

# Perméabilité à la vapeur d'eau de matériaux de construction: calcul numérique

B. KARI, B. PERRIN, J. C. FOURES

Laboratoire de Thermique des Matériaux et des Bâtiments, INSA-UPS, Département de Génie Civil, Complexe Scientifique de Rangueil, 31077 Toulouse Cedex, France

*Nous avons mis en oeuvre dans ce travail un modèle de description macroscopique des transferts couplés dans des milieux poreux, basé essentiellement sur les travaux de Philip et De Vries. Nous l'avons appliqué au calcul de la perméabilité à la vapeur de divers matériaux du Génie Civil, en utilisant des valeurs des paramètres hygrothermiques soit déterminées dans notre laboratoire, soit issues de la littérature. Ces calculs nous ont permis de mieux définir les notions de perméabilités moyennes apparente et vraie ainsi que de la perméabilité à une pression de vapeur donnée et les relations entre elles. Nous avons pu mettre en évidence l'influence du niveau de pression de vapeur et des caractéristiques d'échanges superficiels sur ces perméabilités. Ces facteurs ont une influence importante pour des matériaux hygroscopiques tels que le mortier pour des pressions de vapeur élevées. L'ordre de grandeur des valeurs numériques est confirmé par celles, expérimentales, proposées par divers auteurs. Nous montrons enfin comment une mesure de perméabilité, couplée avec la détermination des isothermes de sorption permet d'obtenir le coefficient de transfert d'humidité dû à un gradient de teneur en eau, dans le domaine hygroscopique.*

## NOMENCLATURE

$D_w$	Coefficient de transfert d'humidité dû au gradient de teneur en eau ( $m^2 s^{-1}$ )
$D_T$	Coefficient de transfert d'humidité dû au gradient de température ( $m^2 s^{-1} K^{-1}$ )
$e$	Épaisseur du matériau (m)
$h_c$	Coefficient d'échange convectif ( $W m^{-2} K^{-1}$ )
$h_m$	Coefficient d'échange de masse ( $m s^{-1}$ )
$\dot{m}$	Débit masse ( $kg s^{-1} m^{-2}$ )
$P_{vi}$	Pression de vapeur dans le milieu $i$ (Pa)
$P_{vis}$	Pression de vapeur à la surface du matériau du côté du milieu $i$ (Pa)
$P_s(T)$	Pression de saturation de l'air à la température $T$ (Pa)
$T_i$	Température dans le milieu $i$ (K)
$w$	Teneur en eau pondérale ( $kg kg^{-1}$ )
$\pi$	Perméabilité ( $kg s^{-1} m^{-1} Pa^{-1}$ )
$\rho$	Masse volumique du matériau sec ( $kg m^{-3}$ )
$\varphi$	Humidité relative de l'air dans le milieu $i$ (%)

## 1. INTRODUCTION

Dans le domaine technique et notamment en Génie Civil lorsque l'on cherche à apprécier les risques de condensation dans les parois, on utilise la perméabilité à la vapeur des matériaux. Cette perméabilité fait l'objet d'une mesure normalisée. Or si l'analyse des risques de condensation dans ces matériaux est basée sur une approche physique simple qui ne met en jeu que les transferts en phase vapeur permettant de tracer du diagramme de Glaser, les phénomènes physiques survenant lors de la mesure sont

plus complexes. En effet, interviennent la condensation capillaire et peut-être, localement, des transferts à l'état liquide dans ce matériau, ainsi que les conditions d'échanges superficiels. L'objet de ce travail est de décrire le comportement de divers matériaux à l'aide d'un modèle numérique [1] basé sur la modélisation de Philip et De Vries [2] qui prend en compte l'ensemble des phénomènes physiques intervenant lors des transferts d'humidité dans les milieux poreux, de comparer ces résultats aux diverses expériences de perméabilité à la vapeur issues de la littérature. Ceci doit nous permettre de mieux analyser dans quelle mesure l'approche simplifiée [3] permet, au moins qualitativement, de prévoir les phénomènes de condensation dans les parois du bâtiment.

## 2. LA PERMEABILITE A LA VAPEUR

Lorsqu'un matériau poreux est placé entre deux ambiances à mêmes températures, mais à pressions de vapeur différentes, le milieu est traversé par un flux de masse. Si  $\dot{m}$  est sa valeur à l'équilibre, on définit la perméabilité du matériau pour une certaine pression de vapeur  $P_{v1}$  (Fig. 1) par la relation [2]

$$\pi_{P_{v1}} = \lim_{P_{v2} \rightarrow P_{v1}} \frac{\dot{m}e}{P_{v2} - P_{v1}} \quad (1)$$

Cette perméabilité est variable avec la pression de vapeur  $P_{v1}$ .

