

METHODES D'ELIMINATION DE L'HUMIDITE DE CONDENSATION

PRELIMINAIRES.

Je crois qu'il serait logique, tout d'abord, de nous poser cette question : "la condensation a toujours existée; pourquoi à présent produit-elle des dégâts aussi considérables aux chefs-d'oeuvre?"

La condensation de la vapeur d'eau s'opère autour des corps condensants et, si cette vapeur se trouve dans l'air libre, les éléments condensants sont fournis par des poussières atmosphériques. Autrefois ces poussières microscopiques ne renfermaient pas de substances chimiques nuisibles; aujourd'hui, au contraire, elles sont formées par de petits grains contenant de l'anhydride sulfureux et d'autres substances chimiques, qui assaillent fresques et marbres, et qui en se condensant sur la surface, donnent lieu au processus chimique qui, en peu de temps, décolle ou ronge les chefs-d'oeuvre.

On peut affirmer donc, que la condensation actuelle est d'une autre nature chimique que celle des temps passés:

Nous n'examinerons pas le côté chimique, mais seulement le côté physique du phénomène dans certains aspects particuliers.

Dans sa théorie physique le phénomène de la condensation est traité dans une large littérature scientifique. Il est désormais notable que les causes qui la produisent sont : soit la différence de température entre celle d'une couche film d'air qui affleure une paroi et celle superficielle de cette même paroi (en fonction bien entendu de l'humidité relative de l'air et des caractéristiques physiques de la surface de la paroi); soit la différence entre la tension partielle de la vapeur d'eau dans l'air de la pièce et celle de la vapeur d'eau sur la surface de la paroi.

Je crois donc faire oeuvre bien plus utile et intéressante en prouvant, par le moyen de quelques cas typiques issus de mon expérience au côté de l'Ingénieur Massari, que le phénomène de la condensation, aussi évident en théorie, offre parfois, en pratique des aspects qui ont donné lieu à des interprétations contrastantes

pa) apport aux causes qui l'ont produit.

En effet, cette expérience m'a permis d'en parler avec une des personnalités des plus compétentes en la matière, l'ingénieur Croiset, "Chef de la Division hygrométrie des matériaux du Service de l'Agrément et des Etudes de Matériaux et Procédés de Construction". Il est regrettable que l'Ing. Croiset n'ait pu participer à ce congrès en nous privant de l'apport de sa connaissance en la matière. Je remercie de nouveau l'Ing. Croiset qui m'a permis d'exposer, selon son écrit, la première partie de la relation qui se rapporte à la critique du "vide d'air" retenu comme élément isolant et à cet effet utilisé dans les cryptes, dans les salons de musées, dans les bibliothèques ainsi que, d'une façon très courante dans le bâtiment.

La plus grande partie des mesures expérimentales a été conduite précisément dans les habitations aux parois avec "vide d'air". Ces mesures ont permis de repérer dans ce vide une cause concomitante se rapportant au phénomène de la condensation, comme il a été ensuite constaté pour l'assainissement de la crypte de S. Colombano de Bobbio.

La deuxième partie se rapportera aux phénomènes de condensation sur les structures hétérogènes c'est-à-dire dans les structures où le coefficient de conductibilité varie de façon discontinue dans la même structure d'après les variations de densité des matériaux qui la composent.

La dernière partie traitera d'une étude, qui même à présent suit son cours; je parle des tombeaux étrusques de Tarquinia, où le phénomène de la condensation se présente avec celui de la remontée de l'eau par capillarité. Cette étude est dirigée par le prof. Gino Parolini, Président du Groupement de Recherches pour l'Etude de l'Humidité des constructions près le C. N. R.

EXPERIENCES SUR LE VIDE D'AIR.

L'écrit de l'Ing. Croiset paru dans "Cahier n°54" se rapportait aux "Mesures d'humidité de matériaux en oeuvre effectuées en Algérie".

