

METHODES ET MOYENS DE MESURE DE L'HUMIDITE

- INTRODUCTION.

Pour pouvoir étudier les problèmes de l'humidité dans les monuments, il est absolument nécessaire de pouvoir mesurer la teneur en eau des matériaux et, en plus, de connaître les conditions dans lesquelles les mesures sont faites. Car, en effet, l'eau dans un matériau poreux peut se trouver soumise à des liaisons très diverses, et la mise en évidence de l'eau, par différentes méthodes physiques, risque de donner des résultats divergents, en fonction de la méthode de mesure employée.

Il sera fait successivement la revue des différentes méthodes en partant de la méthode thermo-gravimétrique qui est en général choisie comme méthode de référence.

II- MESURE DE L'HUMIDITE PAR PRELEVEMENT D'ECHANTILLON ET SECHAGE.

II-1. Théorie du séchage

Cette méthode dont l'utilisation paraît élémentaire fait intervenir une série de phénomènes complexes de diffusion, d'évaporation et d'échanges thermiques.

L'essai consiste :

a) à prélever un échantillon représentatif dans la structure à étudier par un moyen mécanique ne modifiant pas sa teneur en eau.

b) à mettre le prélèvement dans une étuve à une température convenablement choisie, après l'avoir soigneusement pesé;

c) à conserver l'échantillon dans l'étuve jusqu'à ce que sa masse ne varie plus lors de 2 pesées successives. La teneur pondérable en eau α de l'échantillon est exprimée, pour les matériaux tels que le béton, la brique, le mortier et les pierres naturelles, par :

$$\alpha = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad \text{ou par} \quad \alpha' = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad \text{La deuxième définition nous semble}$$

moins arbitraire.

En raison de l'ambiguïté possible, il sera bon d'indiquer à chaque fois si la teneur en eau est rapportée à la masse sèche ou à la masse humide.

M_h : masse initiale avant séchage,
 M_h : masse après séchage.

Une autre grandeur très utile est la densité sèche du matériau. plus rigoureusement, la masse volumique sèche apparente $\delta = \frac{M_s}{V}$, V étant le volume apparent ou extérieur du matériau poreux.

La densité humide ou masse volumique humide apparente $\delta_h = \frac{M_h}{V}$

La teneur en eau peut être aussi rapportée au volume V de l'échantillon, et beaucoup de méthodes donnent directement cette valeur :

$$\alpha = \frac{M_h - M_s}{V} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \delta_s = \frac{M_h - M_s}{M_h} \delta_h$$

d'où : $\alpha = \alpha_\eta = \alpha'$

L'expression de la teneur en eau en volume est unique.

Phénomènes intervenant au cours du séchage.

Les phénomènes se produisant au cours du séchage d'un matériau poreux ont été étudiés en détail, bien que les paramètres régissant le séchage soient nombreux et peu maniables.

Première phase.

Elle est relative au départ de l'eau lorsque l'échantillon est proche de l'état saturé, les pores sont remplis d'eau et les transferts d'eau s'effectuent sans faire intervenir d'effets importants de capillarité. Les phénomènes sont identiques à l'évaporation à la surface libre d'un liquide et dépendent :

a) de l'efficacité des échanges thermiques en surface, c'est-à-dire de la possibilité de transfert par l'air des calories nécessaires pour compenser la chaleur latente d'évaporation;

b) de la possibilité de diffusion de la vapeur au travers de l'air, possibilité gouvernée par la température absolue et les pressions partielles de vapeur à la surface (saturation) et dans l'air de l'étuve.

On voit assez facilement que la vitesse de séchage dans cette phase est constante et dépend, entre autres paramètres, de la différence de température entre l'échantillon et l'air.

Deuxième phase.

Les mouvements d'eau sous forme liquide dans les pores imparfaitement remplis sont gouvernés par le coefficient de perméabilité du milieu lui-même, fonction de la teneur en eau et de la forme et de la dimension des pores.

D'autre part, une certaine quantité d'eau peut se déplacer sous phase vapeur, sa vitesse de déplacement dépend alors du gradient des pressions partielles de vapeur au fond des pores, de la dimension et de la forme des pores.

Troisième phase.

Dans ce cas, le champ des pressions de vapeur s'est uniformisé dans toute la surface interne de l'échantillon et tous les points participent en même temps à l'évaporation. La vitesse de séchage tend vers zéro lorsque le produit atteint son humidité d'équilibre.

En conclusion, le séchage d'un matériau et sa durée dépendent essentiellement de :

- sa teneur en eau initiale, et sa température de séchage.
- sa stabilité chimique à la température de séchage
- la dimension et sa répartition des pores,
- la dimension de l'échantillon (temps de séchage proportionnel au carré des dimensions).

On remarquera qu'un séchage total demanderait un temps très long, car il existe toujours une valeur de l'humidité de l'atmosphère en équilibre avec l'eau se trouvant au fond des pores à une température donnée. De plus, cette eau, liée à la surface des grains, ne peut partir qu'à des températures très supérieures à 100°C.

Les traditions du laboratoire de chimie ont établi les processus de séchage suivants pour différents matériaux :

- Masse de prélèvement : 1 gramme ;
- Température de séchage : -105°C pour les briques, bétons, mortiers, pierres, sols; -50°C pour les plâtres;
- Vérification du poids au bout d'une heure, puis, toutes les demi-heures suivantes, et ceci jusqu'à ce que la variation de poids au cours de 2 pesées successives soit inférieure à 1 milligramme.

Les mesures sont en général complétées par une perte au feu à 1.000°C, avec mesure du CO₂ dégagé, de la perte d'eau à 350°C pour les matériaux pierreux, et par la mesure de l'eau de constitution à 450° C pour le plâtre.

