

LE COMPORTEMENT A LA DIFFUSION DES VAPEURS DES MURS EXTERIEURS DES MONUMENTS DE VENISE

1. L'IMPORTANCE DU REGIME HYDROTHERMIQUE DES ELEMENTS DE CONSTRUCTION

L'humidité des éléments de construction a comme origine : l'humidité introduite lors de la mise en œuvre de l'édifice, surtout les éléments réalisés par des procédés technologiques humides, par exemple les constructions en briques, en terre cuite ou en blocs de pierre; l'humidité du sol qui pénètre par ascension capillaire en cas d'exécution défectueuse ou de dégradation de l'hydroisolation souterraine de la fondation; l'humidité de l'ambiance environnante, humidité d'exploitation de l'air intérieur, humidité de l'air extérieur et l'eau de pluie. Quelques années après l'exécution d'un édifice, un certain état d'humidité s'installe dans les éléments de construction de celui-ci : c'est « l'humidité d'équilibre ».

Le degré d'humidité des éléments de la construction varie dans certaines limites autour de la valeur d'équilibre sous l'action de la thermodiffusion provoquée par la différence de température et du degré hygrométrique entre l'air intérieur et l'air extérieur, parallèlement avec les autres sollicitations d'humectation.

Les facteurs qui influencent ce degré d'humidité sont les suivants :

- le régime de température et d'humidité relative de l'air intérieur et de l'air extérieur d'une construction;
- la structure des murs extérieurs;
- les propriétés hygrothermiques (conductivité thermique, perméabilité aux vapeurs, hygroscopicité, absorption de l'eau, ascension capillaire).

L'humidité des murs extérieurs décroît de la valeur maximale établie lors de l'exécution, jusqu'à la valeur d'équilibre réalisée avec le temps par l'élimination d'une partie de l'humidité initiale.

Cette humidité d'équilibre mentionnée dans la littérature spécialisée dépend du régime d'exploitation des constructions et du type des matériaux qui les constituent. En cas d'assemblage mal calculé et mal exécuté des murs extérieurs ou d'une exploitation impropre de la construction en cause du point de vue de l'humidité, la teneur

en eau croît avec le temps à cause de la condensation des vapeurs sur la face intérieure ou bien dans l'épaisseur même du mur.

L'humectation progressive par l'accumulation de l'eau provenant de la condensation des vapeurs, conduit à l'affaiblissement de l'isolation thermique des murs extérieurs, qui amplifie à son tour l'humectation et qui a des conséquences défavorables pour le confort intérieur et la durabilité des murs, à cause du phénomène du gel-dégel et de la réduction des résistances mécaniques des matériaux.

2. LES BASES PHYSIQUES DE LA DIFFUSION DES VAPEURS A TRAVERS LES MURS EXTERIEURS

Afin de comprendre l'installation d'un régime hygrothermique optimum dans les éléments extérieurs des constructions, il est nécessaire de connaître le développement du phénomène de diffusion des vapeurs à travers ces éléments.

L'air contient toujours une certaine quantité de vapeur d'eau qui à la température donnée, définit son humidité effective. Cette quantité de vapeur peut augmenter jusqu'à une valeur maximum qui, à cette température, définit l'humidité de saturation.

Le rapport entre l'humidité effective et l'humidité de saturation représente le degré hygrométrique de l'air, soit φ . Si l'humidité effective dépasse l'humidité de saturation, le surplus des vapeurs se condense.

L'humidité de l'air peut être exprimée par la quantité de vapeurs d'eau, en g/m^3 , soit par la pression des vapeurs existant dans l'air, en mmHg.

La pression de saturation $p_s(E)$ est d'autant plus grande que la température de l'air t est plus élevée (fig. 1).

Pendant l'hiver, dans un mur extérieur, la pression de saturation p_s des vapeurs diminue de l'air intérieur à l'air extérieur, en fonction de la température ϑ dans l'épaisseur du mur.

