

# LES METHODES ELECTRIQUES ET ELECTRO - CINETIQUE D'ASSECHEMENT.

## Introduction.

### CHAPITRE I. BASES THEORIQUES DES PHENOMENES ELECTRO-OSMOTIQUES DE MIGRATION DE L'HUMIDITE DANS LES BATIMENTS.

1. Capillarité et tension superficielle.
2. Viscosité et loi de Poiseuille.
3. L'électroosmose et les phénomènes connexes.
4. Mécanisme moléculaire de la migration électroosmotique.
5. Drainage du potentiel électroosmotique formé par l'ascension capillaire.

### CHAPITRE II. LE DIMENSIONNEMENT DES INSTALLATIONS D'ELECTRODRAINAGE.

1. Installations d'électrodrainage actif.
2. Eléments nécessaires pour dimensionner les installations d'électrodrainage, en tenant compte du danger de la corrosion des électrodes.
3. Installations d'électrodrainage passif.
4. Installations mixtes d'électrodrainage.

### CHAPITRE III. DONNEES PRATIQUES CONCERNANT LA REALISATION DE L'ELECTRODRAINAGE.

1. Les électrodes en cuivre pour la paroi.
2. Les électrodes en acier-béton pour la paroi.
3. Autres types d'électrodes.
4. Les prises de terre.
5. Les compositions dépolarisantes.
6. Méthodes nouvelles pour la réalisation des installations d'électrodrainage actif et passif.
7. Méthodes nouvelles pour l'exécution des électrodes.

### CHAPITRE IV. SUR LES POSSIBILITES D'UTILISER LES METHODES ELECTROCHIMIQUES, POUR LES MACONNERIES DESAGREGÉES.

La consécration (le durcissement) à l'aide des électrodes en aluminium.  
La consécration (le durcissement) des maçonneries à l'aide de l'électrosilicotisation.

V. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS CONCERNANT L'APPLICATION DE L'ELECTRODRAINAGE CHARGE DES BATIMENTS.

Introduction.

L'état d'humidification des murs, enregistré sous forme de tâches spécifiques, apparaît à la suite d'un ensemble de phénomènes physiques intimement liés entre eux. Un état d'humidification prolongé a de graves conséquences sur les bâtiments, dues non seulement aux effets physiques mais surtout aux effets chimiques. Ce qui est très important, c'est que ces états ont pour résultat une insalubrité complète, rendant les immeubles inhabitables.

Tout comme les causes de l'humidification, les aspects sous lesquels elle apparaît, peuvent être très différents.

Dans le langage courant ou bien dans la conception du grand public, la notion d'humidité n'implique aucune différenciation des multiples formes sous lesquelles apparaissent les causes et les effets.

Ce fait crée même par les constructeurs des confusions qui ne permettent pas l'application des méthodes les plus indiquées pour supprimer l'humidité.

Pour une connaissance plus approfondie des phénomènes d'humidification dans les travaux de maçonnerie, il est nécessaire de connaître à fond l'essence du complexe de phénomènes physiques qui apparaissent lors de l'humidification.

Pour la compréhension complète de ce que l'on connaît aujourd'hui sur la capillarité, l'osmose, l'électrocapillarité, l'électroosmose, la viscosité, le drainage des liquides à travers les matières poreuses, enfin la filtration et tout cela en fonction de la température, de la pression atmosphérique et de la tension de la vapeur de l'atmosphère, il est nécessaire de les connaître comme notion, d'après leur apparition historique, afin de se rendre compte jusqu'où il est nécessaire d'aller avec les spéculations théoriques. L'interprétation, la connaissance judicieuse, la disposition dans les limites des lois physiques et mathématiques, en vue de l'application pratique sous forme de procédés, ne peuvent être attaquées avec efficacité - nous en avons la conviction - que par l'analyse approfondie des bases théoriques des phénomènes aussi complexe que la migration de l'humidité à travers les milieux poreux.

La littérature scientifique spécialisée s'occupant de méthodes destinées à arrêter la migration de l'humidité dans les bâtiments, est pauvre. Dans les différents traités sur les constructions, on trouve seulement la description de méthodes utilisées couramment par les constructeurs, citant pour chacune d'elles les avantages et les désavantages. Mais il faut indiquer dès le début que l'humidification apparaît dans les constructions, dans la plupart des cas, à la suite de l'ascension capillaire de l'humidité du terrain (faute d'isolations horizontales dans les vieux bâtiments) ou bien à cause d'un processus en corrélation avec la mauvaise ventilation de certaines pièces où prennent naissance des vapeurs (pièces aux parois froides et avec dégagements de vapeurs dûs à un processus technologique industriel ou bien avec dégagement massif de respirations).

Il y a aussi des humidifications passagères provoquées par des défauts de construction de certains éléments ou de certaines installations (rigoles et égouts fissurés, gaines de ventilation défectueuses, manque de tuyaux de drainage, trottoirs non étanches autour des constructions, etc.).

Les méthodes utilisées pour combattre l'humidité dans les constructions, sont :

- les méthodes basées sur la stimulation de la ventilation des murs envahis par l'humidité,
- les méthodes basées sur la stimulation de l'élimination de l'humidité par des phénomènes électrochimiques,
- les méthodes basées sur l'injection de certaines substances d'isolation et d'imperméabilisation.

Dans le rapport présent nous ne nous occuperons que des méthodes électrochimiques dans le combat de l'humidité, méthodes que nous avons l'intention d'exposer par le détail en tant que théorie, mode de calcul de l'installation et procédés pratiques.

Les méthodes basées sur la stimulation de l'élimination de l'humidité par des phénomènes électrochimiques.

Parmi ces méthodes nous citons :

- l'électrodrainage passif, c'est-à-dire l'élimination de l'humidité utilisant des différences naturelles de potentiel (procédé Ernst-1941), part de la création d'un potentiel de fuite de l'humidité d'une maçonnerie par l'inversion de la polarité naturelle construction-terrain (40 ... 200 mV) obtenue par la mise à terre (système paratonnerre) à l'aide d'électrodes de cuivre introduites dans la maçonnerie, au niveau auquel nous désirons arrêter l'ascension de l'humidité. Au niveau de ces électrodes il se forme une barrière de potentiel électrique qui ne peut être vaincue par les forces ascensionnelles électrocapillaires. La barrière joue le rôle d'une isolation hydrofuge fictive. En général on obtient le séchage

en 3 ou 4 mois, le procédé présentant l'avantage d'être définitif et invisible car toute l'installation peut être cachée sous l'enduit ordinaire. La partie faible du procédé réside dans le fait qu'il requiert une haute qualification et un travail consciencieux de la part de l'ouvrier qui doit assurer le contact électrique au moyen du mastic dépolarisant introduit dans les orifices.

L'électrodrainage actif, c'est-à-dire l'élimination de l'humidité en utilisant une source de courant continu, s'appuie sur la stimulation et l'accélération de l'écoulement de l'humidité dans le milieu poreux entre les électrodes positives montées dans le mur et les électrodes négatives montées soit dans le mur soit dans le sol. Aux électrodes négatives montées dans le mur, les pores peuvent être colmatés avec des sels par suite d'un effet de dissociation électrolytique au niveau des électrodes. Le drainage est obtenu avec une source de courant, comprise entre 6 et 24 V. Ce colmatage a une durée limitée parce que les nouvelles invasions d'eau réussissent à dissoudre petit à petit les sels qui s'y sont formés. Le procédé a le désavantage de ne pas assurer une isolation définitive et de permettre aux nouveaux transports d'humidité qui dissolvent les sels formés, de déposer ceux-ci sur la surface sous forme d'efflorescences. L'avantage c'est qu'il donne des résultats rapides (environ 2 semaines) et qu'il peut être employé dans une méthode mixte, drainage actif d'abord et passif ensuite.

## CHAPITRE I. LES BASES THEORIQUES DES PHENOMENES ELECTROSMOTIQUES DE MIGRATION DE L'HUMIDITE.

1. Capillarité et tension superficielle. La fluidité parfaite n'existe pas pour les liquides réels, car ils se déforment autant dans le voisinage de certaines surfaces que dans leur propre masse.

La viscosité est une propriété dont dépend la déformation des liquides dans leur masse et qui est due au frottement des molécules du liquide. Pourtant - à la surface des liquides - il se produit un autre genre de déformation à cause de la tension superficielle. Il est notoire que pour n'importe quel corps - liquide, solide ou gazeux - la couche superficielle jouit de caractéristiques physiques spéciales différentes de celles de la masse. Par exemple, la conductibilité électrique, la densité, l'indice de réfraction, et en général toutes les propriétés physiques superficielles, diffèrent du reste de la masse; l'épaisseur de cette couche spéciale est d'environ 20-30 m

Cette membrane extérieure prend dans le cas de chaque liquide, une forme de surface minimale qui mène à un volume minimal; cette observation a été faite pour la première fois en 1752 par l'Allemand Segner et reprise en 1805 par l'Anglais Young. Partant de cette conception - de membrane de la couche superficielle -

on a pu définir la tension superficielle. La grandeur mesurée en dynes est la force exercée sur chaque  $\text{cm}^2$  de surface. Cette force est constante pour un liquide donné à une température donnée et définit les propriétés capillaires d'un liquide dans leur essence même. Cette définition a conduit Gauss en 1831 à la détermination de la formule connue :

$$(1) \quad T \text{ (ergs)} = \sigma \text{ (dynes)} \times S \text{ (cm}^2\text{)}$$

La première étude approfondie des phénomènes capillaires a été faite en 1805 par Laplace. Il a choisi, comme unique postulat, l'existence de certaines forces d'attraction parmi les cellules avoisinantes; ces forces s'exerçaient d'après Laplace jusqu'à une distance assez petite nommée "rayon d'activité moléculaire".

Une molécule de liquide M (fig.1) au voisinage d'une surface, à la différence d'une autre molécule M' de l'intérieur du liquide, ne se trouve pas équilibrée par les actions des molécules voisines mais est attirée à l'intérieur du liquide par une force transmise à la masse entière, nommée pression capillaire.

La surface sera courbée vers le liquide (convexe) si l'attraction est plus grande vers le liquide, ou bien courbée en dehors de celui-ci si l'attraction est plus grande de l'extérieur. L'attraction ou la répulsion, dépendent aussi de la nature des parois du récipient. D'ici l'explication - qualitative au moins - de l'ascension ou de la dépression capillaires.

Dans un tube capillaire en verre l'eau monte avec un ménisque concave (fig.2). Soit une molécule M dans le voisinage de la surface libre du liquide du vase et une molécule M' dans celui de la surface du ménisque du tube. Conformément aux lois de l'hydrostatique, dans les plans horizontaux la pression est constante. Par conséquent la pression capillaire est plus petite dans M' que dans M parce que le ménisque est concave et puisqu'elle est ajoutée à la pression hydrostatique, il est évident que M' se trouvera à un niveau supérieur à M.

La résultante des forces d'attraction des molécules de la paroi et du liquide du voisinage de la paroi, peut être dirigée soit vers la paroi, soit vers le liquide (fig.3 a, b). La direction de cette résultante indique aussi la forme du ménisque, concave ou convexe.