Le bilan des différentes pertes de poids tel qu'il est donné par la thermobalance, permet de retrouver le bilan de l'eau liée chimiquement et physiquement.

Il était nécessaire de s'attarder sur le séchage, car il met en évidence toute la complexité des liaisons de l'eau avec le matériau poreux. L'extraction de l'eau peut aussi se faire sans action de la température en mettant l'échantillon sous vide. Dans ce cas, le séchage est plus rapide que dans l'air à la même température, la diffusion de l'eau en phase vapeur étant considérablement facilitée par la disparition de l'air faisant obstacle à la diffusion et aussi par l'augmentation du gradient de pression de vapeur (si le vide est obtenu par une pompe mécanique).

Ce procédé a l'avantage, s'il est quelquefois plus long, de ne pas porter atteinte à la composition chimique du matériau en évitant l'action de la chaleur.

II. 2. Applications pratiques de la méthode pondérale.

La mise en oeuvre de la mesure de la teneur en eau est une opération pouvant s'effectuer avec des moyens extrêmement rustiques; par exemple au moyen d'une balance Roberval, l'étuvage étant remplacé par un brûlage du matériau imbibé d'alcool. Les moyens les plus perfectionnés peuvent aussi être utilisés. Il existe des balances automatiques, soit enregistreuses, soit à équilibrage automatique, le séchage étant obtenu par rayonnement infrarouge ou par un four.

Cette méthode qui constitue la méthode de référence, permet en particulier d'effectuer des étalonnages pour les méthodes indirectes. Elle est destructrice et ne peut pas être utilisée couramment. Dans les chapitres suivants, nous envisageons uniquement des méthodes non destructives de mesure.

III - MESURE DE L'HUMIDITE DES MATERIAUX PAR L'INTERMEDIAIRE DE LA TENSION DE VAPEUR D'EQUILIBRE.

On dispose une boîte contre le mur à étudier et on mesure les caractéristiques de l'air qui s'y trouve. Un équilibre (humidité et température) s'établit au bout d'un certain temps, et il semble possible de déduire de cet état d'équilibre la teneur en eau du mur immédiatement sous la surface obturée par la boîte.

On trouve le tableau de correspondance suivant

Succion exprimée en			Humidité relative de l'air des pores en % pour 20°C
Hauteur d'eau h en cm	pF $\log_{10} h$	Pression p Pascals ou N/m ²	
1	0	10 ²	100
10	1	10 ³	100
100	2	10 ⁴	99,99
1 000	3	10 ⁵	99,92
10 000	4	10 ⁶	99,27
100 000	5	10 ⁷	93,00
1 000 000	6	10 ⁸	48,43
10 000 000	7	10 ⁹	0,07

Ce tableau comparé avec les courbes de pF (α) d'un matériau donné permet d'établir la courbe humidité relative - teneur en eau d'équilibre.

Plusieurs remarques peuvent être faites :

1° Pour la teneur en eau proche de la saturation, la méthode n'aura aucune sensibilité. Cette zone correspond approximativement à la première partie de la courbe de séchage.

2° Les corps poreux ont souvent une courbe différente à l'humidification et au séchage, ce qui entraîne une certaine incertitude dans les valeurs de la teneur en eau.

3° Il est absolument nécessaire d'attendre la mise en équilibre thermodynamique du système et la fin du transfert.

4° Il semble nécessaire de calorifuger la boîte pour que l'air emprisonné soit à la même température que la surface du corps poreux sans amener de perturbations trop importantes dans la température de surface.

IV - UTILISATION DE LA MESURE DES PROPRIETES THERMIQUES DES MATERIAUX POUR LA MESURE DE LA TENEUR EN EAU.

Il est connu depuis très longtemps que le coefficient de conductivité thermique λ d'un matériau varie considérablement en fonction de sa teneur en eau. Cette propriété a été utilisée pour mesurer la teneur en eau des sols et a donné lieu à d'assez nombreuses tentatives.

Cependant, il est assez difficile de mesurer le λ des matériaux poreux en fonction de la teneur en eau α . Les mesures en régime stationnaire sont délicates car les transferts d'eau suscités par les gradients thermiques indispensables à la mesure, faussent les mesures de flux thermique. D'autre part, les mesures en régime transitoire sont parmi les mesures les plus délicates à effectuer et à interpréter.

Une méthode consiste à enregistrer l'élévation de température autour d'un fil chauffé électriquement suivant une loi donnée.

Il est possible au moyen de développements mathématiques à partir de l'équation de Fourier, de connaître la loi théorique de l'évolution des températures dans un milieu infini entourant le fil.

V- MESURE DE LA TENEUR EN EAU PAR DES METHODES ELECTRIQUES.

(Mesure de résistances ou impédances électriques)

Ces méthodes utilisent toutes, sous des formes variées, l'influence de l'eau sur la résistance ou l'impédance d'un circuit électrique constitué à partir d'un matériau poreux.

Pour mieux comprendre le fonctionnement de ces appareils, il est nécessaire de connaître comment varie la conductivité complexe d'un milieu poreux.

Considérons un prisme de matériau muni de deux électrodes; si on le soumet à une différence de potentiel V continue, il sera parcouru par un courant I tel que :

$$V = I \rho \frac{l}{S} \quad \text{ou} \quad I = \frac{VS}{l} \rho$$

où ρ est la résistivité du matériau,
 l sa longueur,
 S la section.

Si la différence de potentiel est alternative, la relation devient :

$$I = \frac{VS}{\rho l} + j \omega \epsilon' \frac{SV}{l}$$

où ϵ' est la constante diélectrique du matériau,
 $\omega = 2\pi f$, la pulsation,
 f la fréquence du courant,
 $j = \sqrt{-1}$, indique que le courant est déphasé de 90° par rapport à la tension.