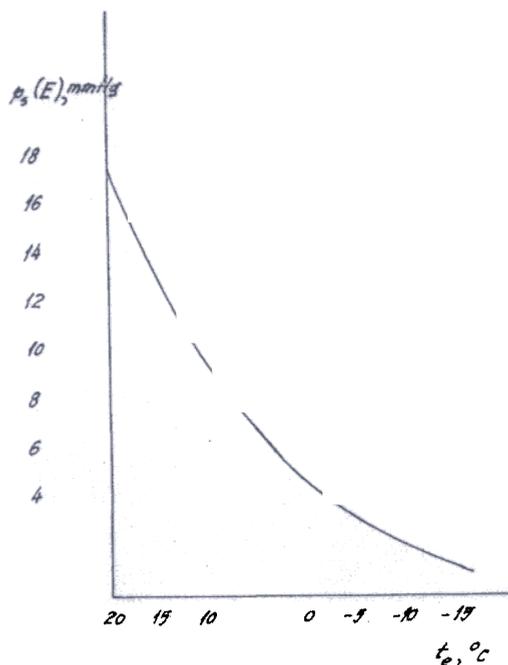
La pression effective des vapeurs de l'air intérieur $p_i = E_i \varphi_i$ est plus petite que la pression de saturation E_i , mais beaucoup plus grande que la pression réelle des vapeurs de l'air extérieur $p_e = E_e \varphi_e$.

En hiver, grâce à la différence entre la pression des vapeurs de l'air intérieur et celle des vapeurs de l'air extérieur $\Delta p = p_i - p_e$, se produit la diffusion des vapeurs d'eau de l'intérieur vers l'extérieur, la pression des vapeurs p diminuant de la valeur p_i à mesure que ces vapeurs traversent les couches constituantes qui opposent de la résistance à la diffusion des vapeurs R_v jusqu'à évaluer la pression des vapeurs de l'air extérieur p_e .

Les caractéristiques hygrothermiques principales (résistance thermique, résistance à la diffusion des vapeurs) des matériaux des couches constituantes, ainsi que la position de ces couches dans la structure des murs extérieurs jouent un rôle important quant à leur régime d'humidité.

Ainsi, les couches d'isolation thermique à grande résistance thermique présentent de grandes chutes de température $\Delta \theta$ et en conséquence de grandes chutes de pression de saturation p_s , surtout lorsqu'elles se trouvent vers la partie chaude des murs. La résistance à la diffusion des vapeurs est petite et par conséquent, la chute de la pression effective des vapeurs p est, elle aussi, petite, la ligne p ayant tendance de s'approcher de la courbe p_s . C'est pourquoi l'emplacement de ces couches vers la partie intérieure des murs n'est pas favorable.

Fig. 1. — Diagramme de la pression de saturation par rapport température de l'air.

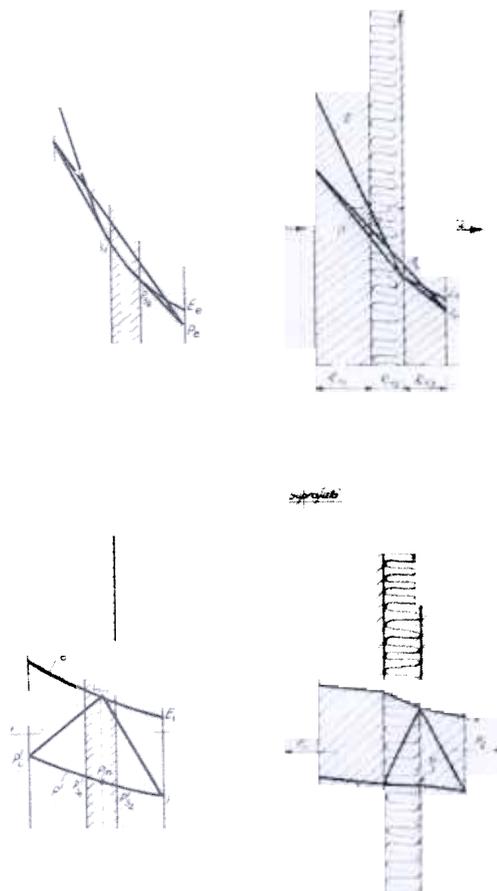


En échange, les barrières à l'encontre des vapeurs ont une petite résistance à la diffusion des vapeurs. Comme suite, la chute de la température dans l'épaisseur des murs est petite, la chute de la pression de saturation p_s est petite aussi, mais celle de la pression réelle p des vapeurs est très grande en revanche.