Laplace a supposé que le ménisque était sphérique et a calculé la différence de pression en donnant la formule :

$$(2) \quad P = \frac{2\sigma}{r}$$

La tension superficielle molaire de tous les liquides varie

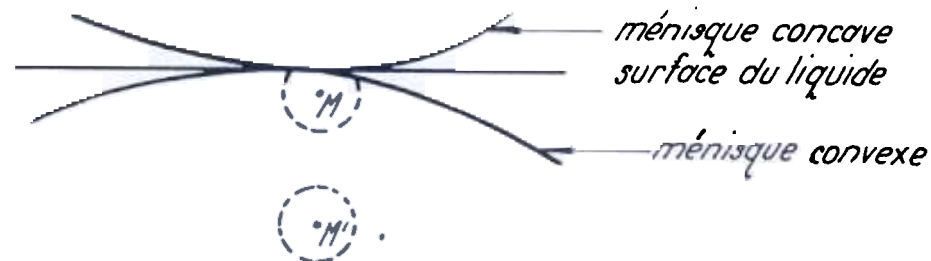


Fig. 1

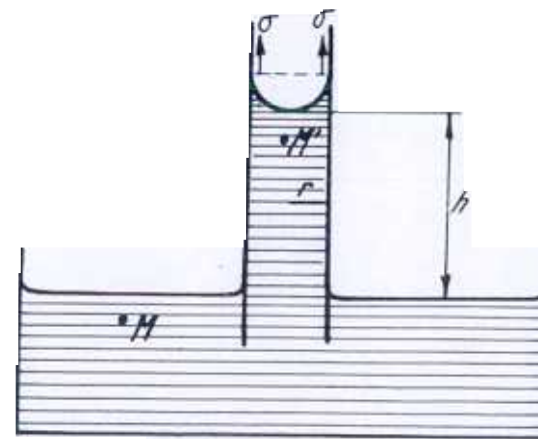
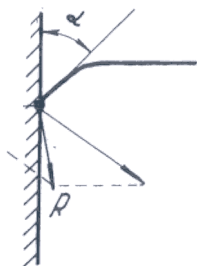
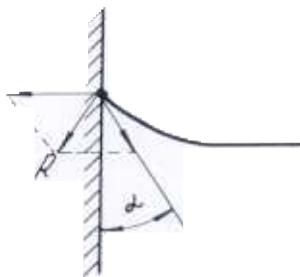


Fig. 2



a) ménisque convexe  
résultante vers le liquide



b) ménisque concave  
résultante vers la paroi

Fig. 3

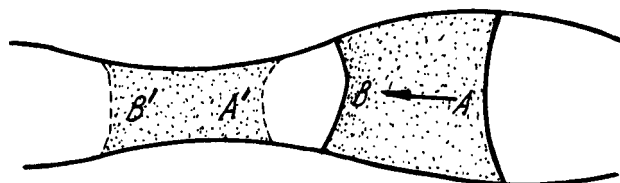


Fig. 4

avec la température, conformément à la relation établie par le Hongrois L. Eötvös (1886).

$$(3) \quad \sigma (MV)^{2/3} = k (T_c - T - 6)$$

où :

- $\sigma (MV)^{2/3}$  est la tension superficielle molaire
- M est la masse moléculaire du liquide
- T est la température du liquide
- $T_c$  est la température critique
- $K = 2,6$  erg/degré et  $\sigma$  est exprimé en dynes/cm.

On doit mentionner qu'avec quelques compléments la théorie de Laplace est valable aujourd'hui encore.

Dans le cas des matières poreuses, comme le sol ou les matériaux de construction (enduits, bétons, maçonneries de briques diverses), les phénomènes capillaires jouent un rôle très important spécialement lorsqu'il s'agit du contact entre l'air et l'eau qui a tendance à les imbiber. Leurs pores ont un diamètre très petit de sorte que la surface libre de l'eau prend une forme de ménisque. A l'état d'équilibre, la pression atmosphérique ( $p_a$ ) est plus grande que la pression du côté opposé du ménisque ( $p$ ). Avec  $R_1$  et  $R_2$  - principaux rayons de courbure du ménisque, cette différence de pression est :

$$(4) \quad P_a - p = \alpha \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

( $\alpha$  est l'angle de raccordement à la paroi).

La pression sous le ménisque étant plus petite, il apparaît une succion capillaire égale à :

$$(5) \quad p = p_a - \alpha \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Cette succion produit la migration de l'humidité dans les matériaux de construction capillaires poreux.

Dans le tube à diamètre variable de la fig. 4, la succion capillaire de A est plus grande que celle de B, donc le liquide se déplace dans la direction AB.

Quoique l'ascension capillaire soit énoncée depuis 1670 par Borelli, l'expression mathématique de la hauteur de l'ascension a été établie seulement en 1718 par l'Anglais Jurin.

La condition à écrire, établit l'équilibre du poids de la colonne de liquide par les forces de la tension superficielle :

$$(6) \quad 2 \pi r \sigma = \pi r^2 h \gamma$$

$$(7) \quad h = \frac{2 \sigma}{r \gamma}$$

$\gamma$  est la densité du liquide).

Aujourd'hui la relation (2) est établie d'après des critères thermodynamiques, à savoir : si le rayon  $r$  d'une bulle liquide s'agrandit avec  $dr$ , le travail mécanique accompli par la tension superficielle au long de la différence de surface de la bulle ( $8 \pi r dr$ ) doit être égal au travail mécanique développé par la pression pour la modification du volume avec  $4 \pi r^2 dr$ .

$$(2') \quad dr = 8 \pi r dr.$$

d'où (2) résulte simplement.

Ici, la tension superficielle a été définie comme le travail mécanique nécessaire à l'agrandissement de la surface de 1 cm<sup>2</sup> de manière isotherme et réversible.

Le surplus d'énergie libre de l'unité de surface n'est autre chose que la tension superficielle, c'est-à-dire l'énergie superficielle ( $W$ )

$$(g) \quad W = - T \frac{d\sigma}{dT}$$

(S est la croissance de l'entropie).

En revenant à l'ascension capillaire dans un milieu poreux, on doit observer que la montée de l'eau est d'autant plus grande que le diamètre des pores est plus petit. La hauteur capillaire est seulement une valeur limite pour un certain matériau, à cause de l'inégalité des dimensions des pores.

Si un tube de verre est rempli avec du sable sec et est ensuite immergé dans un récipient plein d'eau (fig. 5 a), l'eau imbibe les pores jusqu'à saturation, jusqu'à la hauteur  $h_{cs}$  et de manière incomplète jusqu'à la hauteur  $h_{cr}$ . En répétant l'expérience avec un sable saturé d'eau au préalable, avant l'immersion dans le réservoir, l'eau est drainée seulement de l'intervalle des hauteurs  $h_{cx}$  et  $h_{cs}$  (fig. 5 b); l'humidité au-dessus de  $h_{cx}$  demeure étroitement liée sous forme de pellicule (humidité naturelle), la zone de hauteur  $h_{cs}$  étant la zone de saturation non-drainable.

Dans les bâtiments la situation est intermédiaire, parce que toujours n'importe quelle maçonnerie aussi sèche qu'elle soit, contient une humidité naturelle due à l'échange permanent de vapeurs et de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur et en même temps à l'action de l'humidité de l'atmosphère toute proche qui pénètre dans les pores des matériaux.

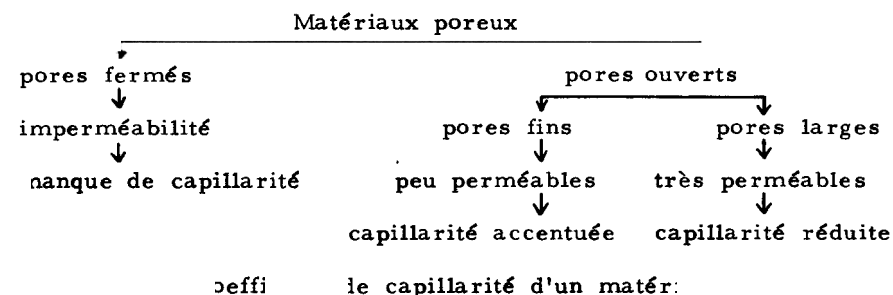
Le tableau 1 donne les valeurs usuelles pour différents sols et matériaux.

ТАВ

| Matériau        | Rayon<br>des pores                 | capillaire | Matériau   | Rayon<br>des pores                   | capillaire |
|-----------------|------------------------------------|------------|--|--------------------------------------|------------|
| Sable fin       | 10 <sup>-5</sup> cm                | 0, 0, 0    | Mortier<br>de chaux                                | 10, 0-15, 5<br>x 10 <sup>-5</sup> cm |            |
| Sable<br>fin    | cm                                 | 0, 5-2 m   | Mortier<br>de chaux<br>et ciment                   | 4, 00-5, 5 x<br>10 <sup>-5</sup> cm  |            |
|                 | cm                                 | 5 m        | Maçonnerie en<br>briques et<br>mortier de<br>chaux |                                      | 1 m        |
| Brique<br>rouge | 1, 00-12, 0<br>10 <sup>-5</sup> cm |            |  |                                      |            |

Les anciens constructeurs avaient l'habitude de dire : "la construction respire". En effet, à travers la masse poreuse constituée par les murs faits de matériaux classiques, il se produit en permanence un échange de chaleur et d'humidité de l'extérieur à l'intérieur et inversement. Il existe toujours un processus de migration qui sera amplement analysé dans les paragraphes suivants et qui a comme base les phénomènes capillaires.

En fonction de la nature des pores, la situation des matériaux de construction peut être montrée schématiquement comme il suit :



$$00 \frac{G}{S \sqrt{t}}$$

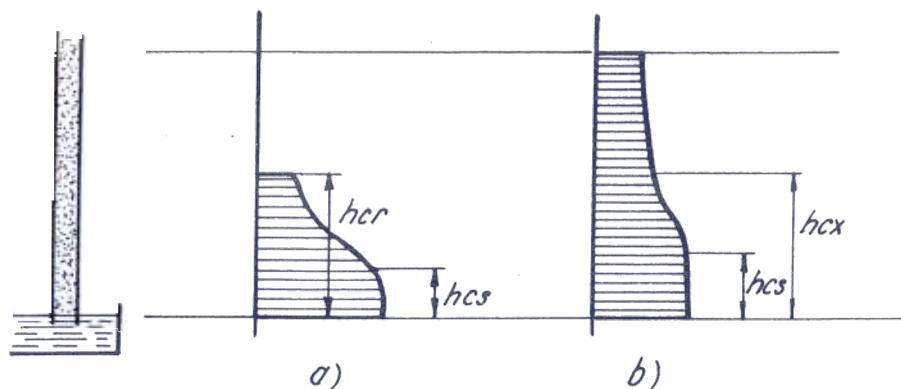


Fig. 5

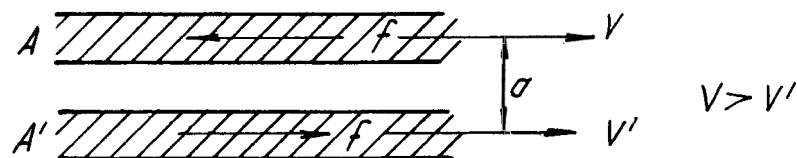


Fig. 6

où  
 $G$  - l'eau d'absorption du début de l'expérience (en grammes)  
 $S$  - aire de la base de l'éprouvette (en  $\text{cm}^2$ )  
 $t$  = temps écoulé depuis le début de l'expérience (en minutes).