Pour utiliser une notation homogène, on peut remplacer la notation précédente par une autre en posant

$$\epsilon'' = \frac{1}{\omega \rho} \quad \text{et} \quad \epsilon = \epsilon' - j \epsilon'' = \epsilon' - \frac{j}{\omega \rho}$$

On arrive à

$$I = j \omega \frac{S}{l} \epsilon V = j \frac{S}{\omega l} V (\epsilon' - j \epsilon'')$$

On a l'habitude de ne pas utiliser les constantes diélectriques absolues mais les valeurs par rapport au vide ou à l'air, d'où l'introduction d'une nouvelle valeur :

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad \text{telle que} \quad K = K' - j K''$$

ce qui donne la relation finale :

$$I = j \omega \frac{S}{l} V \epsilon_0 (K' - j K'')$$

où ϵ_0 est la constante diélectrique du vide.

Les caractéristiques électriques des matériaux humides seront donc complètement connues quand on aura déterminé la variation de K' et K'' en fonction de la pulsation ω .

Un matériau de construction comme le plâtre, les pierres, le béton parfaitement sec, a une résistivité pratiquement infinie (il est isolant en courant continu) et une valeur de constante diélectrique K' comprise entre 2 et 5. Son comportement est celui d'un diélectrique ordinaire; l'eau pure a une constante diélectrique K' élevée de l'ordre de 80 aux basses fréquences et sa variation est connue et a été étudiée tout le long du spectre radio-électrique.

$$(\text{Jusqu'à } 1.000 \text{ MHz, } K = 80 - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} = 80 - j \frac{18.10^9 \sigma}{f})$$

où σ est la conductivité de l'eau.

$$\text{Au-dessus de } 1.000 \text{ MHz, } K = 1,75 + \frac{80 - 1,75}{1 - j \frac{f}{f_c}} \quad \text{avec } f_c = 16.000 \text{ MHz.}$$

Cette relation correspond à l'effet de relaxation dipolaire de la molécule d'eau).

Par contre lorsque l'eau se trouve dans un milieu poreux sa conductivité est ionique et varie suivant la nature et la quantité de sels dissous.

Le problème se complique singulièrement lorsqu'on se trouve en présence d'un matériau humide car il est nécessaire

de poser un schéma équivalent pour pouvoir calculer l'évolution de K' et K'' fonction de ω .

Ce schéma a fait l'objet de très nombreuses hypothèses car il ne peut être simplifié au point de se réduire à 1 ou 2 capacités et résistances.

Le matériau étant continu, sa présentation comporte l'association d'un nombre important d'éléments résistifs et capacitifs en série parallèle (fig. 1) pour répondre aux différentes conditions posées par les cas extrêmes et donner des résultats se rapprochant de l'expérimentation.

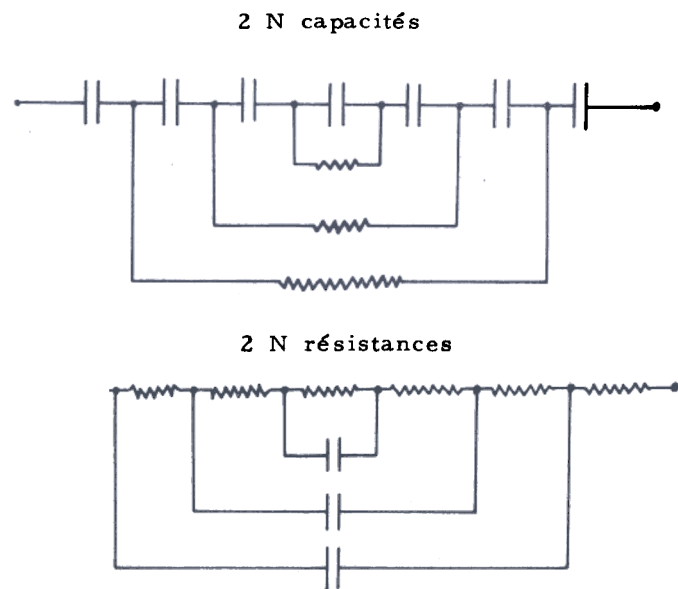


Fig. 1 Schéma électrique équivalent à un matériau humide.

D'autre part, il est assez facile de mesurer sur de petits échantillons prismatiques comment varie l'impédance complexe de divers matériaux en fonction de la fréquence et de la teneur en eau.

La figure (3) donne les variations de K' pour différents matériaux.

Cet ensemble de courbes permet de voir les solutions intéressantes pour la réalisation d'appareils ainsi que leurs possibilités.

V. 1. Mesures en courant continu ou alternatif à basse fréquence.

Ces conditions expérimentales répondent à un cas exploité par d'assez nombreux appareils.

La mesure en courant continu ne met en évidence que la variation de la résistivité ρ du matériau; celle-ci est considérablement affectée par la conduction ionique, et soumise à toutes ses fluctuations. Contrairement à ce qui est indiqué par de nombreux auteurs, il n'existe pas de différence de valeur entre les mesures effectuées en courant continu, et les mesures effectuées en très basse fréquence si toutes les précautions sont prises pour effectuer la mesure, en particulier :

a) Utilisation de préférence aux autres de la méthode des géophysiciens dite à 4 électrodes - dispositif Wenner ou Schlumberger.

b) Utilisation en courant continu d'électrodes impolarisables pour les mesures de tension.

c) A titre purement comparatif, on peut utiliser des dispositifs avec 2 électrodes, mais on se souviendra que dans ce cas, on ne mesure que la résistance aux alentours immédiats des 2 électrodes. Cette méthode est peu sûre car il est de ce fait nécessaire de réaliser un contact reproductible et aussi parfait que possible entre les électrodes et le matériau.