Pour obtenir pratiquement cette limite on utilise la technique suivante (Fig. 2). Une coupelle dont l'ambiance 1 est imposée par une solution saline saturée, fermée par le milieu poreux à étudier, est placée dans une ambiance 2 à

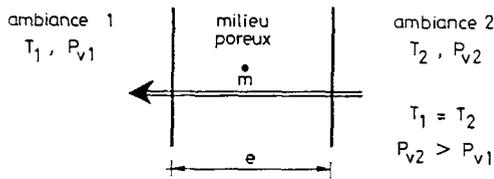


Fig. 1 Schéma des conditions d'environnement.

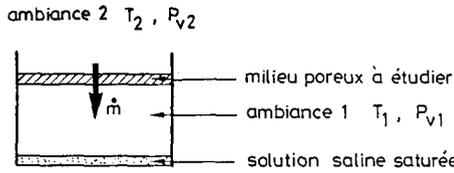


Fig. 2 Mesure de la perméabilité par la méthode de la coupelle.

température et pression de vapeur contrôlée. On observe alors l'évolution de la masse de l'ensemble de la coupelle. Lorsque celle-ci varie linéairement on peut alors calculer le flux de masse  $\dot{m}$  en régime permanent.

En procédant de la sorte pour différentes pressions de vapeur  $P_{v2}$  il est possible de tracer une courbe semblable à celle de la Fig. 3. La perméabilité du matériau à la pression  $P_{v1}$  est obtenue en calculant la pente de la tangente à la courbe à son point d'intersection avec l'axe des pressions de vapeur.

En réalité, on assimile souvent la pente de la tangente à la pente du segment BD ou BC ou CD voire AE. La perméabilité que l'on peut ainsi déterminer correspond à une valeur moyenne sur un certain intervalle de pression de vapeur. Elle se calcule par la relation

$$\pi_{P_{v2}-P_{v1}} = \frac{\dot{m}e}{P_{v2} - P_{v1}} \quad (2)$$

Cette simplification est plus ou moins valable selon le degré de comportement hygroscopique du matériau. Ainsi se limite-t-on souvent aux expériences dites de la coupelle sèche ou humide. Dans ce cas, la perméabilité du milieu est déterminée lorsque l'humidité relative à l'intérieur de la coupelle est voisine soit de 0% soit de 100%.

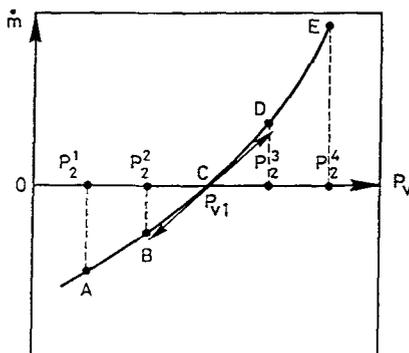


Fig. 3 Méthode de détermination de la perméabilité affectée à une valeur d'humidité relative.

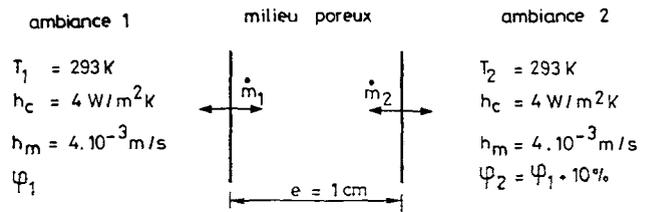


Fig. 4 Les conditions à la limite.

### 3. CALCUL NUMERIQUE DES FLUX DE MASSE A L'EQUILIBRE D'UN MORTIER ET D'UNE TERRE CUITE SOUMIS A DIVERS ECARTS DE PRESSION DE VAPEUR

Nous avons choisi deux matériaux ayant fait l'objet d'une détermination expérimentale complète des divers paramètres hygrothermiques [1]. Pour mener le calcul numérique nous avons choisi les conditions d'environnement résumées sur le schéma de la Fig. 4.

La température est prise uniforme et égale à 293 K. Les échanges hydriques entre un milieu et une ambiance sont conditionnés par les conditions d'échanges convectifs caractérisées par  $h_c$  et celles d'échanges de masse par  $h_m$ . Nous avons choisi d'appliquer la relation entre les coefficients  $h_m$  et  $h_c$  basée sur la classique hypothèse de Lewis:

$$h_c = \rho c_p h_m \quad (3)$$

où  $\rho$  est la masse volumique de l'air et  $c_p$  la chaleur massique de l'air humide. Nous avons donné au coefficient d'échange convectif une valeur moyenne de  $4 \text{ w m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ , ce qui conduit donc à utiliser le coefficient d'échange de masse suivant

$$h_m \simeq 4 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1} \quad (4)$$

Nous reviendrons ultérieurement sur l'influence de ces conditions d'environnement sur la perméabilité.