Attendu que le taux d'humidité des matériaux influe sur leurs caractéristiques thermiques, plus ou moins selon qu'ils sont légers ou lourds, en France le "Centre Scientifique et Technique du Bâtiment" a conseillé l'adoption, pour chaque type de matériaux, d'un "taux d'humidité utile" c'est-à-dire une valeur moyenne de l'humidité naturelle de ces matériaux en oeuvre, valable sur tout le territoire français; très bonne idée qui évite toute discussion relative à la définition qui doit être donnée pour les matériaux retenus secs. Par rapport au "taux d'humidité utile" a été calculé le coef-

ficient de conductibilité K dit "coefficient K utile"; par ex. le taux d'humidité utile pour certains matériaux est le suivant :

briques pleines : 0,5 % en volume
briques creuses : 1 % en volume
mortier des joints : 4 % en volume
enduit : 3 % en volume

La question recherchée par l'auteur a été de voir si les chiffres ci-dessus étaient valables aussi pour les pays chauds et en particulier pour l'Algérie; des mesures d'humidité ont été effectuées en prélevant des échantillons de maçonnerie dans les locaux d'habitation et cela pendant toute la période de l'année.

La maçonnerie à l'étude est réalisée par un vide d'air de 22 cm. (pour rafraîchir la pièce avec des courants de convection) délimité par deux parois en briques creuses de 10 cm. d'épaisseur.

La résistance de cette paroi d'après un coefficient moyen de conductibilité $\lambda = 0,50$ est à peu près $R = 0,78 \text{ m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}/\text{Cal}$.

A la suite des mesures effectuées on a été quelque peu surpris de trouver dans le matériau composant la brique creuse un taux d'humidité utile de 2,6%, c'est-à-dire plus du double du taux d'humidité vérifié en France ce qui portait l'auteur à la conclusion qu'il n'était pas possible de repérer un élément nouveau pour améliorer ce taux d'humidité sinon la pluie pendant les mois d'hiver et le poids spécifique des briques creuses, 1,65 plus bas par rapport à celui du territoire national, 1,7 + 2, ce qui les faisait devenir plus capillaires.

J'ai repris alors pour mon compte l'examen de ces données en les comparant avec les mesures les plus significatives que pendant plus de dix années nous venons de recueillir dans plusieurs contrées d'Italie, toujours en vue de l'assainissement de l'humidité. J'en extrais les plus caractéristiques et les plus rapprochées aux conditions rapportées dans l'écrit.

Je les résume brièvement pour donner le cours exact de ces mesures qui se rapportent aux villes de Rapallo, de Venise (Mestre), Mantone.

Rapallo (mois de juin)

- 1) Pluviosité annuelle moyenne : 1250 mm
- 2) température min. moyenne : 7,8°C
- 3) structure de la maçonnerie porteuse en briques creuses à six trous de 30 cm. d'épaisseur
- 4) dégâts : moisissures sur les enduits intérieurs.

Mesures humidité de l'enduit intérieur 0,8% en poids rapporté

au sec

humidité relative de l'air ambiant en moyenne 70%
humidité relative de l'air dans les trous des briques 85%.

Venise (Mestre)

- 1) Pluviosité annuelle moyenne : 790 mm.
- 2) température min. moyenne : 1,2°C.
- 3) structure de la maçonnerie : paroi double
 - maçonnerie extérieure en briques pleines de 24 cm. d'épaisseur
 - vide d'air 3 cm.
 - briques creuses intérieures 3 cm.
- 4) dégâts : moisissures sur les enduits intérieurs.

Mesures : humidité de l'enduit intérieur : 15% en poids rapporté au sec

humidité des joints en mortier intérieurs: 10% en poids

humidité des joints en mortier extérieurs: 3 %

humidité de l'air :

extérieur	ambiant	couche film adhérente à la paroi	dans la double paroi
80 %	80 %	90 %	100 %

Mantone (janvier)

- 1) Pluviosité annuelle moyenne : 690 mm.
- 2) Température min. moyenne : 1,3°C
- 3) Structure de la maçonnerie : double paroi
 - maçonnerie extérieure en briques pleines de 12 cm d'épaisseur.
 - vide d'air 4 cm.
 - briques creuses à 4 trous intérieures de 8 cm d'épaisseur
- 4) dégâts : moisissures sur les enduits intérieurs

Mesures humidité de l'enduit intérieur 0,8% en poids

humidité relative de l'air :

extérieur	ambiant
100%	76%

couche film adhérente à la paroi 78 %
humidité dans le vide d'air 100 %

Les dégâts nommés ci-dessus, sont dûs tous à des phénomènes de condensation; en effet ils se présentaient sous forme de tâches irrégulières et, au moment des mesures, sauf pour Venise, les enduits étaient secs (0,8%).