La résistivité du matériau varie en fonction de la teneur en eau et du titre de cette eau en sels dissous, ρ devient infini pour une teneur en eau telle qu'il n'y a plus continuité électrique entre les films d'eau, ce qui ne correspond pas forcément à la teneur en eau nulle. Il est préférable d'établir la courbe de la conductivité $\frac{1}{\rho}$ ou de K'' en fonction de la teneur en eau, en volume, ces deux caractéristiques évoluant dans le même sens.

La précision de ces appareils est bonne vers les faibles valeurs de α et devient faible du côté des fortes teneurs. Les mesures conductimétriques sont sensibles à la température, et il semble nécessaire de refaire les courbes d'étalonnage s'il y a des écarts de température de l'ordre de 10 ou 20°.

Parmi les nombreux appareils travaillant par conductimétrie, nous citerons par exemple l' "Hydromette Gann" destiné, entre autres utilisations, à la mesure des enduits. Cet appareil a 2 électrodes qu'il est nécessaire d'enfoncer dans le matériau à mesurer (fig. 2).

Les mesures de l'évolution de la résistance de la sonde renseignent sur la teneur en eau du matériau voisin. Cependant, dans ce cas, on ne mesure pas directement la teneur en eau du matériau avoisinant mais sa succion dans des conditions ayant fait

l'objet d'une étude de Coleman et Croney sur la méthode proposée à l'origine par G. J. Bouyoucos.

La plupart des hygromètres électriques existants fonctionnent au moyen de sels hygroscopiques et ces sels s'altèrent rapidement, compromettant l'étalonnage du système.

Les hygromètres du type proposé ont une courbe d'étalonnage pratiquement invariable et dépourvue d'hystérésis. On peut par construction faire varier la zone de sensibilité maximale en jouant sur la distance et la disposition des électrodes. Son étalonnage est indépendant de la température de 2 à 32°; il peut être nettoyé à l'eau distillée.

Cet appareil semble promis à de nombreuses applications en particulier pour la mesure de l'humidité dans les vides non accessibles ou la mesure de la teneur en eau des matériaux par mesure de l'hygrométrie de l'air.

V.2. Mesure de la teneur en eau des matériaux par l'intermédiaire de leur constante diélectrique.

Les appareils fonctionnant sur ce principe exploitent les courbes donnant K' en fonction de α_v (en volume) (fig.3). Les courbes montrent que, compte tenu de l'ordonnée à l'origine, ces appareils ne peuvent pas être très précis dans la gamme des très faibles teneurs en eau.

Des variations de la constante diélectrique du matériau du squelette (par exemple en fonction de sa densité) sont la cause d'imprécision dans cette zone.

Par contre, ils ne sont pas influencés par les sels dissous, s'ils ne sont sensibles qu'à la composante réactive de l'impédance (ce qui n'est pas toujours le cas). Leur précision est bonne dans les fortes valeurs de α .

Des appareils ont été construits il y a longtemps par Marconi, pour la mesure de la teneur en eau des grains de blé.

Le C.E.B.T.P. a développé deux appareils; l'un à 10 MHz pour la mesure de l'humidité des enduits de plâtres et de mortiers avant peinture (Constructeur AOIP) (fig.4), l'autre, à 100 MHz, comprenant une sonde plate qui permet la mesure de l'humidité des corps jusqu'à 5 cm de profondeur.

La figure 5 montre la courbe d'étalonnage de la sonde d'humidité des enduits; pour les plâtres de différentes densités on remarquera que les courbes sont quasi superposables si l'on exprime la teneur en eau en volume.