Le coefficient de capillarité caractérise le matériau du point de vue de l'absorption capillaire. Pour le déterminer il faut que la valeur respective soit le résultat d'une moyenne.

## 2. Viscosité et loi de Poiseuille.

Si Archimède et Pascal sont considérés comme les pères de l'hydrostatique, de même l'hydrodynamique doit sa naissance à d'Alembert (1744). Ses équations, ne tenant pas compte de la viscosité, sont loin de la réalité, de sorte que Navier en 1822 et Poisson en 1831 ont essayé de les corriger en partant de l'hypothèse de Laplace. Mais ces travaux avaient plutôt une teinte théorique et ont été repris en 1843 par Barré de Saint-Venant, étant successivement complétés par Stokes, Boussinesq, Duhem, jusqu'au XIX<sup>ème</sup> siècle, lorsque Maxwell a élaboré la justification physique du phénomène partant de la théorie cinétique des gaz. D'après cette théorie, le frottement qui s'exerce entre deux couches voisines d'un fluide, couches qui ont différentes vitesses, entraînent réciproquement des molécules des deux couches; les plus rapides sont ralenties et les plus lentes sont accélérées. Les travaux expérimentaux de Coulomb et spécialement ceux de Poiseuille (1842) ont apporté une contribution essentielle.

Le coefficient  $\eta$  de viscosité a été défini par Navier comme suit :

Le coefficient de viscosité  $\eta$  en dynes, représente la force tangentielle rapportée à l'unité de surface ( $1 \text{ cm}^2$ ) de deux couches de liquide qui se déplacent en sens contraire avec une vitesse de  $1 \text{ cm/sec}$ . et ont les plans médians à  $1 \text{ cm}$  de distance.

Navier a considéré dans un fluide mouvant deux couches très proches ayant une surface commune  $S (\text{cm}^2)$ , à distance de  $a (\text{cm})$  et ayant deux vitesses différentes  $V$  et  $V'$ , avec  $V$  plus grand que  $V'$ .

La couche A (fig. 6) est retardée dans son mouvement par une force  $f$  et la couche A' est accélérée par une force  $-f$ .

Considérant " $a$ " de l'ordre de grandeur des distances moléculaires et la force proportionnelle à la surface  $S$  de frottement, on peut écrire :



$$(10) \quad f \text{ (dynes)} = \eta \times S \times \frac{V-V_a}{a}$$

La circulation des liquides dans les tubes capillaires dépend essentiellement de la viscosité, les lois de cette circulation étant établies par Poiseuille. Il s'est servi d'un tube capillaire attaché à un réservoir et il a mesuré sous l'influence de la pression P, la quantité de liquide qui s'écoule dans l'unité de temps, en fonction du rayon du tube et de la viscosité du liquide. L'expression obtenue a été :

$$(11) \quad Q = \frac{\eta r_t^2 P}{8 \eta l} \quad , \quad l \text{ est la longueur du tube}$$

La viscosité d'un liquide dépend de la température, ce qui a une très grande importance pour la migration capillaire dont nous nous occupons, qui varie par conséquent avec les saisons pour l'eau qui imbibes les matériaux de construction.

Voici un exemple, de la variation de  $\eta$  en fonction de la température (avec r et l exprimés en cm. Q (cm<sup>3</sup>/sec.), P (bares) dans le cas de l'eau :

|                 |       |       |        |        |        |
|-----------------|-------|-------|--------|--------|--------|
| t = 0°          | 20°   | 40°   | 60°    | 80°    | 100°   |
| $\eta = 0,0178$ | 0,010 | 0,065 | 0,0047 | 0,0036 | 0,0028 |

La variation de la viscosité peut être exprimée approximativement à l'aide de la formule empirique de Gratz (1888)

$$(12) \quad \eta = A \frac{c - t}{s - t}$$

où : A = constante  
s = température de solidification  
c = température critique de vaporisation totale.

Pour les suspensions de particules sphériques indéformables - comme dans le cas de l'eau qui s'infiltre du terrain dans les structures en transportant différentes particules en suspension, on peut appliquer pour le calcul de la viscosité de la solution, la formule d'Einstein qui donne la viscosité de l'eau liée :

$$(13) \quad \eta = \eta_0 (1 + 2,5 \phi)$$

où  $\eta_0$  est la viscosité de la phase liquide continue (eau libre)  
 $\phi$  est le volume des particules contenues dans l'unité de volume (1 cm<sup>3</sup>)

La filtration.

Dans les processus de filtration, le liquide respecte la loi de l'écoulement donnée par la formule de Poiseuille. Les lois

établies pour les phénomènes de filtration sont dues à J. Brunhes (1881). En dehors de la nature du liquide, la filtration est influencée aussi par la température (relation 12). Sous l'action d'une pression quelconque, tout fluide passe à travers un milieu poreux avec un débit donné par l'expression :

$$(14) \quad Q = \frac{k}{l} S \frac{P}{l}$$

déduite de la loi de Darcy (14') combinée avec la loi de Poiseuille, où :

V est la vitesse de filtration  
P est la pression  
S est la section de passage  
k est la perméabilité du milieu poreux  
 $\eta$  est la viscosité dynamique (en poises)  
l est la distance parcourue.  
Partant de la loi de Darcy

$$(14') \quad V = k i = k \frac{P}{l}$$

et de la loi de Poiseuille (11) à laquelle nous avons mis en évidence la vitesse du courant pour l'identifier avec celle de la formule de Darcy, on obtient l'expression du coefficient de perméabilité de (14).

$$\frac{Pr^2}{8\eta l} = k \frac{P}{l}$$

$$(14'') \quad k = \frac{l^2}{8\eta}$$

En prenant pour  $\eta = 0,01$  poises (eau) et appliquant la formule (14''), on obtient pour k les valeurs suivantes :

|           |                                   |
|-----------|-----------------------------------|
| sable fin | $k = 1,25 \times 10^{-3}$ cm/sec  |
| silt      | $k = 1,25 \times 10^{-5}$ cm/sec  |
| argile    | $k = 1,25 \times 10^{-7}$ cm/sec. |

et pour quelques matériaux de construction, on trouve d'après Scheidegger :

|                 |   |
|-----------------|---|
| grès            | $k = 5 \times 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-3}$ cm/sec     |
| pierre calcaire | $k = 2 \cdot 10^{-6} - 4 \cdot 10^{-5}$ cm/sec      |
| briques         | $k = 4,8 \cdot 10^{-6} - 2,2 \cdot 10^{-4}$ cm/sec. |

Ces valeurs ont été vérifiées expérimentalement du point de vue de l'ordre de grandeur par Tiftovici :

L'application de la formule (14) est limitée pour les nombres de Reynolds inférieurs à 1, ce qui correspond au cas du transfert de l'eau à travers le milieu poreux constitué par les



matériaux de construction.

Dans l'écoulement réel, le phénomène hydraulique est accompagné aussi d'effets secondaires, parmi lesquels l'effet électrocinétique nous intéresse tout particulièrement. Les valeurs du terme  $\eta$  de la relation (14), peuvent être calculées en fonction du problème avec (12) ou avec (13).

#### L'électroosmose et les phénomènes connexes.

L'effet électrocinétique est un phénomène spécifique à l'état colloïdal, aux suspensions, aux dispersions, etc., et est en fait, l'apparition d'une différence de potentiel entre la phase solide et la phase liquide, lorsque l'une d'elles se déplace par rapport à l'autre. La phase à perméabilité supérieure est chargée positivement à cause de l'absorption sélective des ions.

L'électroosmose est un phénomène électrocinétique qui dans le cas du problème du transfert de l'humidité dans les constructions constitue le problème lui-même, c'est-à-dire le déplacement d'un milieu liquide dans un milieu poreux, sous l'influence d'une différence de potentiel.

Le phénomène d'électroosmose a été découvert par F. F. Reuss en 1807 qui a obtenu sous l'influence d'une différence de potentiel un dénivellement du niveau de l'eau par une ascension au pôle négatif comme dans le schéma de la fig. 7. Ce phénomène a été étudié plus profondément par Widman (1852) et par Quincke (1861), les premières lois quantitatives étant formulées par Helmholtz (1879) et plus tard par Lambe, Smolukowski, Perrin, les recherches continuant de nos jours.

La formulation mathématique a été possible grâce à l'apparition de la théorie de la double couche électrique de Helmholtz, qui a beaucoup simplifié au moment de son apparition, la compréhension théorique du phénomène. Plus tard, comme on le verra plus loin, l'apparition de la théorie des micelles (1944) a permis de compléter la théorie de Helmholtz.

A l'interface solide-liquide il apparaît une différence de potentiel électrocinétique ( $\zeta$ ) due à l'apparition de la double couche électrique.

Les chercheurs ont trouvé des différences de potentiel électrique naturelles lors du contact :

- de deux solutions à concentrations différentes,
- de deux milieux dans lesquels les processus d'oxydation et de réduction prennent naissance d'eux-mêmes,
- de deux milieux à densités différentes (où le milieu plus dense devient électropositif),

- de zones à températures différentes pour le même milieu,
- de deux états différents d'aggrégation de la même substance (par exemple le graphite et le charbon),
- de deux roches dans des états métamorphiques différents (comme le calcaire et le marbre ou bien le calcaire et le mortier de chaux).

Ces potentiels apparaissent à cause des propriétés physiques et chimiques différentes des phases de contact.

Les molécules qui constituent un dipôle (dipolaires) sont représentées graphiquement comme dans la fig. 8. En général leur orientation par rapport aux différents milieux avec lesquels elles viennent en contact, est en fonction des propriétés physiques et chimiques de ceux-ci. Vu que nos préoccupations se réfèrent au transfert de l'humidité, dans la fig. 9 on représente la position de la molécule d'eau rapportée à des milieux différents.

Les groupes de molécules orientées se trouvent dans la littérature scientifique spécialisée sous le nom de micelles (fig. 10). C'est Mc. Bain (1944) qui a introduit la notion d'électrolytes colloïdaux ou de micelles. A l'état de micelle on découvre un écart important des propriétés électriques surtout des propriétés idéales (conductibilité, pression osmotique, tension de vapeurs). Mc. Bain a mis les propriétés de l'état micellaire par rapport à celles de l'état idéal sur le compte de la formation spontanée des associations des molécules et des ions en équilibre thermodynamique réversible avec le milieu environnant. Une micelle est considérée un macro-ion polyvalent qui contient 50-100 ions intimement liés et un nuage d'autres ions de signe contraire à ceux qui sont attachés à la micelle (fig. 10).

Dans le sol on rencontre très fréquemment des structures micellaires : la même situation est rencontrée dans la structure des matériaux poreux de construction, les deux se trouvant pénétrées par l'eau à cause des phénomènes d'humidification qui se produisent.