Nous avons fait le calcul avec des écarts d'humidité relative de 10%. L'état initial est un état sec. Nous n'avons donc pas pris en compte, dans ce travail, les effets d'hystérésis. Nous comparons plus loin la perméabilité moyenne ainsi calculée à la perméabilité à une pression de vapeur donnée (paragraphe 5).

Les Figs 5 à 8 montrent les évolutions des débits dans le temps aux deux faces des éprouvettes de mortier et de

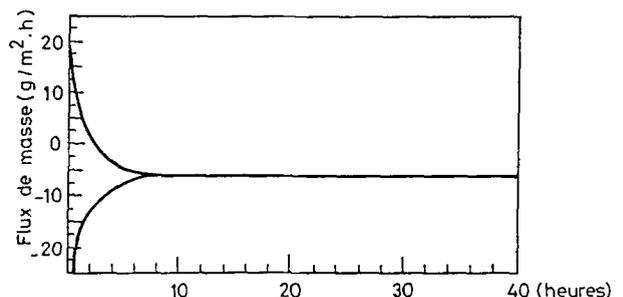


Fig. 5 Evolution dans le temps du débit masse de vapeur aux deux faces du matériau. Cas du mortier  $\phi_1 = 0\%$ ;  $\phi_2 = 10\%$ .

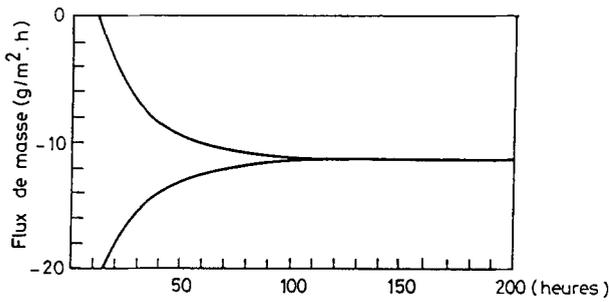


Fig. 6 Evolution dans le temps du débit masse de vapeur aux deux faces du matériau. Cas du mortier  $\varphi_1 = 90\%$ ;  $\varphi_2 = 100\%$ .

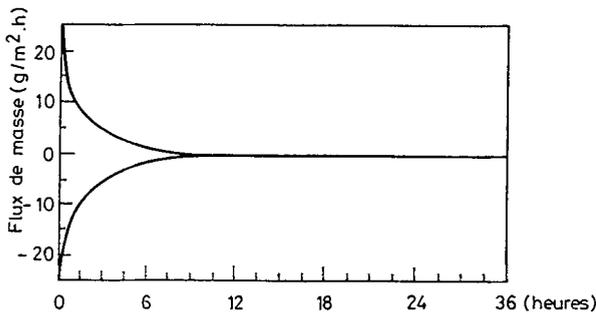


Fig. 7 Evolution dans le temps du débit masse de vapeur aux deux faces du matériau. Cas de la terre cuite  $\varphi_1 = 0\%$ ;  $\varphi_2 = 10\%$ .

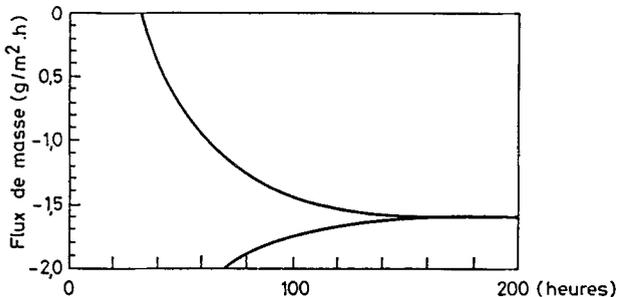


Fig. 8 Evolution dans le temps du débit masse de vapeur aux deux faces du matériau. Cas de la terre cuite  $\varphi_1 = 90\%$ ;  $\varphi_2 = 100\%$ .

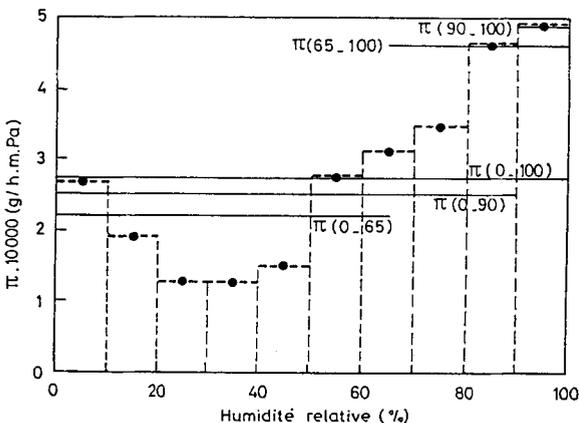


Fig. 9 Variation de la perméabilité avec l'humidité relative pour des intervalles de 10%. Cas du mortier.