Donc l'emplacement des barrières contre les vapeurs, même à la partie intérieure, produit l'éloignement de la ligne p de la courbe p_s et contribue à éviter une possibilité de condensation dans l'épaisseur des murs. Si, dans un élément de construction, la pression p des vapeurs dépasse la pression de saturation p_s sur certaines portions, surgit la possibilité de l'apparition de la condensation; en cas contraire, il n'y a pas de condensation des vapeurs à l'intérieur du mur.

Si la ligne des pressions effectives p est tangente à la

Fig. 2 et 3. — Diagrammes des zones et des surfaces de condensation suivant les courbes de pression effective des vapeurs d'eau.



courbe des pressions de saturation p_s , il existe une possibilité de condensation par la surface qui passe par le point de tangente qui marque « la surface de condensation » (fig. 2 a). Si la ligne p intercepte la courbe p_s une « zone de condensation » est limitée par les deux points de tangence qui partent des points p_i et p_e jusqu'à la courbe p_s (E) (fig. 2 b).

Dans les autres cas, la quantité de vapeurs accumulée par condensation durant l'hiver ΔW doit être plus petite que la quantité maximum admise ΔW_{adm} afin de ne pas diminuer la durabilité et l'isolation thermique des éléments de construction, et qui en tout cas doit être éliminée pendant l'été.

L'eau accumulée par condensation en hiver ainsi que l'eau de pluie sont éliminées en été, tant vers l'air extérieur que l'air intérieur, l'humidité des murs extérieurs ayant tendance à atteindre la valeur d'équilibre dans les conditions de climat (degré hygrométrique et température) du milieu environnant spécifique pour l'année respective (fig. 3 a, b).

3. QUELQUES DONNÉES SUR LE CLIMAT ET INSTRUCTIONS POUR LE CALCUL THERMOTECHNIQUE EN ITALIE

En ce qui concerne le climat, Venise se trouve dans la deuxième zone climatique de l'Italie, séparée de la première par l'isotherme des températures de janvier de 4° C.

Dans la figure 4, à part cet isotherme, on indique aussi les valeurs des degrés-jours.

Fig. 4. Carte des isothermes pour l'Italie.



Les vents puissants des zones de la côte contribuent aussi à la diversification climatique de ces zones.

Les conditions climatiques de Venise sont donc les suivantes :

- la température moyenne de l'air extérieur en janvier est de + 2° et en juin de + 22° C;
- le degré hygrométrique de l'air extérieur est extrêmement élevé ($\varphi e > 80 \%$).

De la documentation existante il ne résulte pas que l'Italie aurait mis en vigueur des instructions spéciales quant à l'isolation thermique des constructions.

Dans « Ingegneri, Architetti, Roma » de 1957, le Dr. Ing. G. Massari, dans le projet de « Norme per la protezione termica edilizia » recommande pour les murs extérieurs une résistance globale à la transmission thermique nécessaire de $R_o = 0,8 \text{ m}^2 \text{ hg}^\circ\text{C}/\text{Kcal}$ dans la première zone tempérée et de $R_o = 1,0 \text{ m}^2 \text{ hg}^\circ\text{C}/\text{Kcal}$ dans la dernière zone froide. Dans ces conditions, si l'on considère une différence maximum admise de température entre l'air intérieur et la surface intérieure des murs de 4° C, on arrive à une température extérieure de calcul de - 8° C (1) dans la zone froide de l'Italie, où Venise se trouve.

4. COMPORTEMENT DES MURS EXTERIEURS A LA DIFFUSION DES VAPEURS

Les édifices de Venise sont construits en général avec des murs extérieurs en briques de terre cuite, recouverts d'enduit sur les deux surfaces avec du mortier de chaux (fig. 5 a), ou en maçonnerie mixte de brique et pierre calcaire recouverte à l'intérieur de mortier de chaux (fig. 5 b).