Dans les figures 11, 12 et 13 on représente la structure micellaire du complexe d'absorption sur une particule d'argile ainsi que le schéma chimique détaillé (12) et (13) pour le complexe non-hydraté et hydraté; le transfert de l'eau capillaire dans les constructions, véhicule de telles structures. Des deux théories sur les micelles, celle de Hartley qui admet la forme sphérique et celle de Mc. Brain qui montre l'existence de plusieurs types de forme (lamellaire, cylindrique, sphérique), il paraît, que pour des raisons de simplification des calculs, la première théorie est plus commode. Dans la fig. 14, on représente la structure électrique d'une particule migratrice électrisée et humectée; elle peut être une micelle, entre la surface de la particule et la pellicule

## PRINCIPE de L'ELECTROOSMOSE

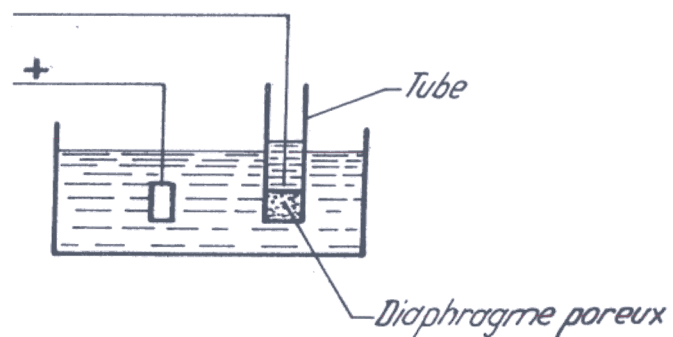
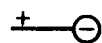
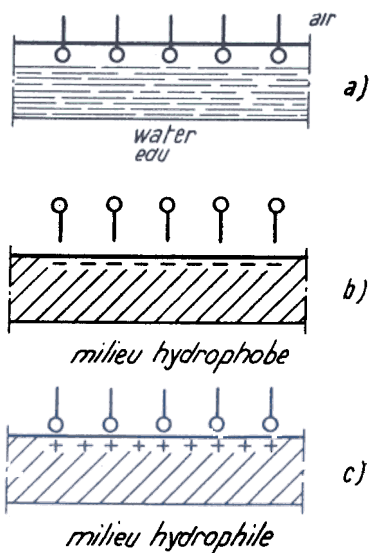


Fig. 7



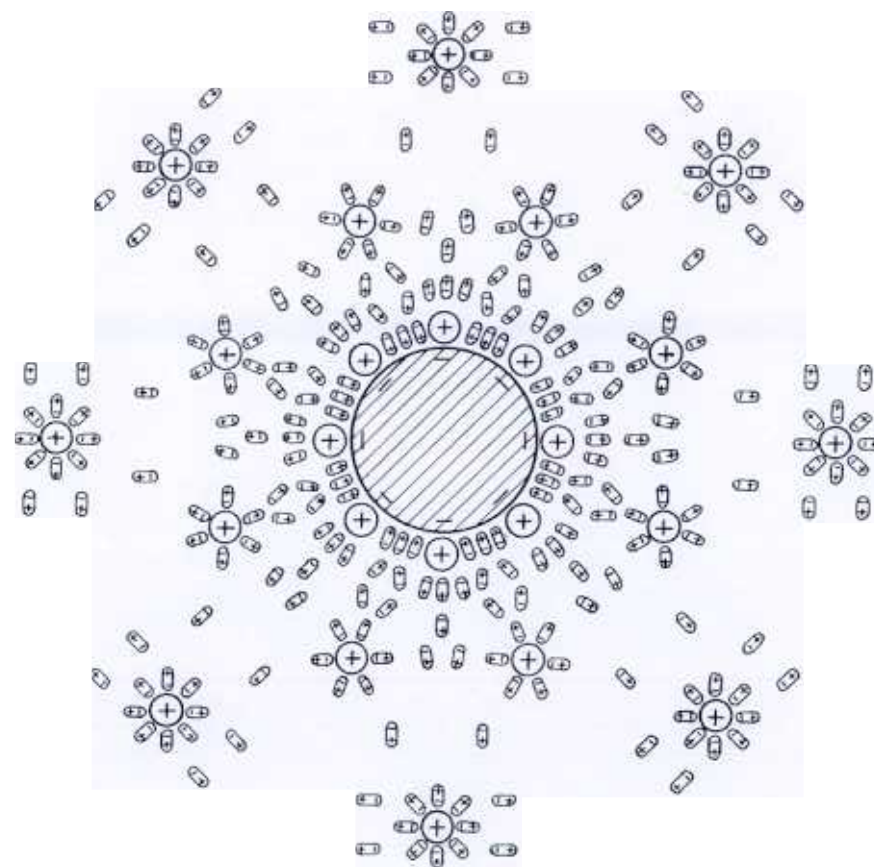
The bipolar molecule diagram Le diagramme d'une molécule bipolaire

Fig. 8



L'orientation de la molécule bipolaire d'eau par rapport à différents milieux.

Fig. 9



The adsorption complex of a clay particle. (after S. Andrei).

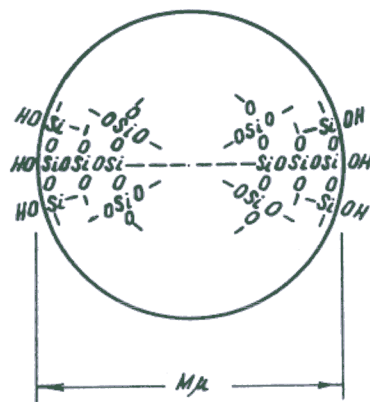
Le complexe d'absorption d'une particule d'argile (d'après S. Andrei)

Fig. 11



The mycelium structure of  $H_2SiO_3$   
La structure en micelle de  $H_2SiO_3$

Fig. 12



The mycelium structure of  $SiO_3H^-$   
La structure en micelle de  $SiO_3H^-$

Fig. 13

d'eau absorbée par celle-ci, apparaissant une différence de potentiel.

$\zeta = \varphi_2 - \varphi_1$  (la signification des termes est donnée dans la figure respective).

De cette manière, à la séparation des deux phases se forme la double couche électrique de Helmholtz que nous connaissons. L'épaisseur de la double couche est d'environ 100 Å (10 mμ); elle n'est pas constante et dépend de la concentration de l'électrolyte.

La couche théorique double, d'épaisseur monomoléculaire est entourée d'une zone diffuse de dipôles orientés, dont la position moyenne varie d'après une loi exponentielle.

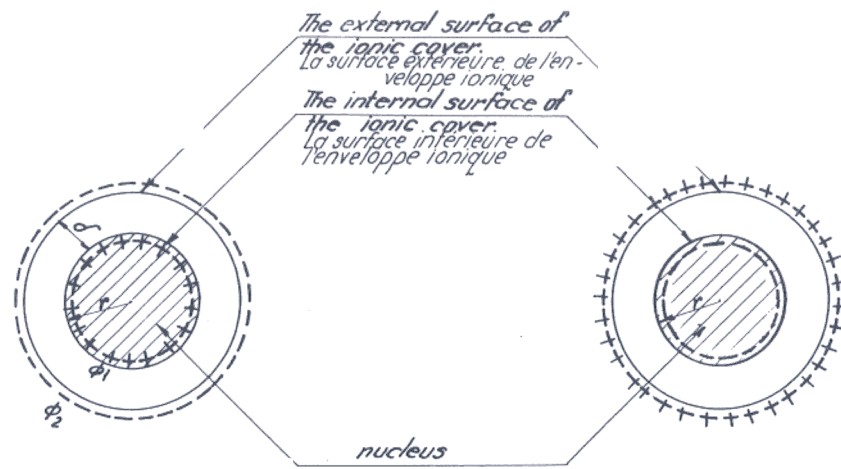
Dans les figures 9-12 on peut surprendre la formation de ces doubles couches électriques, l'orientation des dipôles sur la surface de certaines microparticules constituant la première phase de formation de la couche, tandis que le nuage de dipôles de la périphérie de la micelle constitue la zone diffuse de la micelle et de la double couche électrique.

La différence de potentiel électrique créée entre la double couche (fixée sur l'une des phases, solide en général) et les molécules mobiles, est le potentiel électrocinétique  $\zeta$  (qui ne dépasse pas en général 0,1 V) (fig. 14-15). La majorité des corps solides se charge généralement négativement par rapport à l'eau, le potentiel électrocinétique se trouvant entre 0,03 et 0,06 V; d'autre part, la présence des ions dans la phase liquide influence la valeur du potentiel électrocinétique, ce qui est justement le cas de l'eau transférée du terrain dans la structure qui dissout les différents sels solubles qu'elle rencontre (fig. 16).

Les corps poreux se chargent positivement dans les solutions acides et négativement dans les solutions alcalines à cause de l'absorption d'ions positifs dans le cas de l'acidité (ions d'hydrogène) et d'ions négatifs dans le cas de l'alcalinité (ions hydroxyles).

Le phénomène d'électrocapillarité a été découvert en 1873 par Gabriel Lippman et à son appui on a construit l'électromètre de zéro, l'électromètre capillaire. L'effet Lippman réside dans le déplacement d'un fluide dans un tube capillaire sous l'influence d'une différence de potentiel d'une source extérieure appliquée aux extrémités du tube.

Soit un tube capillaire de la longueur  $l$  et une différence de potentiel  $E$  appliquée à ses extrémités, le liquide se déplace avec la vitesse  $u$  constante (fig. 15). Le tube en cause peut être aussi un tracé capillaire dans un matériau de construction poreux.



Positive particle  
Particule positive

Negative particle  
Particule négative

$\phi_1$  = the electric potential to the particle surface.  
le potentiel électrique à la surface de la particule

$\phi_2$  = the electric potential to the liquid surface.  
le potentiel électrique à la surface du liquide

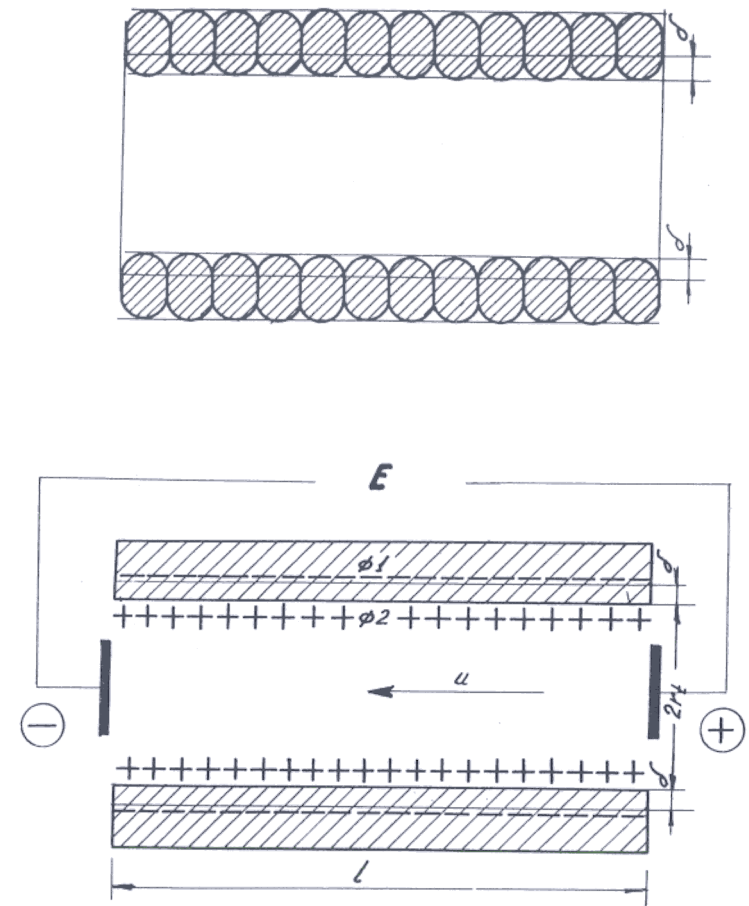
$e$  = the electric load of the particle.  
la charge électrique de la particule

$\delta$  = the depth of the ionic cover.  
l'épaisseur de l'enveloppe ionique

$\epsilon$  = the dielectric constant of the liquid.  
la constante diélectrique du liquide

$\phi_2 - \phi_1 = \Delta\phi = \pm \frac{e\delta}{\epsilon r^2} = \varphi$  electrokinetic potential  
le potentiel électrocinétique  
of the particle.  
de la particule

Fig. 14



$$\phi_2 - \phi_1 = \Delta\phi \quad \frac{2e}{\epsilon} \cdot \frac{\delta}{r^2 l} = \varphi$$

Fig. 15

Par le fait que la force de frottement du liquide du tube est égale à la force électrique, les deux peuvent être égalées:

$$(15) \quad \frac{q}{l} = \delta S$$

$q$  est la charge électrique par unité de surface  
 $l$  est la distance entre les électrodes appliqués aux extrémités du tube  
 $\delta$  est l'épaisseur du liquide absorbé  
 $S$  est la section du capillaire.