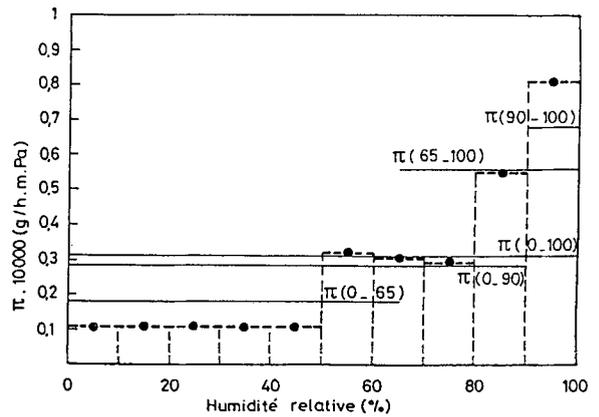


Fig. 10 Variation de la perméabilité avec l'humidité relative pour des intervalles de 10%. Cas de la terre cuite.

terre cuite dans les cas où  $\varphi_1 = 0$  ou  $90\%$  et  $\varphi_2 = 10$  ou  $100\%$ . La connaissance du débit masse à l'équilibre permet de calculer la perméabilité du matériau. L'ensemble de ces calculs numériques nous a ainsi permis de tracer l'évolution de la perméabilité apparente moyenne du mortier et de la terre cuite sur chaque intervalle  $\Delta\varphi = 10\%$  (Figs 9 et 10).

Nous avons aussi calculé les perméabilités moyennes sur les intervalles plus larges préconisés par le REEF [3] et jugés suffisants pour caractériser le comportement d'un matériau, du moins lorsque celui-ci ne présente pas de caractère hygroscopique trop marqué. Ces intervalles sont les suivants:

- [0, 65%]; [0, 90%]; [0, 100%]; [65, 100%]; [90, 100%]

Ces résultats nous conduisent aux constatations suivantes:

- (i) La perméabilité des deux matériaux varie de façon relativement importante avec l'humidité relative (facteurs voisins de 5 et 10 pour le mortier et la terre cuite respectivement).
- (ii) Si les perméabilités déterminées sur des intervalles plus larges d'humidité relative représentent bien la moyenne des perméabilités sur de petits intervalles de  $\varphi$ , on ne peut substituer l'une à l'autre sans commettre d'erreur quantitative sur le comportement des matériaux à l'équilibre.
- (iii) La perméabilité du mortier est nettement plus forte que celle de la terre cuite. Ceci est évidemment dû au caractère fortement hygroscopique du mortier par rapport à celui de la terre cuite.
- (iv) La perméabilité des matériaux augmente nettement avec le niveau de pression de vapeur, ceci est à rapprocher de l'allure des courbes de sorption mettant toujours en évidence une augmentation des phénomènes de condensation capillaire avec l'humidité relative.

#### 4. INFLUENCE DES CONDITIONS A LA LIMITE SUR LA PERMEABILITE

Lorsque l'on détermine expérimentalement la perméabilité d'un matériau, on englobe en fait dans la

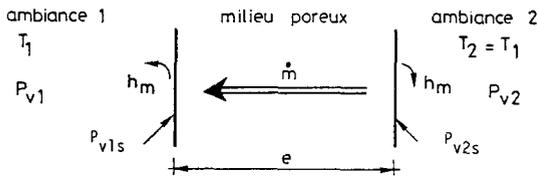


Fig. 11 Détail des conditions d'environnement.

résistance à la vapeur du milieu les résistances de surface liées aux conditions d'échanges superficielles (Fig. 11). Lorsque l'on écrit

$$\dot{m} = \pi_a(P_{v2} - P_{v1})/e \quad (5)$$

Le  $\pi$  ainsi calculé est un  $\pi$  apparent moyen entre  $P_{v2}$  et  $P_{v1}$  soit  $(P_{v2} + P_{v1})/2$ . La perméabilité vraie  $\pi_v$  du matériau est quant à elle définie par

$$\dot{m} = \pi_v \frac{P_{v2s} - P_{v1s}}{e} \quad (6)$$

En effet, de par l'existence du coefficient d'échange de masse, si faible soit-il, il existe un écart de pression de vapeur entre la surface du matériau et l'ambiance.