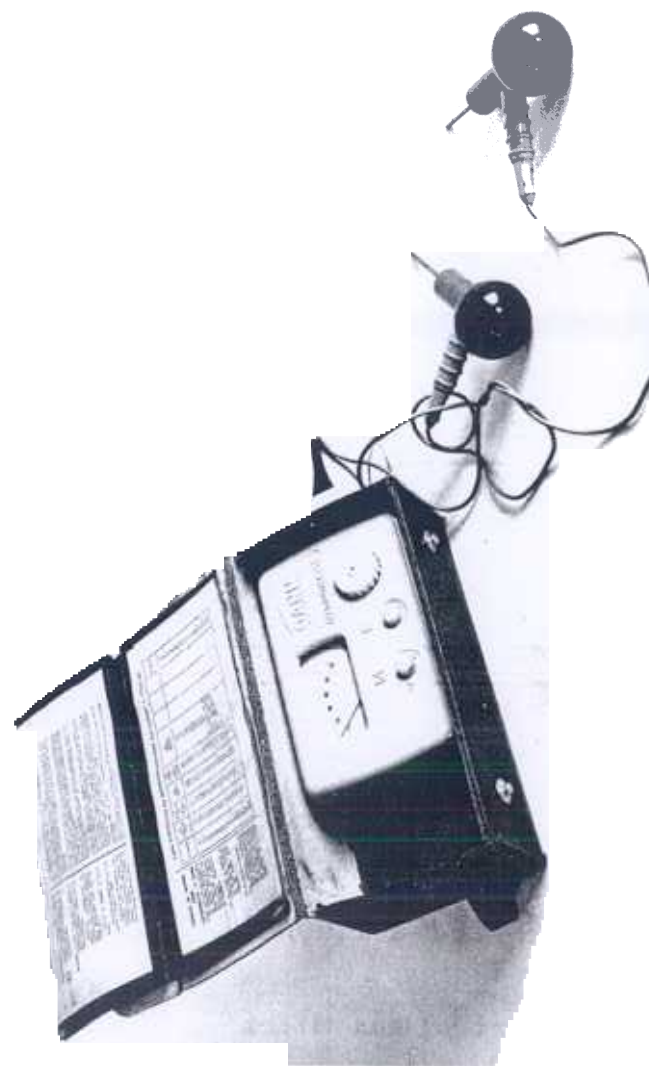
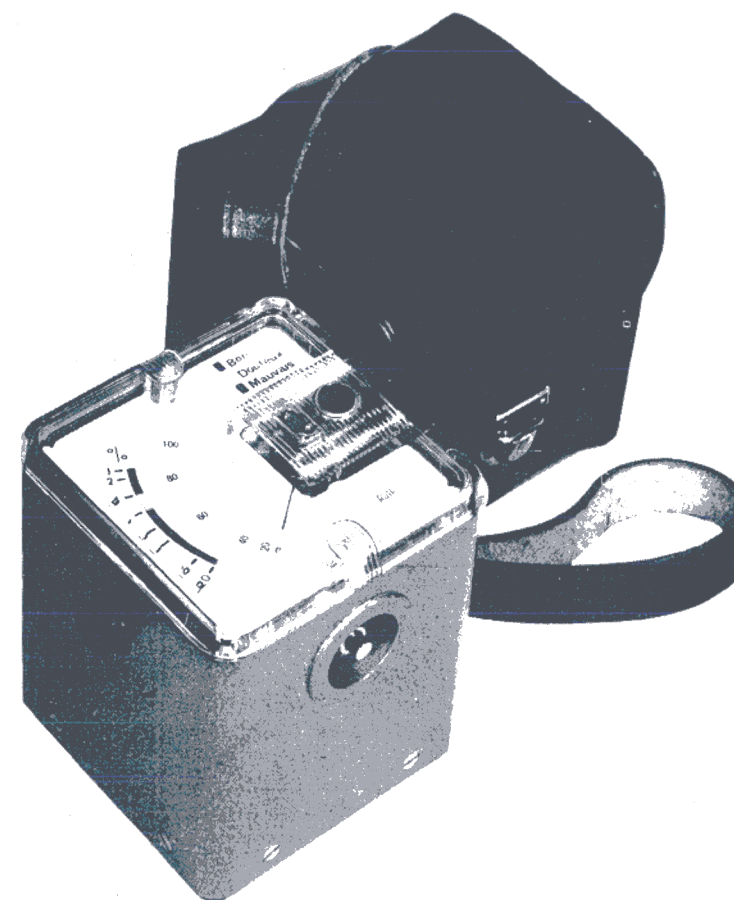
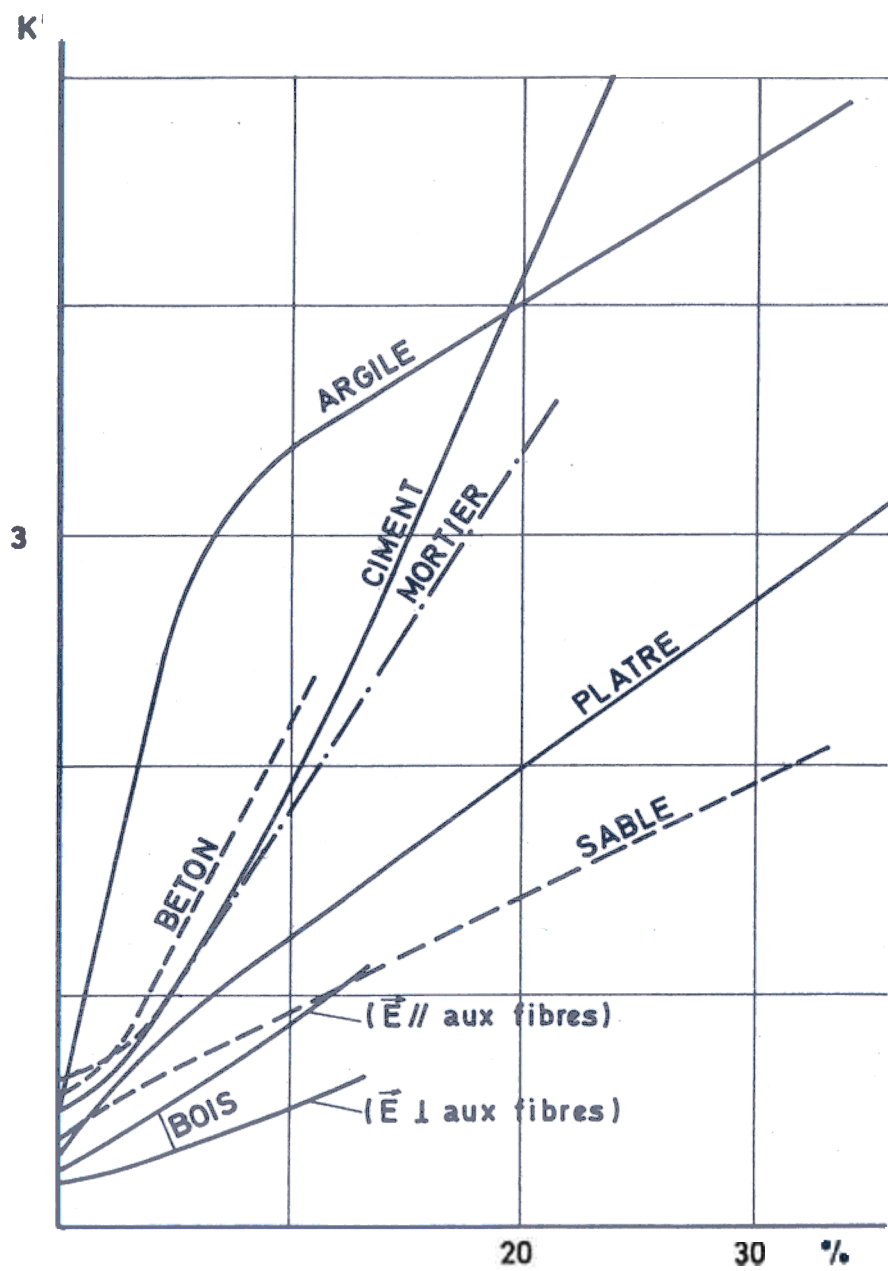


Fig. 2. - Mesure de l'humidité par résistance électrique (Hydromette Gann).