Soit  $\zeta$  le potentiel électrocinétique donné par la relation:

$$(16) \quad \frac{4 \pi \epsilon q}{\lambda}$$

où  $\epsilon$  est la permittivité du liquide.

En éliminant  $q$  de (15) et de (16), on obtient le débit du tube capillaire.

$$(17) \quad Q = 4 \pi$$

Le débit  $Q$  peut être exprimé en fonction de l'intensité du courant aussi, en tirant  $E$  de la loi d'Ohm.

$$(18) \quad Q = \frac{1}{4 \pi} \frac{\epsilon \zeta}{\eta \lambda} E$$

où  $\lambda$  est la conductivité du liquide.

Egalant l'expression (18) avec le débit donné par la loi de Poiseuille (11), on peut établir la pression due à l'électroosmose (formule de Helmholtz):

$$(19) \quad P$$

Les phénomènes électroosmotiques peuvent être exprimés mathématiquement en partant aussi de la particule migratrice, en la considérant comme un condensateur sphérique ayant une capacité

$$(20) \quad = 4 \pi \epsilon$$

Conformément à la définition de la capacité

$$(21) \quad q_1 \quad (q_1 = \text{quantité d'électricité correspondant à une particule})$$

$$(22) \quad q_1 \quad V \text{ (dans le système international) mais}$$

$$(23) \quad q_1 = \frac{\epsilon \cdot r \text{ (cm)}}{300} V$$

$$1 V = 300 \text{ e.s.C.G.S. ; } 1 V = \frac{1}{300} \text{ st.}$$

En appliquant la loi du mouvement à grand frottement dans un milieu à densité importante, la vitesse de la migration électroosmotique à travers un tube capillaire au rayon  $r$ , sous l'action d'une différence de potentiel de 1 V/cm c.à.d. la vitesse d'une particule sphérique de rayon  $r$  déplaçant une charge effective  $q_1$  est :

$$(24) \quad \frac{q_1}{300 \cdot 6 \pi \eta r} \frac{\text{cm/sec}}{v/\text{cm}}$$

(fig. 14) Par analogie avec (23), la charge  $q_1$  peut être écrite

$$(25) \quad q_1 =$$

Ainsi (24) devient

$$(26) \quad u = \frac{q_1}{2}$$

Dans le cas dont nous nous occupons, la phase liquide qui se déplace d'elle-même, est la solution d'électrolyte représentée par l'eau du sol qui part du sol vers et à travers la construction.

La pression électroosmotique calculée plus haut (18) peut encore être établie par un autre moyen. Le débit drainé dans l'unité de temps, conformément à la loi de Poiseuille (11), est égalé au débit drainé par de la différence de potentiel  $E$

$$(27) \quad Q = \pi r_t^2 u E = \frac{t}{300^2 \cdot 6 \eta} E$$

Il en résulte une pression électroosmotique

$$(28) \quad \frac{4 l \zeta}{300^2} \frac{E}{\eta} = 4,7 \times 10^{-6} l \quad \text{c.E}$$

A partir des expressions (11) et (28) on peut déterminer la hauteur de l'ascension électroosmotique en écrivant  $l = h_{el os}$

$$(29) \quad \frac{\pi r_t^2 P}{\eta l Q} \text{ ou plus pratiquement}$$



$$(30) \quad h_{el. os.} = \frac{2,1 \times 10^5 P}{\zeta \varepsilon E}$$

En observant que dans une construction la hauteur jusqu'à laquelle peut s'élever l'humidité se compose de la hauteur due à la capillarité et de celle due à l'électroosmose, on peut écrire :

$$(31) \quad h_{total} = h_{capillaire} + h_{el. os.}$$

Nous fixerons plus bas une expression de la hauteur électroosmotique dépendant seulement des paramètres physiques du phénomène

$$(32) \quad h_{el. os.} = h_{total} - h_{capillaire} = \frac{\pi r_t^2 P}{8\eta l Q} \text{ ou } \frac{2,1 \times 10^5 P}{\zeta \varepsilon E}$$

En faisant passer sous pression un liquide à faible conductivité par un diaphragme ou par un tube capillaire, il apparaît aux extrémités de ce tube une différence de potentiel nommée potentiel d'écoulement qui est due à la rupture de la partie diffuse de la double couche électrique qui de la sorte est entraînée dans le mouvement. Ce phénomène est l'inverse de l'électroosmose et doit être surveillé dans sa réalisation car il permet l'élimination de l'humidité des milieux poreux.

L'intensité du courant qui se crée et qui s'oppose au déplacement de l'électricité est :

$$(33) \quad P = E \frac{\pi r_t^2}{\varepsilon l}$$

La quantité d'électricité qui passe dans l'unité de temps (1 sec) à travers le courant liquide, peut être exprimée par l'intermédiaire de l'intensité I et de la différence de pression P (qui provoque l'écoulement), d'où il résulte aussi la différence de potentiel.

$$(34) \quad E = \frac{\zeta P \varepsilon}{4 \pi \eta \lambda}$$

$\lambda$  est la conductivité électrique spécifique de l'eau

La relation entre l'intensité et la tension du courant électroosmotique qui doit être appliqué avec le sens opposé afin de provoquer un potentiel d'écoulement, est déduite comme il suit :

P de (32) est introduit dans (34) après quoi on met en évidence  $h_{el. os.}$

$$(35) \quad h_{el. os.} = \frac{8,4 \pi \eta \lambda \times 10^5}{\zeta^2 \varepsilon^2}$$

La formule de l'électroosmose établie par Helmholtz ne peut pas être appliquée brutalement, car la viscosité, la constante diélectrique et le potentiel  $\zeta$  soulève certains problèmes dans le cas de la migration de l'humidité dans le sol et les constructions.

Ainsi la viscosité  $\eta$  se réfère à l'eau liée et non à celle libre comme il apparaît dans la formule, à cause de l'attraction moléculaire exercée par les parois du capillaire. Par conséquent on doit introduire la viscosité donnée par la formule d'Einstein (13) Nous reviendrons plus loin sur ces phénomènes.

En ce qui concerne la constante diélectrique, P. Andrianov a obtenu pour l'eau étroitement liée, la valeur 2.

Le potentiel électrocinétique  $\zeta$  peut varier même pendant le temps du processus de migration électroosmotique parce qu'il peut apparaître un changement de la composition du complexe d'absorption et de la concentration d'ions de l'eau libre.

Certains chercheurs comme Rjanitin, Réménieras, Schaad et Haefeli ont proposé des formules améliorées; elles portent en particulier sur les sols, mais étant donné l'étroite ressemblance aux problèmes des structures elles peuvent être appliquées à ces dernières.

Rjanitfn met en évidence dans la formule de Holmholtz (17) la résistivité et l'intensité du courant

$$(36) \quad Q = \frac{\zeta I \rho \varepsilon}{4 \pi \eta} = \frac{\zeta I \rho}{K} \text{ avec } K = \frac{4 \pi \eta}{\varepsilon}$$

: la résistivité est mesuré en  $\Omega \times \text{cm}$

: est mesuré en millivolts

: est mesuré en  $\text{cm}^3/\text{minutes}$

: est mesuré en ampères

pour  $\eta = 0,01$  poise et  $\varepsilon = 81$  il résulte  $K = 2355$ .

Réménieras met en évidence la densité du courant (j) et la section du tube (S).

$$(37) \quad Q = \frac{\zeta \varepsilon \rho}{4 \pi \eta} J.S.$$

Schaad et Haefeli reprennent la formule sous la forme donnée par Darcy :

$$(38) \quad U = K \Phi$$

mettant en évidence le coefficient de perméabilité électroosmotique.

$$(K_c = \frac{r_e}{4\pi\eta} \text{ (cm}^2/\text{s, V) et la gradient électrique}$$

$$(\psi = \frac{E}{e} \text{ (V/cm)})$$

N.P. Gorbunov a établi la valeur du coefficient de perméabilité électroosmotique pour les sols, tandis que O.M. Fridman les donne pour certains matériaux de construction.

Nous citons les valeurs suivantes

|   |   |
|---|---|
| - sable   | 1,0 x 10 <sup>-5</sup> cm <sup>2</sup> /s.V         |
| - silt argileux (1)   | 8,56 x 10 <sup>-5</sup> cm <sup>2</sup> /s.V        |
| - silt argileux (2)   | 9,60 x 10 <sup>-5</sup> cm <sup>2</sup> /s.V        |
| - argile très meuble  | 10,34 x 10 <sup>-5</sup> cm <sup>2</sup> /s.V       |
| - argile limoneuse  | 19,46 x 10 <sup>-5</sup> cm <sup>2</sup> /s.V       |
| - brique rouge  | 0,28 - 1,29 x 10 <sup>-5</sup> cm <sup>2</sup> /s.V |
| - brique silico-calcaire  | 0,13 - 0,45 x 10 <sup>-5</sup> cm <sup>2</sup> /s.V |
| - mortier de chaux  | 0,08 - 0,28 x 10 <sup>-5</sup> cm <sup>2</sup> /s.V |
| - mortier de chaux et ciment  | 0   |
| - mortier d'argile et ciment  | 1,04 - 1,36 x 10 <sup>-5</sup> cm <sup>2</sup> /s.V |
| - mortier d'argile, ciment et chaux                                 | 1,68 - 1,99 x 10 <sup>-5</sup> cm <sup>2</sup> /s.V |
| - mortier d'argile, ciment et solution de sulfate de cuivre hydraté | 2,53 - 2,65 x 10 <sup>-5</sup> cm <sup>2</sup> /s.V |

Utilisant les équations de Schaad et Haefeli, les expressions établies plus haut peuvent être transformées :

$$(34') \quad E = K_c \frac{P}{\lambda}$$

$$(36') \quad Q_e = K_e I^0$$

$$(17') \quad O_c = \frac{S E}{l} K_e$$

( $l$  est la longueur du tube capillaire aux extrémités duquel on applique la différence de potentiel  $E$ )

$$(19') \quad P = K_e \frac{8 E \pi \eta}{S}$$

Si dans (32) on remplace  $P$  avec (19') on obtient

$$(39) \quad h_{el.os} = \frac{2 E}{S}$$

Les essais faits dans le cas des sols pour la vérification de la formule de l'électroosmose appartenant à Helmholtz (Cassagrande et Bernatzik) ont prouvé qu'il existe un rapprochement satisfaisant entre la théorie et la pratique.