Nous avons alors, numériquement, recalculé les perméabilités apparentes des deux matériaux, pour différents coefficients d'échanges de masse. La perméabilité intrinsèque ou vraie du milieu s'obtient lorsque  $h_m$  tend vers l'infini. Les Figs 12 et 13 montrent les résultats des calculs. Elles mettent en évidence:

- (i) l'influence importante de  $h_m$  sur la perméabilité du mortier essentiellement aux fortes humidités relatives; et
- (ii) le peu d'influence dans le cas de la terre cuite.

Cette différence de comportement est due à la forte résistance à la diffusion de vapeur de la terre cuite, toujours liée à sa faible hygroscopicité, rendant donc relativement négligeables les résistances de surface. Ainsi donc, si pour les matériaux peu perméables ces conditions à la limite n'ont pratiquement pas d'influence, il n'en est pas de même pour ceux à plus forte perméabilité.

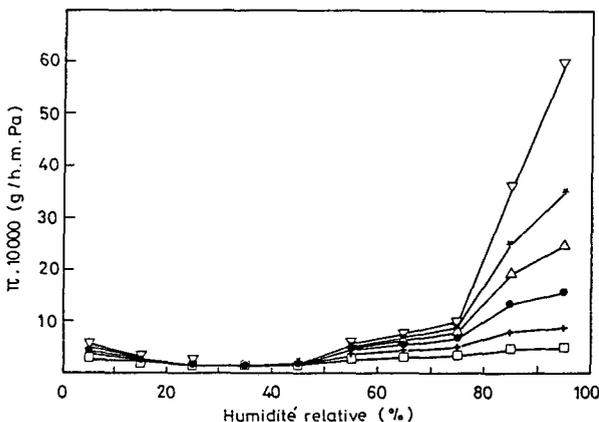


Fig. 12 Influence du coefficient d'échange de masse  $h_m$  sur la perméabilité à la vapeur. Cas du mortier.  $h_m$  ( $m s^{-1}$ ): (□) 0,004; (+) 0,008; (●) 0,016; (△) 0,032; (★) 0,064; (▽) infini.

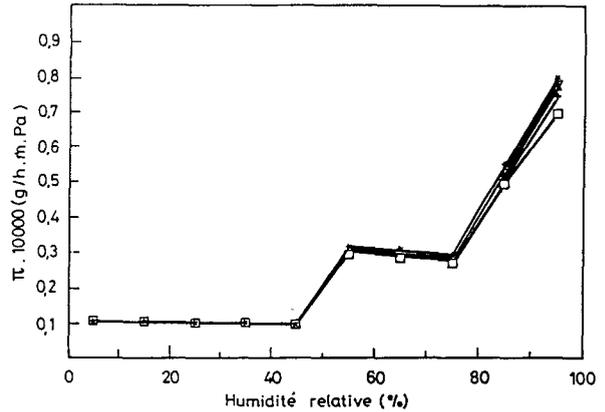


Fig. 13 Influence du coefficient d'échange de masse  $h_m$  sur la perméabilité à la vapeur. Cas de la terre cuite.  $h_m$  ( $m s^{-1}$ ): (□) 0,004; (+) 0,008; (●) 0,016; (△) 0,032; (★) 0,064; (▽) infini.

### 5. COMPARAISON ENTRE LA PERMEABILITE DEFINIE SUR UN INTERVALLE DE PRESSION DE VAPEUR ET CELLE DEFINIE A UNE PRESSION DONNEE

A partir des valeurs de  $\pi$  calculées sur des intervalles d'humidité relative, il est possible de tracer des courbes similaires à celle de la Fig. 3 (Figs 14 et 15). Le calcul de la

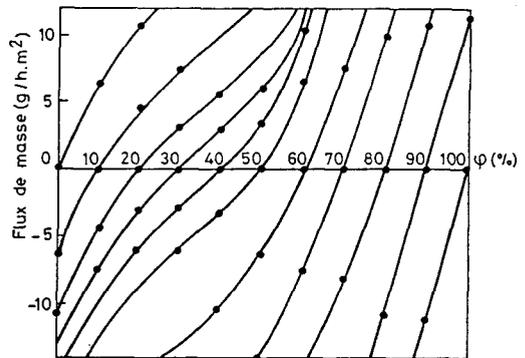


Fig. 14 Courbes permettant la détermination de la perméabilité pour une valeur donnée d'humidité relative. Cas du mortier.