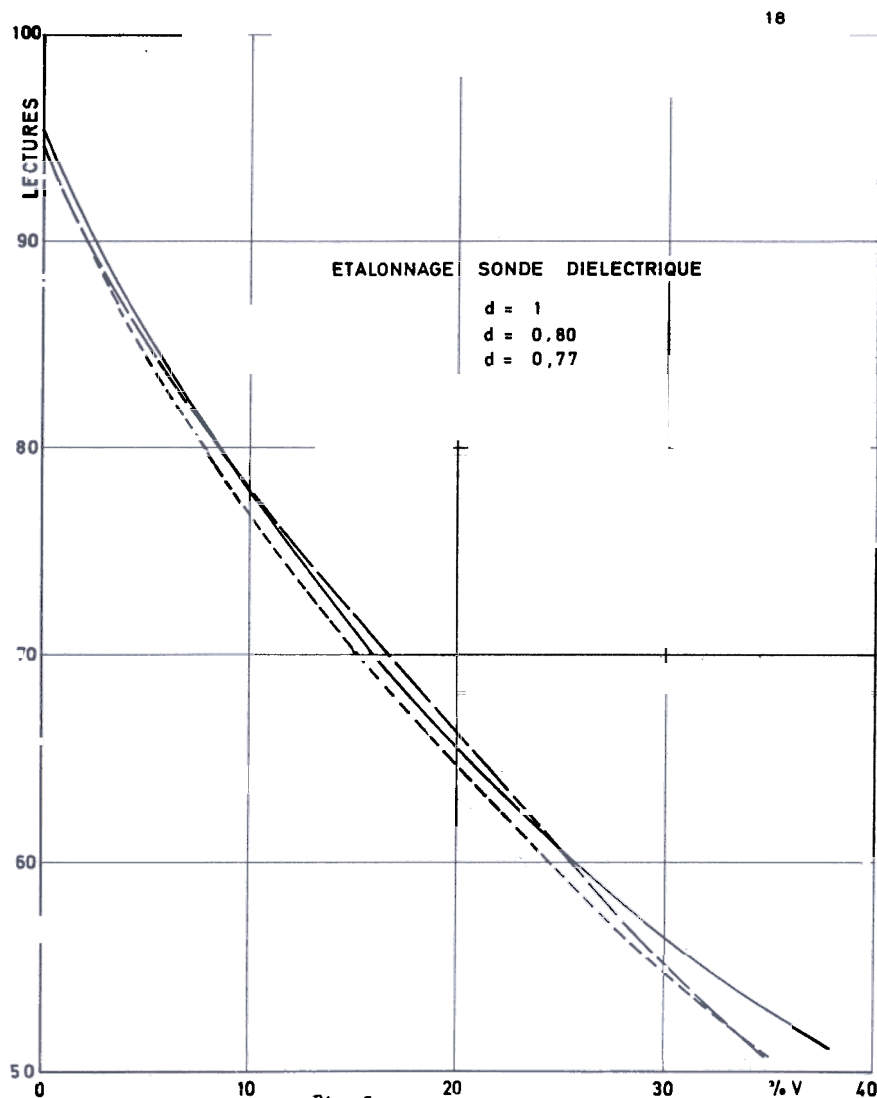


Fig. 5

Un type original d'humidimètre utilisant la mesure de la constante diélectrique a été décrit par A. Klein (Université de Californie).

Dans cet appareil, la cellule hygrométrique est protégée du milieu à mesurer par une série de membranes semi-perméables ne laissant circuler que de l'eau pure.

L'élément sensible, qui se trouve ainsi protégé de l'eau chargée en sels, est réalisé par un dépôt sur un mandrin en polystyrène d'une solution d'alcool polyvinylique dans une solution eau-alcool. Le tout est séché à l'étuve à 60°. L'impédance électrique de cet appareil est mesurée par comparaison avec une résistance à 1.000 Hz.

Si l'eau qui passe au travers des membranes est effectivement pure, sa résistivité sera très élevée, et la valeur lue ne dépendra que de l'impédance $\frac{1}{C\omega}$ de la sonde, elle-même ne dépendant que de la quantité d'eau absorbée par la résine.

Cependant, il reste un point mal déterminé, c'est l'humidité d'équilibre s'établissant à l'intérieur de l'enceinte définie par les deux membranes semi-perméables. Encore une fois, ce dispositif donne une mesure de la succion ou de l'énergie libre de l'eau, et il est nécessaire de remonter à partir de cette valeur à la teneur en eau.

V. 3. Mesure de l'humidité par l'absorption dipolaire de l'eau (A. D. D. = absorption dipolaire Debye).

Cette propriété de l'eau due à la forme dipolaire de sa molécule est une forme de la mesure de l'eau par une méthode électrique. En effet, lorsqu'on étudie l'absorption par l'eau d'un rayonnement électromagnétique dans la gamme centimétrique, on constate un maximum d'absorption vers 28.000 MHz à 20°. De plus, la fréquence à laquelle se produit ce maximum d'absorption varie considérablement avec la température de l'eau. Ces phénomènes ont été utilisés par Freymann et Le Bot, pour l'étude de la prise des ciments dans le cadre d'une étude générale de l'A. D. D., et par A. Watson, qui a réalisé le premier des appareils destinés à mesurer l'humidité des murs avec un rayonnement de longueur d'onde 10 cm, puis au C. E. B. T. P., où furent effectuées les premières mesures sur 3 cm.