D'après les mesures rapportées on peut conclure que l'interprétation de l'humidité dans les constructions légères avec maçonneries en briques creuses ou à double paroi, ne doit pas être dirigée seulement sur la pluviosité vue comme pénétration

par capillarité mais sur la pluviosité en tant qu'élément refroidissant de la paroi bien plus, en l'absence de dégâts matériels aux maçonneries ce qui exclut toute pénétration de pluie de l'extérieur, la cause directe de l'augmentation du taux d'humidité des matériaux, suivant le cas des constructions mentionnées par M. Croiset, est due au refroidissement de la paroi extérieure soit pour des raisons climatiques (variation de température entre le jour et la nuit comme dans le cas déjà mentionné) soit pour l'assèchement de la surface extérieure juste après la pluie; cela provoque une augmentation de l'humidité relative de l'air renfermé soit dans les trous des briques, soit dans le vide de la double paroi. Cet air avec un haut degré d'humidité relative, par le phénomène de la diffusion, fait monter le taux d'humidité des matériaux composants la maçonnerie légère, en augmentant la conductibilité λ et en provoquant ainsi les phénomènes de condensation remarqués.

On voit donc comment un dégât très banal dû à la condensation devient énigmatique dans son explication pour la seule raison que les mesures ont été prises dans une seule direction, c'est-à-dire la pluie qui baigne la paroi extérieure sans tenir compte du refroidissement de cette même paroi et de la saturation de l'air renfermé dans l'espace vide de la maçonnerie.

Il en résulte ainsi que la paroi extérieure est soumise d'une part à l'imbibition de la pluie et d'autre part à l'imbibition, par diffusion dans ses pores, d'air saturé.

Il faut se rappeler que l'isolation est liée en effet à la faible conductibilité de l'air contenu dans les pores des matériaux: λ de l'air = 0,02 K Cal/h m°C; l'eau, au contraire, qui remplace une partie de l'air dans les pores des matériaux humides, a un coefficient de conductibilité très élevé; λ de l'eau = 0,5 et dans la même proportion diminue la résistance des matériaux qui composent la paroi.

Si on avait supprimé ce vide d'air en le remplaçant avec un quelconque isolant thermique, même de très faible épaisseur, on aurait évité sans aucun doute la condensation non seulement sur la surface intérieure de la paroi extérieure dans le vide d'air mais aussi sur la surface intérieure de la paroi délimitant la pièce.

Un autre exemple dans lequel le vide d'air délimité par une paroi mince est cause concomitante de la condensation est celui rencontré et examiné dans l'assainissement de la Cripte de S. Colombano.

Pour la chronique : St. Colombano, très vénéré en Irlande, évangélisée par lui, fonda ensuite en Italie et précisément à Bobbio une célèbre Abbaye, contenant de précieux incunables et manuscrits qui enrichissent aujourd'hui plusieurs bibliothèques. La ville de

Bobbio a une pluviosité d'environ 1000 mm., et ici aussi la pluie était jugée la cause unique des taches qui déparaient les parois et le dallage de la Crypte.

- Structure des murs : Toutes les maçonneries porteuses ont l'ossature en pierres lourdes, en bonne partie constituées par les cailloux du lit du fleuve Trebbia. Il s'agit d'une maçonnerie avec coefficient de conductibilité intérieure de la chaleur supérieure à 2 Cal./ml h°C; maçonnerie qu'on appelle "froide". Le mur de contour de la crypte, de m. 1,20 d'épaisseur a été récemment lambrissé, pour s'opposer à l'humidité, avec une contre-paroi de briques creuses minces avec vide d'air placé derrière comme il est indiqué dans le croquis N. 1. En plus on a cru bien faire en recouvrant le mur originaire d'une paroi adhérente en briques pleines à plat (voir croquis) toujours avec la conviction de mieux lutter contre l'humidité. Ces opérations ont été toutes les deux d'un effet totalement contraire.