Si l'on considère une maçonnerie ayant les caractéristiques

$$K = \frac{0,7 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s.V}}{\frac{E}{l} = 1}$$

il en résulte une vitesse de drainage  $u = 5 \times 10^{-5} \text{ cm/sec.}$

La pression électroosmotique qui correspond à cette situation est de 0,02 kg/cm<sup>2</sup> dans le cas d'une maçonnerie au coefficient de perméabilité 10<sup>-5</sup> cm/sec.

Dans le tableau 2 nous reproduisons d'après O.M. Fridman les caractéristiques de certains matériaux de construction, déterminées par cet auteur.

Tableau 2.  $\lambda = \frac{1}{\pi}$

| Matériau   | Absorption d'eau % | Porosité %    | Rayon moyen des pores cm x 10 <sup>-5</sup> | $K_f$ cm/sec x 10 <sup>-5</sup> | $K_e$ cm <sup>2</sup> /sec.V x 10 <sup>-5</sup> | $\frac{1}{cm} \times \frac{K_e}{K_f}$ | $\frac{K_e}{K_f}$ cm/V |
|--|--------------------|---------------|---|---------------------------------|---|---------------------------------------|------------------------|
| 1. brique rouge  | 0,25-22            | 20,6<br>38,7  | 5,95-<br>10,4                               | 0,48-<br>1,49                   | 0,28-<br>1,29                                   | 0,29-<br>0,83                         | 0,39-<br>1,84          |
| 2. brique silico-calcaire  | 11-18              | 21,0-<br>34,8 | 1,82<br>4,49                                | 0,029-<br>0,10                  | 0,13-<br>0,45                                   | 0,32-<br>0,66                         | 2,40-<br>5,00          |
| 3. mortier de chaux  | 11-20              | 18,3-<br>35   | 10,2-<br>15,5                               | 1,34-<br>1,85                   | 0,08-<br>0,28                                   | 0,09-<br>0,23                         | 0,04-<br>0,18          |
| 4. mortier de chaux et ciment  | 9,5-19             | 18,5-<br>28,3 | 3,89-<br>5,32                               | 0,12-<br>0,31                   | 0   | 0                                     | 0                      |
| 5. mortier d'argile et ciment  | 29,4-<br>35,4      | 41,5<br>44,2  | 2,52-<br>3,07                               | 0,12-<br>0,17                   | 1,04-<br>1,36                                   | 0,90-<br>1,77                         | 7,0-<br>9,9            |
| 6. mortier d'argile ciment et chaux                                  | 35,6-<br>38,0      | 46,4-<br>48,0 | 3,45-<br>4,05                               | 0,23-<br>0,32                   | 1,68-<br>1,99                                   | 1,64-<br>2,06                         | 6,25-<br>7,3           |
| 7. mortier d'argile, ciment et solution de sulfate de cuivre hydraté | 31,7-<br>40,0      | 45,0-<br>49,5 | 2,87-<br>3,66                               | 0,17-<br>0,26                   | 2,53-<br>2,65                                   | 3,72-<br>4,30                         | 10,2-<br>14            |
| 8. maçonnerie exécutée en briques rouges et mortier de chaux         | 9,6-<br>21,5       | 20,0-<br>38,0 | 5,95-<br>10,9                               | 0,66-<br>1,57                   | 0,24-<br>1,08                                   | 21-<br>70                             | 0,32-<br>1             |



En dehors de l'observation faite plus haut (31) concernant le cumul de l'effet de l'ascension capillaire et de l'effet électroosmotique, Schaad et Haefeli ont essayé eux aussi le cumul de l'effet de déplacement électroosmotique et celui qui est dû à la pression de l'eau du sol.

Ils ont défini une vitesse totale de migration ( $U_{tot}$ )

$$(40) U_{tot} = \frac{\alpha^2}{32\eta} \left( \frac{p}{l} + \frac{\rho \epsilon}{4\pi\eta} \right) \quad j = k_i + k_e \quad \epsilon = k(i + h_e)$$

avec  $h_e = \frac{K_e}{K}$  (la hauteur spécifique de charge électroosmotique).

Dans le paragraphe suivant nous présentons en détail notre conception sur la migration électroosmotique de l'humidité dans les constructions.

#### 4. Mécanisme moléculaire de la migration électroosmotique.

Dans un tube capillaire (fig. 16) les molécules dipolaires d'eau s'orientent par rapport à la paroi en fonction du signe de la charge électrique de celle-ci. Il se forme la double couche électrique qui est une enveloppe de potentiel qui entoure le liquide du tube (fig. 16).

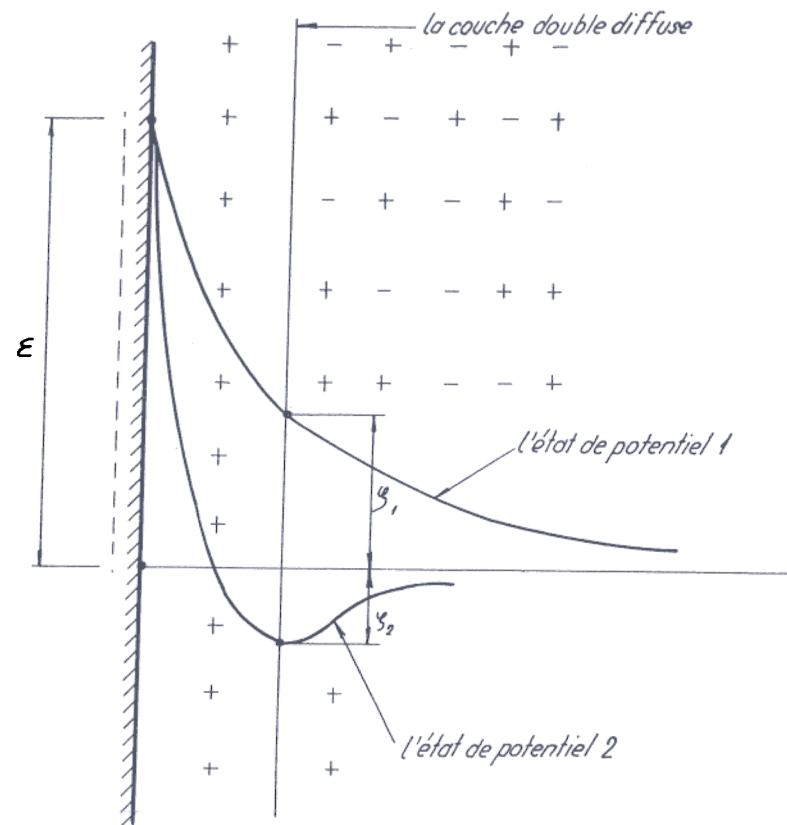
Dans la plupart des cas, la construction est chargée positivement et le sol négativement, existant entre eux une différence de potentiel qui d'après différents auteurs - varie de quelques dizaines à quelques centaines de millivolts (fig. 18).

Cela ne signifie nullement qu'un autre genre de chargement électrique ne soit possible.

A l'occasion de l'ascension capillaire de l'humidité du sol due à polarité bien définie, des particules et des ions de signe contraire sont entraînés (dans le cas de la fig. 17, ils sont négatifs).

Le transport capillaire de ces ions et particules électrisées bien définies, crée un courant électrique et par conséquent une différence de potentiel entre la construction et le terrain, qui - en tant qu'effet de deuxième ordre - produit un supplément d'ascension capillaire dû à l'électroosmose (fig. 19a).

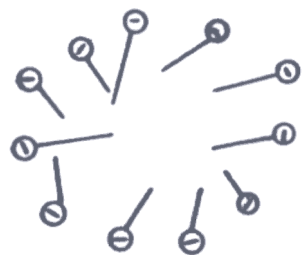
Si on réussissait à inverser la polarité de la construction - ce qui se réalise dans le cas de l'électrodrainage passif - c.à.d. rendre la paroi électro-négative (fig. 19b), les molécules dipolaires d'eau inverseraient elles-mêmes leur polarité, se dirigeant avec le pôle négatif vers l'intérieur du tube capillaire. De



$E$  = le potentiel total de Nernst

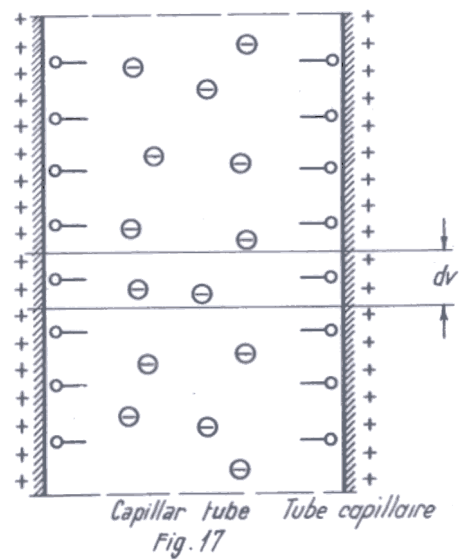
$\zeta$  = le potentiel électrocinétique (la différence de potentiel entre l'eau étroitement liée et la couche mobile d'eau)