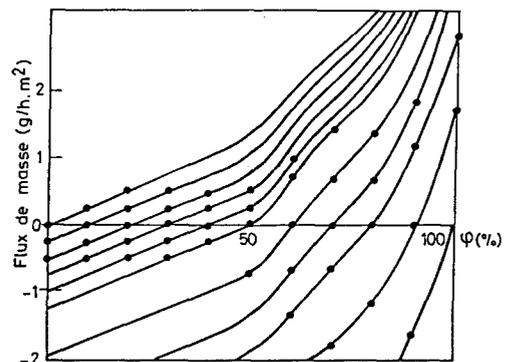


Fig. 15 Courbes permettant la détermination de la perméabilité pour une valeur donnée d'humidité relative. Cas de la terre cuite.

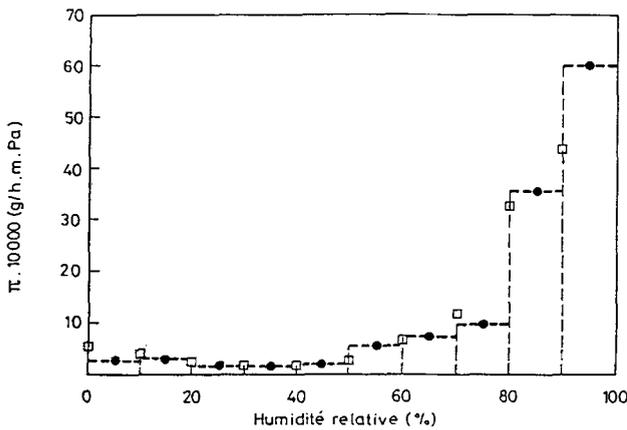


Fig. 16 Comparaison entre les valeurs de perméabilité obtenues (●) par le calcul sur des intervalles d'humidité relative de 10% ( $\pi_{cal}$ ) et (□) à partir des courbes de la Fig. 13 ( $\pi_{CSTB}$ ). Cas du mortier.

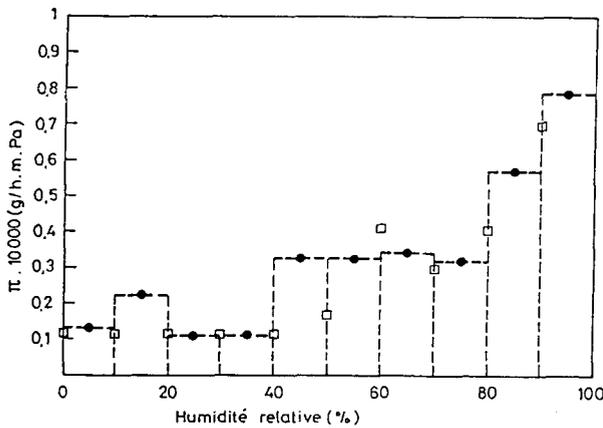


Fig. 17 Comparaison entre les valeurs de perméabilité obtenues (●) par le calcul sur des intervalles d'humidité relative de 10% ( $\pi_{cal}$ ) et (□) à partir des courbes de la Fig. 14 ( $\pi_{CSTB}$ ). Cas de la terre cuite.

tangente à chaque courbe à son point d'intersection avec l'axe des abscisses permet de déterminer la perméabilité pour l'humidité relative correspondant au point concerné.

Les résultats sont reportés sur les Figs 16 et 17. Le faible écart observé met en évidence que, pour les matériaux concernés, la perméabilité à une humidité relative  $\varphi$ , telle qu'elle est définie dans la Relation 1, peut largement être remplacée par la perméabilité moyenne sur un intervalle d'humidité relative 1-10% autour de  $\varphi$ .

### 6 COMPARAISON ET UTILISATION DE DONNEES DE LA LITTERATURE

Nous avons rassemblé un certain nombre de données numériques de la littérature afin d'en faire une comparaison et une analyse. Celles-ci sont rassemblées dans le Tableau 1. Ce tableau appelle plusieurs remarques:

- (i) On ne trouve en général pour un matériau donné qu'une valeur dont on ne connaît pas les conditions de détermination: forte ou faible humidité relative.
- (ii) Pas de renseignements sur la nature exacte du matériau, notamment densité, porosité.
- (iii) Si les données des différents auteurs ne sont pas très différentes, les valeurs peuvent varier dans un rapport de 1 à 10.
- (iv) Les perméabilités apparentes mortier, terre cuite résultant d'un calcul mené à partir d'un certain nombre de paramètres hygrothermiques sont sensiblement du même ordre de grandeur que celles de la littérature.

Nous avons alors repris le même type de calcul que celui déjà mené pour le mortier et la terre cuite, mais pour trois autres matériaux, en utilisant les mêmes types de paramètres hygrothermiques mais cette fois non plus déterminés par nous-même, mais pris dans la littérature [9]. Nous avons choisi le plâtre, la laine de verre, le polystyrène expansé.