La vérification des possibilités d'accumulation en hiver de l'humidité par condensation intérieure dans ces murs extérieurs est montrée dans le schéma de la fig. 6 a, b, c pour la maçonnerie mixte dans les conditions suivantes de climat extérieur et intérieur :

Fig. 5 a et b. — Compositions de la maçonnerie des murs à Venise.



(1) C'est la température envisagée pour le calcul des éléments de construction et l'installation de chauffage. Elle est plus basse que la température moyenne de janvier.

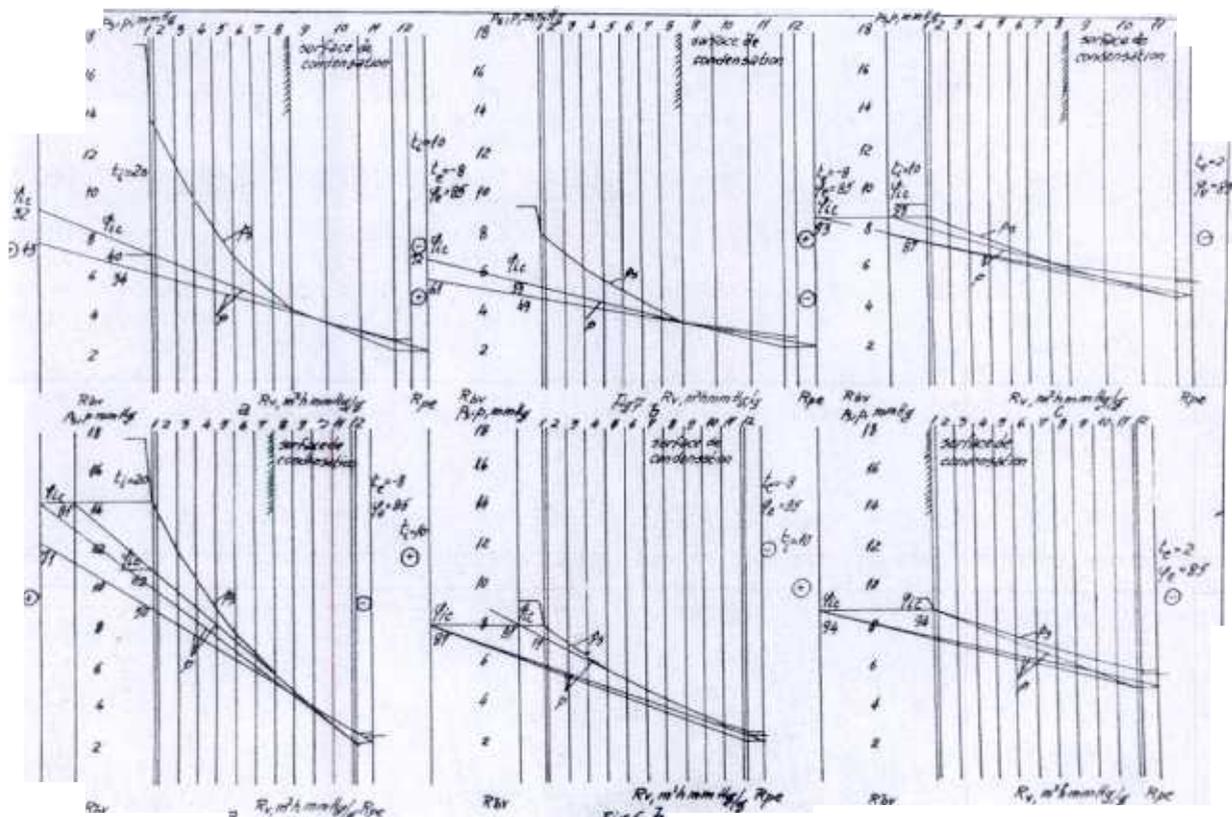


Fig. 6 phénomènes de condensation intérieure, dans les murs des deux types de la fig.