En effet, les dégâts constatés étaient : les parois intérieures de la crypte et surtout celle située au Nord attenante au vide d'air, avaient l'enduit détérioré sur m. 2,10 + 2,20 de hauteur en correspondance du vide d'air avec érosions, regonflements et nombreuses tâches d'un aspect très désagréable. Le 10 août au matin par un très beau temps ont été effectuées deux séries de mesures : 1° de l'humidité relative de l'air (avec psychromètre électronique instantané); 2° de l'eau liquide contenue dans les structures des murs, parois et pavement, en employant un instrument normal indicatif de l'humidité à électrodes non fixés.

Humidité relative de l'air (avec le psychromètre électronique)

On a remarqué une rapide augmentation de l'extérieur à l'intérieur: en plein air dans le portique de l'église 41%
dans la crypte 87%

dans le vide d'air derrière la contreparoi cette dernière mesure nous indique que le vide d'air, réalisé dans les conditions ci-dessus mentionnées, est la cause concomitante qui a déterminé le phénomène de la condensation.

Mais pour mieux comprendre cette dernière mesure, qui, tout en étant indicative, ne dirait pas grand chose quant au but de notre exposé, je poursuis avec les mesures effectuées.

- Eau rencontrée dans les parois

D'après les mesures effectuées, comme il est indiqué synthétiquement dans le croquis N. 1, on trouve que dans la partie inférieure du mur, on rencontre une grande charge d'eau (20% en poids) évidemment absorbée par le terrain, à cause, sans aucun doute, de la paroi de briques pleines. L'absorption aurait été de loin inférieure si l'ossature originaire en pierres avait été laissée à nu, sans ce revêtement en briques.

Dans l'ensemble les mesures prouvent aussi que dans la paroi de briques pleines, l'eau monte très peu (environ m. 1,10). Par rapport à l'épaisseur totale du mur qui est de m. 1,20 ainsi qu'à l'emplacement enterré de la crypte, cette humidité, remontante par capillarité, n'est pas tellement grave.

Si, au lieu des pierres et des cailloux, ce mur avait été bâti en briques et dans la même épaisseur de m. 1,20, l'humidité du côté nord aurait atteint le dallage de l'Eglise au dessus de la Crypte.

- Eau renfermée dans le dallage.

Très faible presque normale, ne dépasse pas 2,9 % alors qu'au dessous elle est d'environ 20 %.

- Précédents essais pour éliminer l'humidité.

Il est évident que rien n'avait été fait pour mesurer la quantité et la distribution de l'eau dans la structure du mur. Faute de diagnostic, des excellents travaux ont été exécutés dans l'hypothèse erronée qu'il fallait tout simplement barrer d'abord le passage à l'eau liquide qui provenait du terrain environnant surelevé d'environ 1,70 m par rapport au dallage de la crypte et ensuite isoler celle-ci par un vide d'air: ces deux procédés, l'un comme l'autre, n'ont pas atteint leur but parce qu'il n'y avait pas de pénétration d'eau et la construction du vide d'air a créé derrière la paroi un coussin d'air saturé qui, en imprégnant par diffusion les briques creuses, a réduit de beaucoup la résistance thermique de celles-ci. De plus, faute d'évaporation, l'eau capillaire dans les briques pleines est montée jusqu'à un niveau de bien loin supérieur à celui atteint auparavant.

REMEDES PROPOSES.

Le problème ayant été circonscrit par les mesures décrites ci-dessus les remèdes proposés ont été très simples.

- 1° Isoler thermique de faible épaisseur
- 2° Placer dans la crypte un petit chauffage électrique capable de fournir une petite quantité de chaleur très diffuse.