Tableau 1 Données numériques de la littérature

Matériaux	Perméabilité, $\pi$ ( $10^5 \text{ g h}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ )					
	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]
Mortier (type enduit)	0,4					1,4
Terre cuite						
Brique pleine	6,8	5,8-13,7	6-17	0,45-2,75	2,4-14	
brique creuse (parois)	1,1		2,7-7,6			
Plâtre	8	7-11,4	7-12	1,1	6	
Laine minérale	46-61	33		57	72	
Polystyrène						
Moulé en bloc	2,3-3	1-3,8	0,85-3,4	0,11-0,7	0,6-3,6	
Moulé en continu	1,1-1,8	2,3-4,9				
Thermo-comprimé	0,6-1,1	1,3-2,2				
Extrudé	0,35-0,7		0,23-0,35		0,3	
Expansé					0,6-3,6	

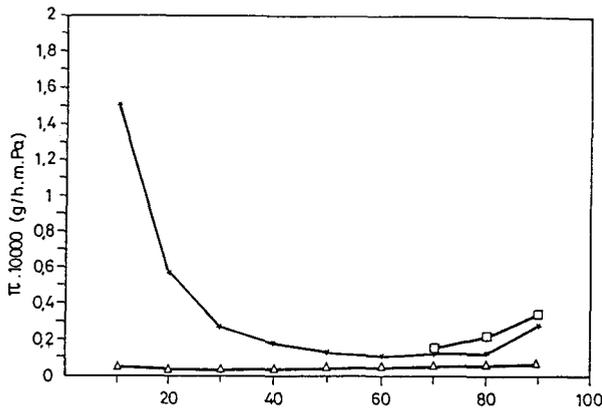


Fig. 18 Evolution de la perméabilité à la vapeur en fonction de l'humidité relative pour divers matériaux: (□) plâtre, (★) laine de verre, (△) polystyrène.

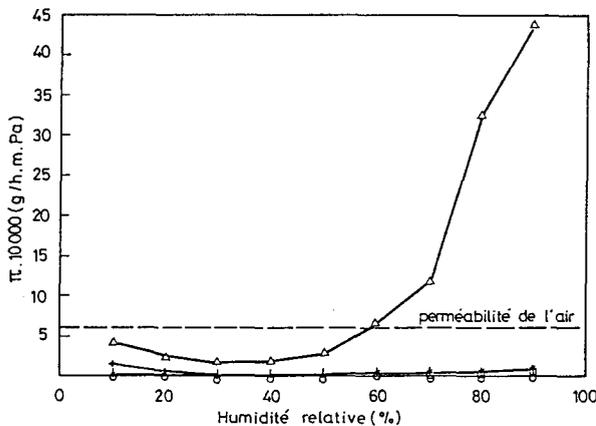


Fig. 19 Mise en évidence de l'importance du caractère hygroscopique du mortier vis à vis de la perméabilité: (□) plâtre, (+) laine de verre, (○) polystyrène, (△) mortier, (★) terre cuite.

On présente les résultats de ces calculs dans la Fig. 18. La Fig. 19, en faisant apparaître les perméabilités vraies des cinq matériaux étudiés, met en évidence que la perméabilité du mortier, matériau le plus hygroscopique de ceux considérés est, pour les fortes humidités relatives, nettement plus importante que les autres et supérieure à celles de la littérature.

## 7. RELATION PERMEABILITE COEFFICIENT DE DIFFUSION

Dans notre calcul numérique, l'équation de transfert d'humidité s'exprime de la façon suivante [1]:

$$\dot{m} = \rho_0 \left( D_w \frac{\partial w}{\partial x} + D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (7)$$

Compte tenu des conditions quasi-isothermes, les effets d'évapocondensation étant négligeables pour les conditions d'environnement choisies, cette équation se réduit à

$$\dot{m} \simeq \rho_0 D_w \frac{\partial w}{\partial x} \quad (8)$$

Or, la teneur en eau massique  $w$  est fonction de l'humidité relative, la relation est donnée expérimentalement par les isothermes de sorption-désorption. On a donc

$$w = f(\varphi) \quad (9)$$

La Relation 7 peut alors se mettre sous la forme

$$\dot{m} \simeq \rho_0 D_w \left( \frac{\partial w}{\partial \varphi} \right) \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \quad (10)$$

Pour des matériaux de faible épaisseur, soumis à de faibles écarts de pression de vapeur, le gradient d'humidité relative peut être considéré comme linéaire et la Relation 10 réécrite sous la forme

$$\dot{m} \simeq \rho_0 D_w \left( \frac{\partial w}{\partial \varphi} \right) \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{e} \quad (11)$$