Fig. 16

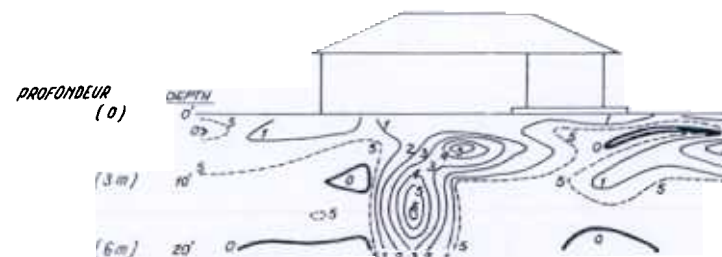


*micelle sphérique*

*Fig. 10*



*Moisture content percentage  
Le contenu en humidité (%)*



*Electro-potentials in  $-10^2$  mV  
Potentiels électriques en  $-10^{-2}$  mV*

*(after Van den Heever)  
(d'après Van den Heever)*

*Fig. 18*

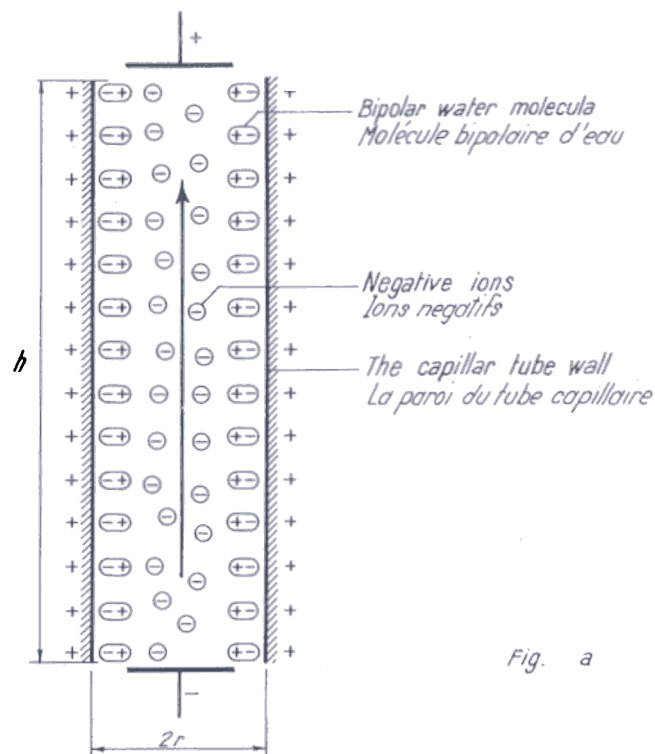


Fig. a

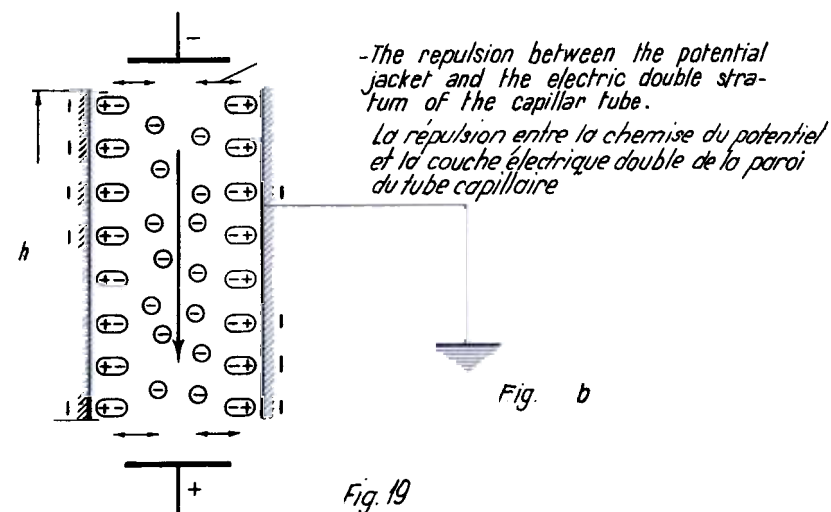


Fig. b

Fig. 19

cette manière, il se produit une répulsion électrostatique entre l'enveloppe de potentiel - c'est-à-dire entre la double couche électrique à polarité inversée - et les particules et les ions négatifs du tube. Il se produit ainsi un courant électrique de signe contraire qui rejette l'humidité du tube (du milieu poreux, de la construction). Dans le cas de l'élimination capillaire le processus est accéléré aussi par l'effet de gravité qui stimule le retrait de l'humidité par son poids propre, parce que par création de la répulsion, l'effet de la tension superficielle qui a provoqué l'ascension et qui est toujours de nature électrique, a été anéanti.

Le phénomène réel ainsi qu'il a été décrit plus haut est seulement schématisé. En réalité il est plus complexe, comme on le verra dans la description qui suit.

On considérera cette fois la construction électronégative - cas pouvant apparaître dans la pratique - l'orientation des molécules bipolaires d'eau pouvant être observée dans la fig. 20.

D'après son état de liaison l'eau peut se présenter sous trois types, en fonction de la distance par rapport à la particule solide ou à la paroi capillaire électrisée (fig. 21) :

- l'eau étroitement liée qui est peu conductrice,
- l'eau faiblement liée (plus ou moins étroitement liée), qui avec l'eau étroitement liée, constitue l'eau liée dont l'épaisseur de la couche est inférieure à  $0,5\mu$ . L'eau faiblement liée est bonne conductrice d'électricité,
- l'eau libre est celle qui influence la résistivité du milieu poreux, la résistivité diminuant linéairement avec l'accroissement de l'humidité.

L'eau étroitement liée ne peut être jamais éliminée, de même, d'ailleurs que l'eau hygroscopique. L'eau libre et l'eau faiblement liée participent seules à la propagation du courant électrique dans la construction et le sol.

Dans la fig. 20 on représente une moitié de tube capillaire avec la délimitation des trois types d'eau. Dans le cas de la structure micellaire représentée dans la fig. 11, les micelles électropositives entourées d'un nuage polarisé diffus sont entraînées dans les zones respectives.

Par l'inversion de la polarité de la construction (la paroi capillaire) (fig. 22), il se produit, au niveau de l'eau étroitement liée une répulsion électrostatique entre la paroi électropositive et la double couche provenant de l'eau étroitement liée d'une part et d'autre part du nuage des plus proches micelles, nuage qui a des molécules dirigées vers la périphérie toujours avec le pôle positif. Cette zone de pression accrue qui se forme au voisinage de la paroi, cumulée avec la composante gravitationnelle, élimine l'humidité (l'eau libre) qui se retire par la descente de l'eau. Celui-ci