La méthode opératoire est simple; l'échantillon ou le mur est disposé entre deux guides d'ondes, et une mesure de l'affaiblissement apporté par l'obstacle est faite au moyen d'un atténuateur. L'atténuation varie à peu près proportionnellement à la quantité contenue dans l'épaisseur du matériau, les pertes dues à l'eau prenant le pas sur toutes les autres pertes d'origine électrique. On obtient ainsi des courbes d'étalonnage assez peu diffé-

rentes pour différents matériaux. Cependant, plus on s'éloigne de la valeur de l'absorption maximale 28.000 MHz, plus cette différence s'accuse. Les ordres de grandeur de l'absorption sont de 30 dB par lame d'eau équivalente de 1 cm à 10.000 MHz (3 cm) et de 4 à 7 dB pour 3.000 MHz (10 cm).

Ces valeurs permettent le choix des appareillages. Si l'on a affaire à un échantillon mince contenant peu d'eau, on aura avantage à utiliser le rayonnement à 3 cm, permettant des mesures plus sensibles et plus précises. Par contre, le rayonnement à 10 cm traverse des épaisseurs plus grandes et, en particulier, permet les mesures sur les murs en place.

Les mesures sont assez délicates à effectuer car il est nécessaire de se mettre dans les conditions de mesures optimales. En effet, le rayonnement se comporte comme la lumière et, à chaque changement de milieu, une partie de l'énergie est transmise, et l'autre réfléchi. Il est donc nécessaire d'effectuer au départ des réglages pour réduire les réflexions à leur valeur minimale, et ainsi le taux d'onde stationnaire (T.O.S.) en l'absence d'échantillon.

La présence de l'échantillon perturbe ces réglages, et en particulier, on peut noter une petite influence de la conductivité de l'échantillon.

Toutes ces influences peuvent être prises en compte par le calcul. Mais en conclusion, si les réglages sont bien effectués, on constate que les courbes d'étalonnage sont reproductibles, et que les corrections sont en définitive assez faibles.

Des appareils font l'objet d'une réalisation industrielle, mais ils sont encore assez encombrants et lourds, et le Klystron (générateur des hyper-fréquences), et son alimentation ne peuvent pas se passer de l'alimentation secteur.

De grands espoirs sont actuellement permis par le remplacement du klystron par des semi-conducteurs qui permettraient une réduction considérable de volume de l'appareillage, en facilitant l'utilisation.

Cependant, dans l'état actuel de la technique, ces appareils permettent une sorte de radiographie des murs du point de vue humidité, qui est d'une aide considérable pour résoudre les problèmes de pathologie du bâtiment.

VI. MESURE DE LA TENEUR EN EAU DES MATERIAUX AU MOYEN DES NEUTRONS ET RAYONS GAMMA.

Ces techniques utilisent deux propriétés des rayonnements

- l'absorption du rayonnement γ par la matière, absorption à peu près proportionnelle à la masse spécifique du matériau.

- la transformation des neutrons rapides en neutrons lents après collision sur les atomes d'hydrogène.

L'utilisation des rayons γ permet la mesure précise de la densité humide du matériau, et si l'on a la possibilité d'effectuer des mesures dans des conditions identiques, par exemple en fonction du temps, on peut suivre l'évolution de la densité humide du matériau, et ainsi l'évolution de sa teneur en eau.

Deux types d'appareils sont utilisés. Dans l'un, le matériau est placé entre la source (Co 60), et le détecteur de rayonnement (Compteur Geiger ou scintillateur) (cette disposition est celle qui donne en général les mesures les plus précises). Dans l'autre, on dispose une sonde dans un trou, le rayonnement allant de la source vers le compteur, par rétro-diffusion dans le matériau.

Ce deuxième appareil est assez sensible aux conditions expérimentales, et en particulier, à l'importance du jeu entre la sonde et le trou.

L'utilisation des neutrons rapides à la particularité de ne caractériser que l'hydrogène présent dans le matériau, quelle que soit sa forme physique ou chimique. Le dispositif de mesure se présente lui aussi sous la forme d'une sonde comprenant une source de neutrons rapides (Ra Be), et un tube compteur de neutrons lents au fluorure de bore. L'équipement de comptage doit être capable de sélectionner les impulsions dues aux seuls neutrons lents.

Deux configurations expérimentales ont été réalisées. L'une avec la source à proximité immédiate du compteur, l'autre la source et le compteur se trouvant de part et d'autre de l'échantillon.

La configuration par transmission présente certains avantages, en particulier d'être peu influencée par la distribution de l'eau dans l'épaisseur. Par contre, la courbe d'étalonnage dépend de l'épaisseur traversée.

Des courbes d'étalonnage séparées sont données pour les différents matériaux susceptibles d'être utilisés pour la construction des murs et, malheureusement, elles ne se superposent pas