On a conseillé d'installer un appareil pouvant fournir 4300 Cal./h. Ce chauffage (minime par rapport aux 1000 mc. d'air de la crypte) doit pouvoir fonctionner depuis fin février jusqu'à fin mai avec continuité dès l'aube de chaque jour et au moins pendant dix heures par jour.

En conclusion une protection thermique fondée sur la pratique du vide d'air pour s'opposer à la condensation se révèle plus

nuisible qu'utile; la baisse de température de la surface extérieure, due soit aux variations du jour et de la nuit dans les pays chauds, soit à certaines saisons comme l'hiver, dans les pays tempérés soit encore à l'évaporation pendant l'assèchement dû au vent froid et sec, produit une forte augmentation de l'humidité relative de l'air renfermé dans ce même vide d'air; le dégât ne serait néanmoins pas très grave si le phénomène de la diffusion n'intervenait pour élever le λ des matériaux en oeuvre. Les valeurs moyennes des augmentations des λ sont d'après Cammerer les suivantes, indépendamment de la nature des matériaux humides :

Pourcentage d'humidité par rapport au volume	1%	2,5%	5%	10%	15%
Pourcentage d'augmentation de la conductibilité intérieure par rapport à l'état sec (augmentation de λ)	30%	55%	75%	108%	155%

Par exemple le coefficient de conductibilité intérieure d'un mur en briques est d'environ 0,6 Cal./h M°C par rapport à 1% en volume d'eau ce qui correspond à environ 0,62% en poids lorsque on rejoint 5% en volume d'eau soit 3% en poids: quantité d'eau très normale dans une maçonnerie d'environ 12 cm. d'épaisseur en présence d'air saturé. Le coefficient de conductibilité λ rejoint la valeur 0,81 c'est-à-dire subit une augmentation de 33% et, par rapport, la résistance thermique varie de façon inversement proportionnelle à l'accroissement des λ ; en conséquence il se produit une baisse de la température superficielle de la paroi intérieure ce qui entraîne la formation d'eau de condensation.

Humidité par condensation dans les maçonneries lourdes.

Cette forme particulière de condensation est facilement reconnaissable à l'oeil nu; elle dessine sur la paroi un réseau de polygones irréguliers qui suivent le façonnage de la structure derrière l'enduit; elle dessine, en effet, les contours ou des pierres ou du pilier en béton armé.

Mais même cette forme aussi visible que l'eau de condensation peut donner lieu à des équivoques et à une interprétation tout à fait erronée :

1) parce qu'on remarque quelquefois la présence d'eau liquide sur la dallage à proximité des parois.

2) parce que les pierres lourdes n'absorbent pas l'eau et par conséquent il ne peut y avoir pénétration par capillarité

Donc on peut conclure en disant :
"l'eau pénètre dans la pièce de l'extérieur à travers d'éventuelles disjonctions ou fissures"

Même dans ce cas l'expérience nous a permis d'encadrer le problème.

Le phénomène de la condensation n'est donc pas dû à la diffusion d'air saturé dans le matériau qui en facilite le refroidissement comme cela se vérifie dans le vide d'air, mais seulement au refroidissement de la structure lourde dû à la perte de chaleur dans un temps relativement bref à cause de son fort coefficient de conductibilité. Le refroidissement dans ces cas est presque toujours lié à la pluie avec vent. Dès que celle-ci a cessé, un vent, plus froid et plus sec, provoque l'évaporation de l'eau qui baigne la paroi extérieure et par conséquent une baisse de température; ordinairement la chute de température varie de 3° à 3,5°C en hiver.

A cause de cela, la paroi intérieure se refroidit aussi et sur sa surface s'établit une importante quantité d'eau de condensation qu'on pourrait prendre pour de l'eau pénétrée dans la structure.

Dans ce deuxième cas, donc, davantage que dans le premier, il faut nécessairement déterminer les deux éléments qui provoquent la condensation: 1° l'humidité relative de l'air, 2° la température superficielle de la maçonnerie et la température de l'air à proximité de la paroi.

La première nous est donnée par un psychromètre normal, les deuxièmes, au contraire, peuvent être relevées plus difficilement surtout si on exige l'approximation d'un 1/2°C et si on veut, en même temps, tenir compte de l'humidité de la paroi.