TABLEAU 1

Température	Valeur φ_{ic} pour traitement superficiel	
	extérieur	intérieur
	80	85
		95

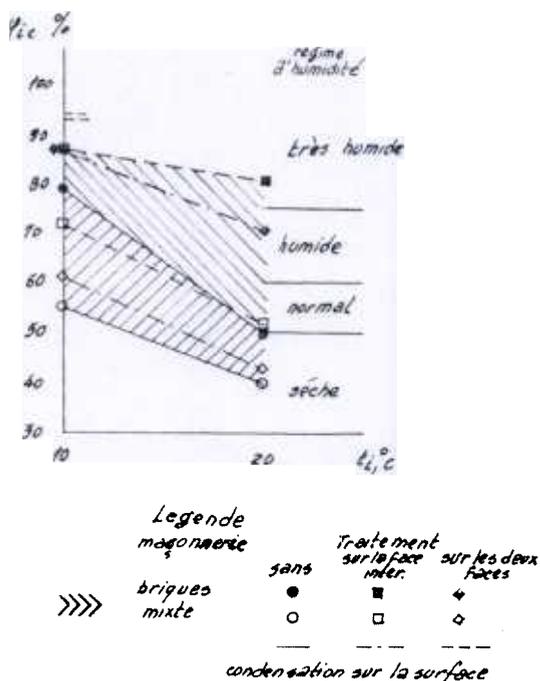
- température de l'air intérieur $t_i = + 20^\circ \text{C}$ (édifices chauffés), température extérieure de calcul $t_e = - 8^\circ \text{C}$ (température minimum) et degré hygrométrique de l'air extérieur $\varphi_e = 85 \%$ (fig. 6 a et 7 a);
- température de l'air intérieur $t_i = + 10^\circ \text{C}$ (édifices non chauffés), température extérieure de calcul $t_e = - 8^\circ \text{C}$ (température minimum) et le degré hygrométrique de l'air extérieur $\varphi_e = 85 \%$ (fig. 6 b et 7 b);
- température de l'air intérieur $t_i = + 10^\circ \text{C}$ (édifices non chauffés), température de l'air extérieur $t_e = + 2^\circ \text{C}$ (température moyenne en janvier) et degré hygrométrique de l'air extérieur $\varphi_e = 85 \%$ (fig. 6 c et 7 c).

Pour mettre en évidence l'influence du traitement de la surface interne et externe des murs extérieurs, on a considéré les murs extérieurs dans les conditions suivantes de finition :

- non recouverts de pellicules protectrices;
- avec la surface intérieure pourvue d'une barrière contre les vapeurs, avec résistance à la diffusion des vapeurs pour éviter leur condensation à l'intérieur des murs;
- traités aussi sur la surface extérieure avec une pellicule imperméable à l'eau et très perméable aux vapeurs.

Le degré hygrométrique φ_{ic} de l'air à l'intérieur des édifices dans lesquels peut apparaître le phénomène de condensation des vapeurs à l'intérieur des murs extérieurs, établi sur base d'un calcul hygrothermique, est indiqué par la figure 8.

Fig. 8. — Valeurs hygrométriques de l'air intérieur des édifices.



Les valeurs arrondies sont données dans le tableau synoptique n° 1 où elles sont comparées pour la maçonnerie en briques et pour la maçonnerie mixte.

Les valeurs du tableau n° 1 confirment que les facteurs influençant l'apparition de la condensation des vapeurs à l'intérieur des murs, sont :

- le système constructif des murs;
- le régime de température et d'humidité de l'air intérieur des bâtiments.

Ainsi la maçonnerie homogène en briques de terre cuite a un comportement meilleur que la maçonnerie mixte; dans ces murs sans traitement superficiel à l'aide de pellicules protectrices, la condensation est évitée autant dans les constructions chauffées avec un régime normal d'humidité, que dans les constructions non chauffées avec un régime normal d'humidité, que dans les constructions non chauffées avec un degré hygrométrique de l'air intérieur de 80 % à des températures extérieures de calcul de $- 8^\circ \text{C}$; la maçonnerie mixte n'évite la condensation à l'intérieur qu'à des degrés hygrométriques intérieurs au-dessous de 50 %, climat qui ne peut être réalisé qu'avec une installation de climatisation.