La perméabilité moyenne définie sur un écart de pression de vapeur conformément à la Relation 5 permet donc d'écrire

$$\begin{aligned} \pi \left( \frac{P_{v2} - P_{v1}}{e} \right) &= \rho_0 D_w \left( \frac{\partial w}{\partial \varphi} \right) \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{e} \\ &= \rho_0 D_w \left( \frac{\partial w}{\partial \varphi} \right) \frac{P_{v2} - P_{v1}}{P_{vs(T)} e} \end{aligned} \quad (12)$$

d'où la relation

$$\pi_{P_{v2} - P_{v1}} = \rho_0 \frac{D_w}{P_{vs(T)}} \left( \frac{\partial w}{\partial \varphi} \right) \quad (13)$$

Dans cette relation, le terme  $\partial w / \partial \varphi$  représente la pente de la tangente aux isothermes sorption-désorption.

Cette dernière relation nous montre d'une part que la perméabilité à la vapeur  $\pi$  doit présenter des phénomènes d'hystérésis, d'autre part qu'elle peut servir de base pour la détermination dans le domaine hygroscopique du coefficient de diffusion.

## 8. CONCLUSIONS

L'objet de ce travail était de réexaminer la notion de perméabilité à la vapeur dans le cadre d'une modélisation physique des phénomènes de transferts d'humidité en milieu poreux prenant en compte les niveaux de pression de vapeur et les conditions à la limite.

Il ressort de cette étude que les données bibliographiques résultant d'essais expérimentaux sont souvent trop fragmentaires et imprécises et que leur utilisation peut, dans certains cas, notamment pour les matériaux à comportement hygroscopique marqué, conduire à des incertitudes dans l'évaluation de risques de condensation dans les parois.

Nous nous proposons de systématiser l'utilisation du calcul numérique afin de décrire le comportement de parois complexes relativement aux transferts d'humidité.

## REFERENCES

1. Perrin, B., 'Etude des transferts couplés de chaleur et de masse dans des matériaux poreux consolidés, non saturés

- utilisées en Génie Civil', thèse d'Etat, Université Paul Sabatier, Toulouse (1985).
2. Philip, J. R. et De Vries, D. A., 'Moisture movements in porous materials under temperature gradients', *Trans. Amer. Geoph. Union* 38(2) (1957) 222-232.
  3. Berthier, 'Diffusion de vapeur au travers des parois. Condensation', REEF Vol. II, Sciences du Bâtiment, CSTB.
  4. Speidel, K., 'Diffusion et condensation de vapeur d'eau dans le bâtiment' (Pye Edition, 1983) France.
  5. Wulgaris, S., 'Importance de l'humidité dans la protection des façades', CDE/LARO Section Technique d'Application. (Peintures et Vernis BASF AG, D 6700 Ludwigshafen, 1966).
  6. Marsh, P., 'Thermal Insulation and Condensation' (Construction Press, Lancaster, 1969).
  7. British Standard 5250: 1975, 'Basic data for the design of buildings: the control of condensation in dwellings'.
  8. Quenard, D. and Sallee, H., 'The transport of condensable water vapor through microporous building materials', 6th International Drying Symposium IDS '88, Versailles, Septembre 1988.
  9. Fauconnier, R., 'Etude des transferts simultanés de chaleur et d'humidité dans les parois multicouches', séminaire: Application à la modélisation du comportement hygrothermique des locaux en régime varié, Fédération Nationale du Bâtiment, Direction de la Recherche FNB/DR, Saint Rémy les Chevreuse, France, 1982.

## SUMMARY

### Vapour permeability of building materials: numerical computation

*In this research we have used a macroscopic description model of coupled heat and moisture transfers in non-saturated porous media, based essentially on the work of Philip and de Vries. We have applied this to the calculation of vapour permeability of various civil engineering materials, using hygrothermal parameter values either determined in our laboratory or drawn from the literature.*

*This method has offered the possibility of a closer definition of the concepts of apparent and true mean*

*permeabilities, also the permeability under a given vapour pressure and the relationship between these. We have thereby identified the influence of the level of vapour pressure and the characteristics of surface exchanges on these permeability values. These factors have an important influence for hygroscopic materials such as mortar under high vapour pressure. The order of magnitude of numerical values is confirmed by the experimental work reported by various authors.*

*Finally, we demonstrate how the measurement of permeability, coupled with the determination of the sorption isotherm, contributes to obtaining the moisture transfer coefficient due to a water content gradient in the hygroscopic field.*