Dans ce but nous avons, dans notre laboratoire, mis au point une technique d'une exécution rapide et très simple.

On place sur la paroi à contrôler des petits cônes d'argile plastifiée qui a la propriété d'absorber fort bien l'eau par capillarité et en même temps de rejoindre très rapidement le même niveau thermique de la paroi; cela à cause de la très grande différence de capacité calorifique des deux éléments: paroi - cône d'argile. Ce dernier se place ainsi dans les mêmes conditions hygrothermiques de la paroi et il suffit de plonger dans le cône l'élément d'un "thermocouple" relié à un indicateur suffisamment sensible (il y en a aujourd'hui d'excellents dans le commerce pour avoir la température superficielle avec une approximation d'environ 1/2°C; il suffit ensuite de mesurer la température de l'air à quelques centimètres de la paroi et de trouver ainsi le $\Delta t = t_a - t_s$ (t_a = température ambiante, t_s = température superficielle) qui, en fonction de l'humidité relative, nous indique un éventuel phénomène de condensation

Cette méthode nous a été très utile pour prélever les températures superficielles et celles de l'air dans les tombeaux étrusques de Tarquinia, où le phénomène de condensation se présente uni à celui d'imbibition par capillarité.

Le problème est celui d'observer ce phénomène et dans le temps et dans la quantité, en tenant compte de l'état très humide des parois à fresque qui, faisant un avec le terrain environnant, ont immédiatement à l'arrière une quantité d'eau qui en moyenne rejoint environ le 10% en poids; la technique employée a été celle de placer sur une verticale bien déterminée plusieurs points de relèvement c'est-à-dire un thermocouple plongé dans un point d'argile et un thermocouple à quelques centimètres de distance; la première pour la température superficielle et la seconde pour la température ambiante. On a constitué ainsi un réseau de données capable de nous montrer aussi, en fonction de l'humidité relative de l'air mesurée par un thermohygrographe, une éventuelle formation de condensation stratifiée.

Nous avons exposé ainsi les cas particuliers se rapportant au problème de la condensation; on a mis l'accent sur ces cas pour bien faire remarquer que, si le phénomène physique de la condensation obéit à une théorie, désormais du domaine commun, ses variables, température et humidité relative, peuvent à leur tour dépendre de causes diverses, du phénomène de la diffusion dans le premier cas, de la perte rapide de chaleur; dans le deuxième, les deux causes engendrent une baisse de température et par conséquent la formation d'eau de condensation.

La différence entre un cas et l'autre est fournie seulement par les mesures qui doivent se faire sur place et en tenant compte des conditions où le lieu se trouve habituellement. La méthode à suivre pour l'assainissement doit jaillir des données ainsi réalisées et il ne suffit pas de parler par ex. de chauffage si on évite de préciser quand et combien il faut chauffer et si cela est vraiment nécessaire.

En effet, si au phénomène de condensation s'ajoutait en même temps celui d'un mouvement d'eau par capillarité et si la pièce avait une ventilation insuffisante, le chauffage ne ferait qu'augmenter la vapeur d'eau et par conséquent accroître le phénomène de la condensation.

Pour conclure on ne peut pas donner en général une méthode unique d'assainissement pour tous les dégâts provoqués par la condensation. L'expérience nous montre que la condensation est fonction de variables dont les valeurs doivent être repérées avec continuité; pour cela chaque problème doit être étudié en particulier sans croire à l'illusion d'un remède unique valable pour tous les cas.

BIBLIOGRAPHIE

- G. MASSARI "Risanamento igienico dei locali umidi"
3 éd. Hoepli Milano 1967.
- M. CROISSET "Mesures d'Humidité de Matériaux en oeuvre effectuées en Algérie".
Cahiers du Centre Scientifique et technique du Bâtiment, N.54 - 1962.
- I. S. COMMERER Konstruktive Grundlagen des Wärme- und Kälteschutzes im Wohn-und Industriebau,
Berlin, 1936.

M. Carmine ANEMONA