En cas d'application de barrières contre les vapeurs sur la face interne des murs, le comportement des maçonneries s'améliore sensiblement, le phénomène de condensation dans les murs en briques étant évité à des degrés hygrométriques inférieurs de 80-85 % et dans les maçonneries mixtes à des valeurs de 50-75 %; l'application d'une pellicule protectrice sur la face externe réduit ces valeurs respectivement à 70-85 % et à 45-60 %. Les limites minimum des degrés hygrométriques correspondent à la température extérieure de calcul et les limites maximum à la température moyenne du mois de janvier à la température moyenne de janvier de $+ 2^\circ \text{C}$. Les deux maçonneries des constructions non chauffées ont un bon comportement à la diffusion des vapeurs, la condensation des vapeurs n'apparaissent pratiquement pas dans leur profondeur (le degré hygrométrique de condensation est de 95 % et la condensation superficielle).

La teneur d'eau provenant de la condensation des vapeurs à l'intérieur des murs en hiver est assez petite ($0,1 - 0,2 \text{ g/m}^2/\text{h}$) et est éliminée par évaporation de la surface intérieure et aussi de la surface extérieure en été (fig. 9), l'humidité évaporée étant plus grande que celle accumulée par condensation. De cette manière, une grande partie de l'humidité introduite dans les maçonneries par l'ascension capillaire, par l'eau de pluie ou par une exploitation humide des édifices, est éliminée dans le milieu environnant.

Evidemment, dans les maçonneries pourvues de barrières contre les vapeurs sur la face interne, la quantité d'humidité évaporée est plus réduite que celle des murs sans barrières.

Les barrières contre les vapeurs peuvent être réalisées avec des vernis transparents à base de copolymères chlorures acétate de vinyle, de polyuréthane polyacrilates d'éthil et buthil, silicones, etc., appliqués en nombre de couches suffisant afin de préserver les murs contre la condensation.

Les pellicules extérieures de protection, imperméables à l'eau et perméables aux vapeurs, peuvent être exécutés aussi en vernis à base de dispersions de polyacétate de vinyle, de copolymères acétate de vinyle, de polyacrilates ou de méthyle siliconate de potasse.

CONCLUSIONS

1. Les murs extérieurs des constructions en maçonnerie de briques de terre cuite de grande épaisseur ont un bon comportement du point de vue de l'accumulation de l'humidité par la condensation des vapeurs dans les conditions du climat et de l'exploitation des édifices monumentaux de Venise.

Les murs en maçonnerie mixte de blocs de pierre permettent l'accumulation de l'humidité en hiver quand la température baisse sous la valeur moyenne du mois de janvier.

Ces murs ne deviennent pas humides progressivement avec le temps; le bilan annuel montre que l'humidité évaporée est plus grande que celle accumulée par condensation, permettant l'évaporation de l'eau en été et d'une grande partie de l'humidité du sol et de celle

provenant de l'eau de pluie, qui avaient déjà envahi les constructions.

2. Les mesures constructives pour l'amélioration du comportement des murs, surtout de ceux en maçonnerie mixte, en ce qui concerne l'accumulation de l'humidité provenant de la condensation, sont celles-ci :

- l'application de pellicules de protection sur les surfaces des maçonneries, surtout comme une barrière contre les vapeurs sur la face interne, ces couches minces ralentissant le rythme de séchage en été; il est nécessaire de les appliquer après le desséchage des murs à l'aide de méthodes spéciales;