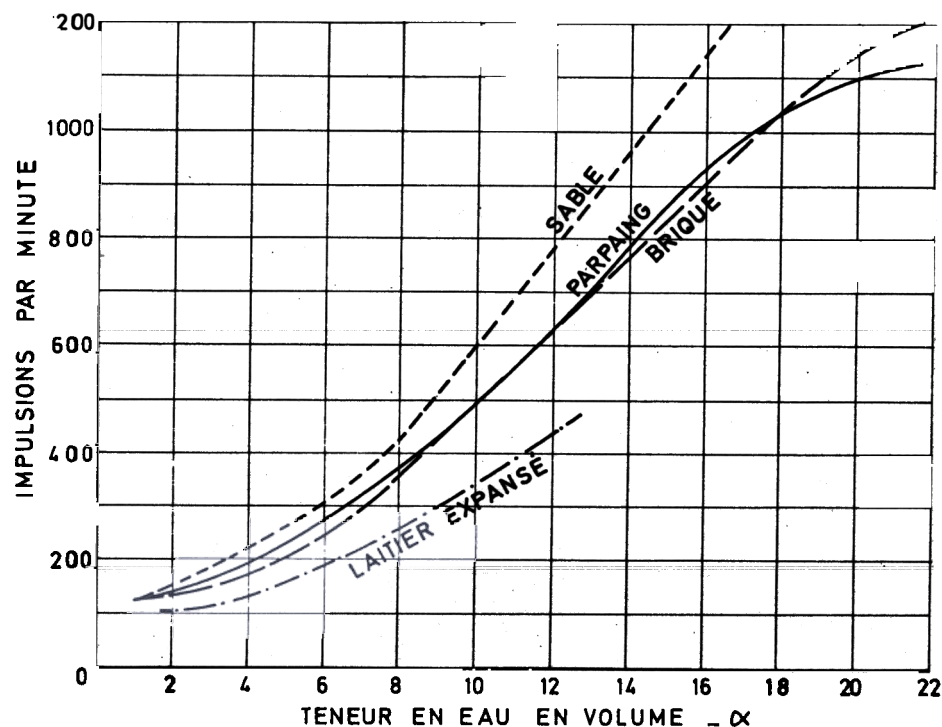


Fig. 6. Courbes d'étalonnage de différents matériaux montrant la non-superposition des mesures.

toutes (fig. 6). D'autre part, dans de nombreux matériaux, il est nécessaire de tenir compte de l'eau combinée ou cristallisée pour calculer la teneur en eau libre. Ceci est une cause de difficultés, car il est souvent difficile de connaître cette dernière valeur.

CONCLUSION

La revue des différents appareils et méthodes montre que si les méthodes possibles sont très nombreuses, aucune n'est parfaite. D'autre part, les appareils sont rarement commercialisés et de nombreux laboratoires utilisent des appareillages montés de toutes pièces.

Une question pratique souvent posée concerne le rayon d'action d'un appareil. Il est difficile de répondre à cette question car, en général, les appareils mesurent une moyenne pondérée (sauf pour l'absorption hyperfréquence). Cette pondération peut d'ailleurs dépendre de la teneur en eau.

Au point de vue mesure, on peut distinguer

1° Les appareils à sondes ou témoins noyés dans la structure à contrôler. Ce procédé apporte évidemment une certaine détérioration, mais c'est le seul qui permette le contrôle de la répartition à travers l'épaisseur d'un mur.

2° Les appareils "externes".

a) soit à partir d'une seule face: ils ne mesurent alors que l'humidité superficielle (appareils à constante diélectrique par exemple 1 à 5 cm, ou à neutrons).

b) soit à partir des deux faces (absorption hyperfréquence) : ils ne mesurent que la quantité d'eau globale.

Les tableaux suivants résument les différentes possibilités, avec leurs avantages et leurs inconvénients.

APPAREILS A TEMOINS NOYES.

	Avantages	Inconvénients	Appareils Commerciaux
Résistance électrique à deux électrodes	Simplicité	<ul style="list-style-type: none"> - Grande sensibilité aux sels dissous et à la température - Mesure au voisinage des électrodes - Etat de surface important - Etalonnage fonction du matériau. 	<p>Hydromette GANN</p> <p>Micro Hygromètre FEUTRON*</p>
Résistance électrique Système à 4 électrodes	Mesure exacte de la résistivité électrique du milieu	<ul style="list-style-type: none"> - Grande sensibilité aux sels dissous et à la température - Etalonnage fonction du matériau. 	Appareils de prospection électrique fonctionnent sur le même principe mais ne sont pas adaptés aux faibles bases de mesure
Capteur à membrane semi-perméable Appareils à blocs de plâtre	<ul style="list-style-type: none"> - Insensibilité aux sels dissous - Simplicité 	Mesure l'humidité du témoin noyé et non celle du matériau.	Utilisé par Klein* (Université de Californie). Pas de commercialisation à notre connaissance
Impédance électrique à 100 MHz	Mesure de 2 paramètres permettant de connaître l'influence des sels dissous	<ul style="list-style-type: none"> - Etalonnage différents suivant les matériaux - Appareillage de mesure complexe et coûteux. 	Utilisé au CEBTP pour les mesures dans les structures en béton

APPAREILS EXTERNES

	Avantages	Inconvénients	Appareils Commerciaux
Mesure de l'impédance diélectrique à 10 MHz	<ul style="list-style-type: none"> - Commodité d'emploi - Destiné initialement à la mesure de la teneur en eau enduits de plâtre - Faible prix 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible précision aux basses teneurs en eau - Décalage de l'origine pour certains matériaux - Faible profondeur de mesure - Nécessite une surface plane 	Humidimètre AOIP*
Mesure de l'impédance diélectrique à 100 MHz Couplage inductif	<ul style="list-style-type: none"> - Commodité d'emploi - Bonne pénétration 	<ul style="list-style-type: none"> - Etalonnage dépend des matériaux - Sensibilité aux pièces métalliques 	Utilisé au CEBTP non commercialisé
Absorption hyperfréquence	<ul style="list-style-type: none"> - Mesure indépendante du matériau - Mesure d'humidité globale 		AEI (°)
Appareils à neutrons	<ul style="list-style-type: none"> - Etalonnage dépendant peu de la nature du matériau - Mesure également la densité 	<ul style="list-style-type: none"> - Surtout prévus pour les sols en position horizontale - Appareils lourds et coûteux - Rayon d'action variant avec la teneur en eau 	A titre indicatif SOILTEST

* Micro Hydromètre FEUTRON

BIOLYON 6, rue de la Barre
69 - LYON (2e)

+ Humidimètre AOIP

AOIP : 23, Place Jeanne d'Arc
75 - PARIS (13e)

(°) Absorption hyperfréquence AEI

SEIEM : 8, rue Palonceanu
75 - PARIS (18e)

* Alexandre KLEIN :

Université de Californie
Division of Structural Engineering and Structural Mecha-
nics Structural Engineering Laboratory, Berkeley.
U. S. A.