S. Bories, G. Bacon and M. Recan, Experimental and numerical study of coupled heat and mass transfer in porous materials. In *Drying of Solids, Recent International Developments*, pp. 15–21. Wiley Eastern Limited (1986).
- M. Recan, Simulation numérique du comportement thermique et hydrique d'un sol nu. Application à l'étude de l'évaporation par télédétection, Thèse de Docteur-Ingénieur de l'INP de Toulouse (1982).
- W. Masmoudi, Contribution à l'étude du séchage des matériaux capillaro-poreux. Critique de la modélisation macroscopique et du protocole expérimental de validation, Thèse INP Toulouse (1989).
- J. C. Larrea, Etude par simulation numérique de l'hydrodynamique au voisinage d'une interface poreuse, Thèse de Doctorat de l'INP de Toulouse (1991).
- J. A. Rogers and M. Kaviany, Variation of heat and mass transfer coefficient during drying of granular beds, *ASME J. Heat Transfer* **112**, 668–674 (1990).
- G. Bacon, Simulation numérique des transferts de chaleur et de masse dans un milieu poreux non saturé. Colloque sur les Transferts de Chaleur et de Masse en Milieu Poreux, Lausanne, Suisse (1982).
- J. V. D. Kool, Moisture transport in cellular concrete roofs, Ph. D. Thesis, Eindhoven University of Technology, Walman, Delft, The Netherlands (1971).

HUMID AIR DIFFUSION WITH WATER VAPOUR CONDENSATION IN POROUS MEDIA

Abstract—This paper is devoted to the experimental and numerical investigations of the non-isothermal moisture diffusion with condensation in homogeneous isotropic non deformable capillary porous bodies. From the comparisons between experimental and numerical results it was possible : to justify, at least in part, the use of the Philip de Vries mathematical model as a predictive tool ; to identify the reasons of failure of some simplified theoretical model in describing moisture diffusion with condensation and finally to analyze accurately the role and the relative importance of the different heat and mass transfer mechanisms involved in the diffusion–condensation process.