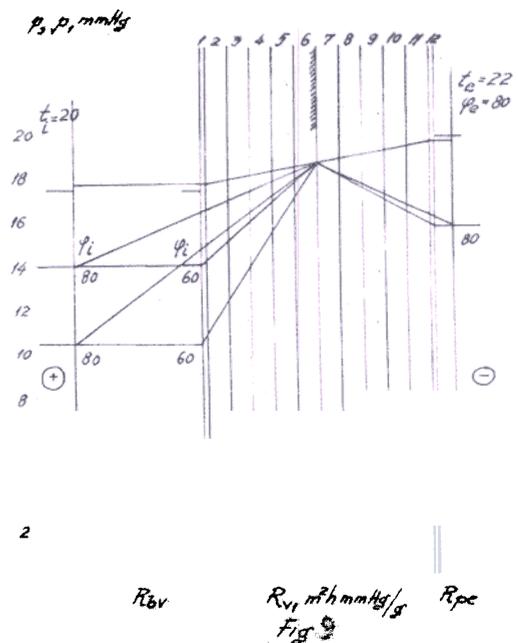
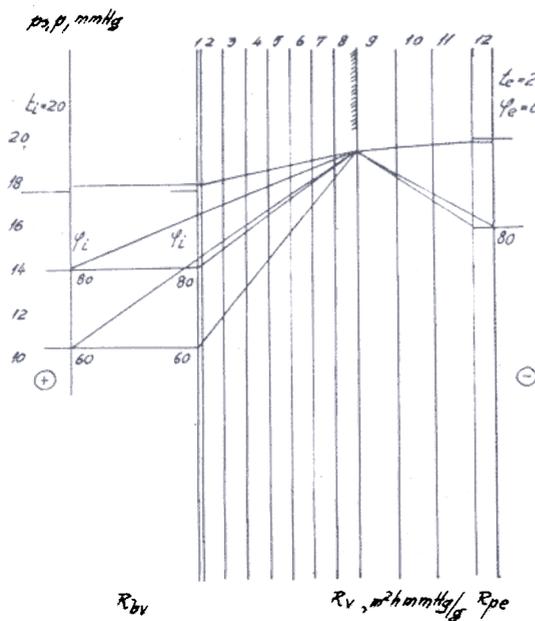
- l'introduction d'installations de climatisation pour maintenir une atmosphère intérieure sèche en permanence.

Les mesures indiquées ne sont pas absolues mais elles améliorent seulement l'état d'humidité des maçonneries envahies par l'eau du sol.

3. La réalisation d'un comportement permanent satisfaisant requiert la disparition préalable de l'humidité provenant du sol par une méthode efficace du point de vue technique et économique, par exemple la méthode de l'électrodrainage actif et d'hydro-isolation par imperméabilisation électrique, suivies de mesures constructives relatives au traitement superficiel des maçonneries et à la climatisation des édifices.

Ing. E. DIMITRIU-VILCEA
(Bucarest)

Fig. 9. Phénomène d'évaporation des vapeurs de condensation.



The author reviews the causes of moisture and the factors affecting the degree of humidity in the outer portions of buildings and shows the detrimental effects of the accumulation of water resulting from vapour condensation on internal comfort and durability.

From a study of vapour diffusion and heat transfer it is possible to determine the optimum structure of structural members and thus avoid vapour condensation inside them.

Fig. 1. — Diagram of saturation pressure in relation to the air temperature.

Fig. 2 and 3. — Diagrams of condensation zones and surfaces according to the active pressure curves of the water-vapours.

Fig. 4. — Isotherm chart for Italy.

Application of the principles derived from a study of hygrothermic phenomena under the climatic and technical conditions obtaining in the case of the monuments of Venice leads to a series of extremely important conclusions regarding the behaviour of these in divers situations and constructive measures for improving the moisture content of their walls and other external features.

Fig. 5 a and b. — Arrangements of maconry at Venice.

Fig. 6 and 7. — The phenomena of interior condensation within the two types of wall illustrated in fig. 5.

Fig. 8. — Hygrometrical values of the air within the buildings.

Fig. 9. — Phenomenon of evaporation of condensation vapours.

Fig. 1. — Cluny III and its Compeers, the greatest Early Christian, Byzantine, Gothic, and Renaissance Churches. Sketch plans. Cluny I and Cluny I added for comparison. K.J.C.