# CONSTRUCTION CHARGÉE NÉGATIF

## ELECTRONEGATIVELY CHARGED BUILDING

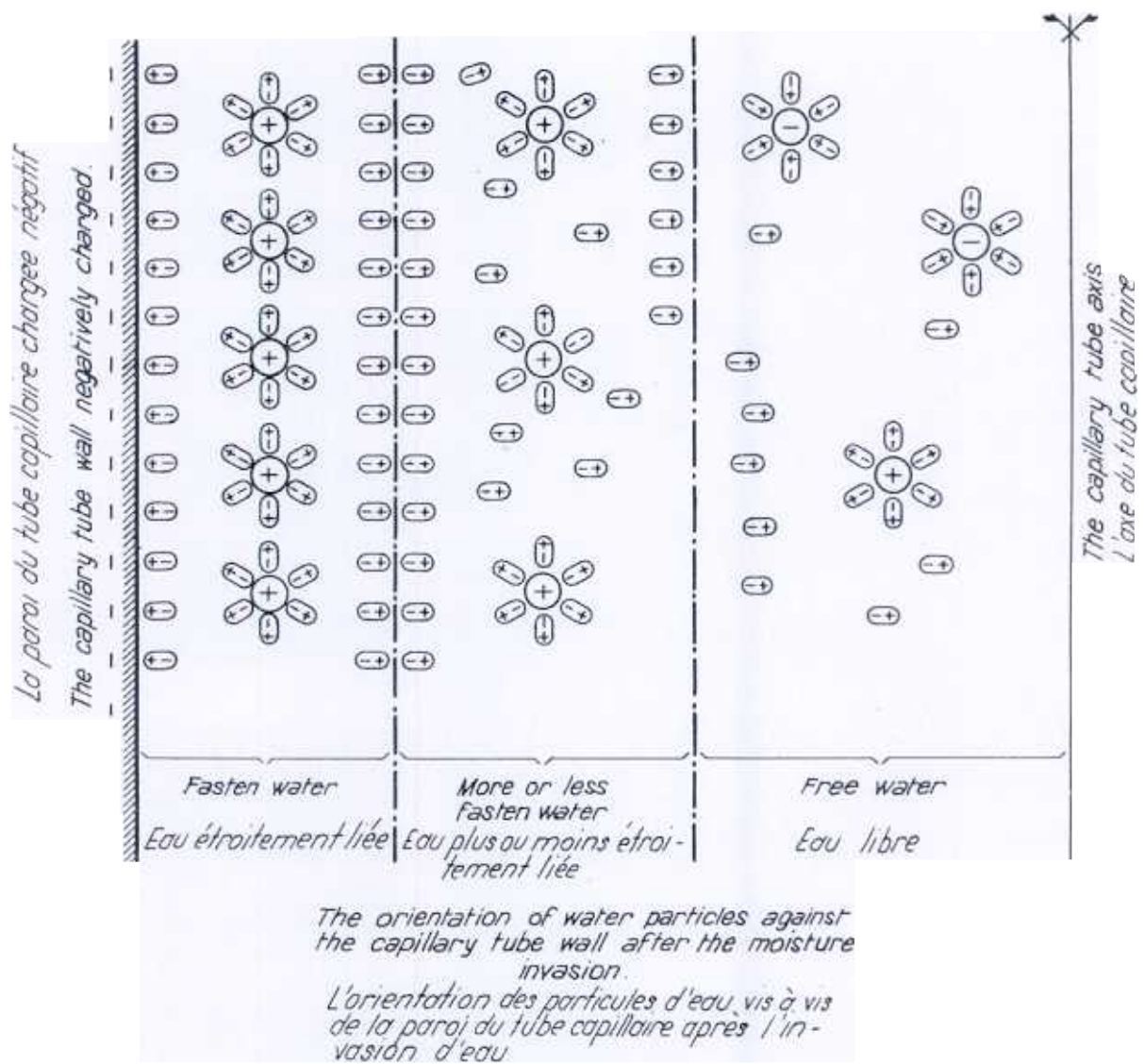


Fig. 20

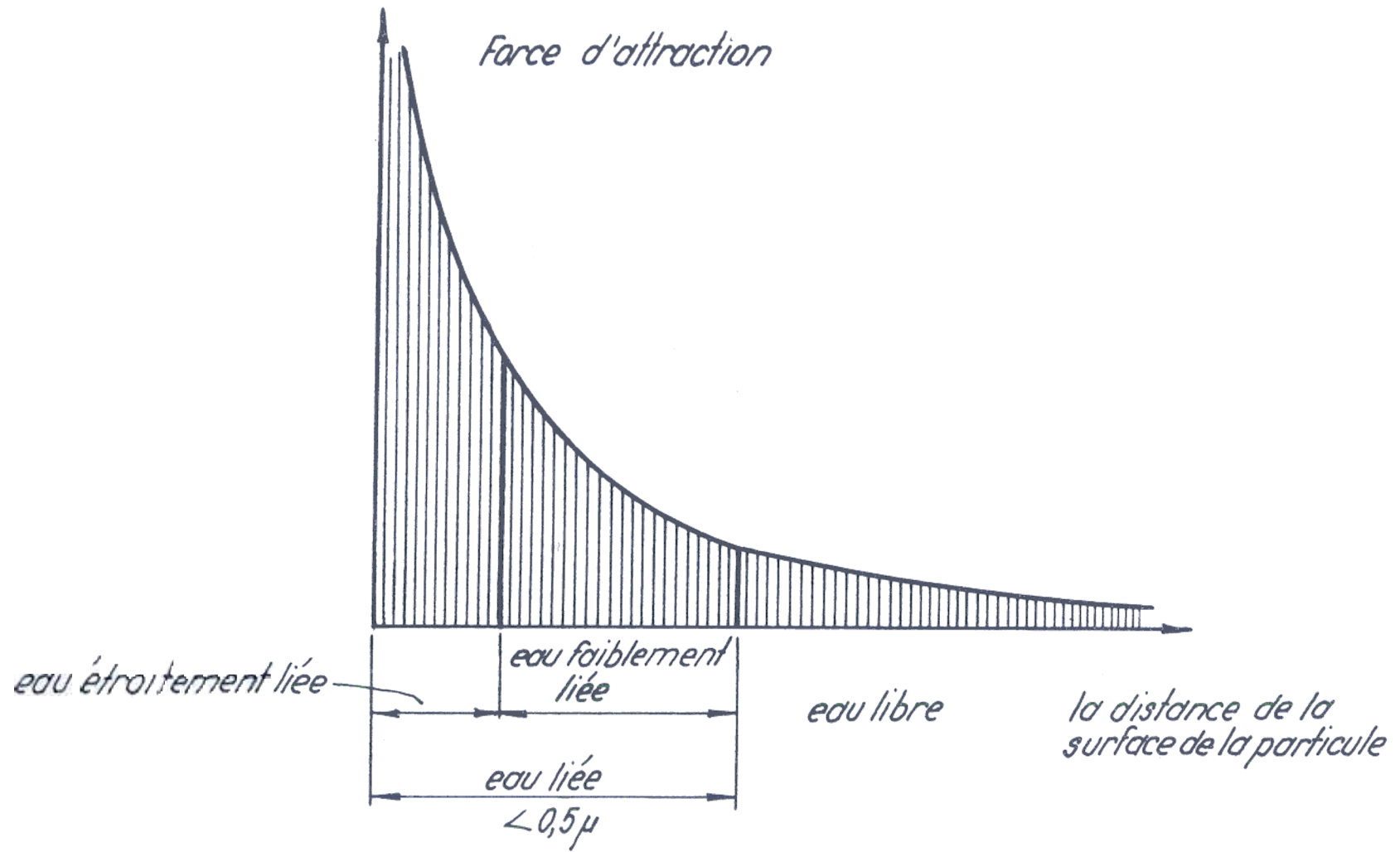


Fig. 21



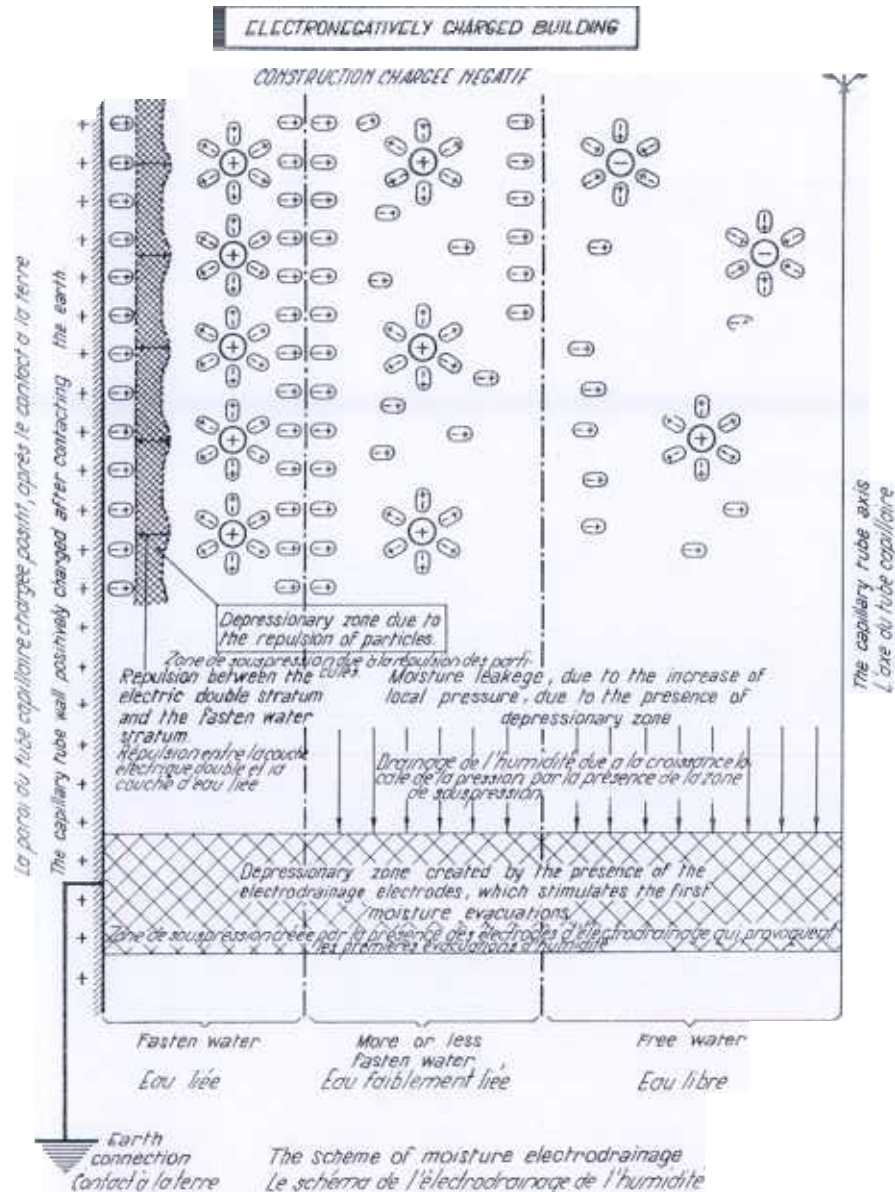


Fig. 22

est le mécanisme spécifique à l'élimination de l'eau qui a envahi la construction par ascension capillaire. Dans les chapitres suivants traitant de l'électrodrainage, on montrera le moyen de réaliser pratiquement et de calculer les installations.

Vu que les phénomènes qui accompagnent la migration de l'humidité ne sont pas seulement d'ordre électrique ou capillaire mais le plus souvent également d'ordre thermique, englober le phénomène entier dans des formules mathématiques est chose bien difficile.

Drainage du potentiel électroosmotique formé par l'ascension capillaire.

Un certain nombre de chercheurs ont montré qu'entre le terrain environnant et le bâtiment, intervient une différence naturelle de potentiel électrique, avec une polarité bien définie.

Ainsi, on a constaté que les matériaux céramiques de construction, (brique, matériaux argileux et même les éléments en béton) ont par rapport à l'eau, un potentiel négatif, la couche électrique double et celle de la diffusion de l'eau, en contact avec ces matériaux étant orientés avec le pôle positif vers l'intérieur du tube capillaire (fig. 19 a).

En général, la surface de contact peut être électro-négative, électropositive ou neutre en fonction de la structure du réseau cristallin de la phase solide et de la composition chimique de la phase liquide.

Si dans le cas des bâtiments la situation est telle qu'on l'a montré plus haut, on peut conclure que dans la majorité des cas ils jouent le rôle du pôle positif.

Les mesures effectuées directement sur les bâtiments, ont conduit aux observations suivantes :

- à des côtes égales, les zones humides ont un potentiel plus élevé
- les fondations ont un potentiel plus élevé que les murs des bâtiments sains (situation explicable comme on le verra dans ce qui suit);
- au niveau du terrain, entre la paroi et la terre, la différence de potentiel est d'environ 250 m V ;
- le mouvement principal de l'humidité se produit à travers le mortier des joints.

Ce résultat remarquable conduit à la conclusion que les bâtiments en pierre compacte, présentant de l'humidité, peuvent aussi être électrodrainés, car la pénétration de l'humidité est intervenue par les joints en mortier et par conséquent son élimination peut suivre la même voie.

Le brevet Suisse d'Ernst, qui a élaboré un procédé pratique pour l'élimination de l'humidité, par la mise à terre du bâtiment par les joints, a eu pour base ces observations; cette méthode a donné des résultats excellents. Ce procédé basé sur l'inversion de la polarité électrique, a été défini assez improprement, à notre avis, "système d'élimination de l'humidité par l'électro-osmose".

Nous avons expliqué plus haut la formation du potentiel électroosmotique et donné les principes de son anihilation.

Par nos recherches de laboratoire et sur des bâtiments réels, on a pu établir une série de conclusions concernant la migration ascensionnelle de l'humidité.

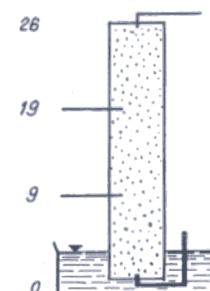
Ainsi, par l'immersion dans l'eau d'une brique provenant de monuments historiques (fig. 23), on a pu établir la forme générale de variation de la tension électrique par rapport au niveau de l'eau.

On a constaté ainsi que le potentiel a la valeur la plus élevée dans le quart supérieur de la brique, et reste pratiquement constant dans cette zone, l'agrandissement du potentiel jusqu'à cette zone étant très réduit. Nous attribuons ce résultat à l'entraînement des ions libres du terrain, surtout dans la zone supérieure de l'élément poreux à structure capillaire. La pratique a démontré sous une autre forme cette situation.

On observe en général dans les constructions envahies par l'humidité, que les efflorescences paraissent toujours à la limite supérieure de la zone envahie. Ces efflorescences ne sont en réalité que des recristallisations des sels dissouts par l'eau entraînée dans les constructions et se trouvent surtout dans cette zone à cause de la concentration des ions, ici maximum. Cette forme de variation (fig. 24) a été constatée par nous à l'occasion des recherches faites sur la migration de la sève dans les plantes, avec l'observation que la variation est fortement atténuée (fig. 24 pointillé), fait qui s'explique par le métabolisme de la plante, où les processus électro-chimiques sont distribués quasi-uniformément dans la zone des ramifications. Une autre observation intéressante basée sur les mesures enregistrées (fig. 21), est que les variations de densité, conductibilité, etc., sont facilement détectées par d'importantes variations du potentiel électrique. Ainsi les courbes 1 et 2 qui représentent la variation du potentiel sur deux lignes suffisamment distancées entre elles, sur la face large et étroite de la brique, montrent, par la présence, avec approximation, dans les mêmes zones, des variations du potentiel, que les défauts intérieurs de la brique, peuvent être mis en évidence, et qu'il ne s'agit pas d'une coïncidence, car dans un bloc de dimensions aussi réduites qu'une brique, le défaut peut varier assez faiblement dans le volume respectif.

# THE ELECTRIC POTENTIAL OF A BRICK MOISTENED BY CAPILLAR ASCENSION

## LE POTENTIEL ELECTRIQUE d'une BRIQUE HUMIDIFIÉE par ASCENSION CAPILLAIRE



| SAMPLES |      |      |
|---------|------|------|
| LEVEL   | 1    | 2    |
| 1       | 0,8  | 0,8  |
| 2       | 0,75 | 1,05 |
| 3       | 0,75 | 1,00 |
| 4       | 0,75 | 0,90 |
| 5       | 0,75 | 0,90 |
| 6       | 0,75 | 0,90 |
| 7       | 0,78 | 0,90 |
| 8       | 0,72 | 1,10 |
| 9       | 0,72 | 1,00 |
| 10      | 0,72 | 1,00 |
| 11      | 0,70 | 0,80 |
| 12      | 0,82 | 1,10 |
| 13      | 0,85 | 1,10 |
| 14      | 0,82 | 1,10 |
| 15      | 0,83 | 1,00 |
| 16      | 0,79 | 1,05 |
| 17      | 1,10 | 1,05 |
| 18      | 1,15 | 1,20 |
| 19      | 1,20 | 1,05 |
| 20      | 1,70 | 1,10 |
| 21      | 1,85 | 1,53 |
| 22      | 1,95 | 2,50 |
| 23      | 2,05 | 2,60 |
| 24      | 2,00 | 2,40 |
| 25      | 1,95 | 2,50 |
| 26      | 2,00 | 2,40 |

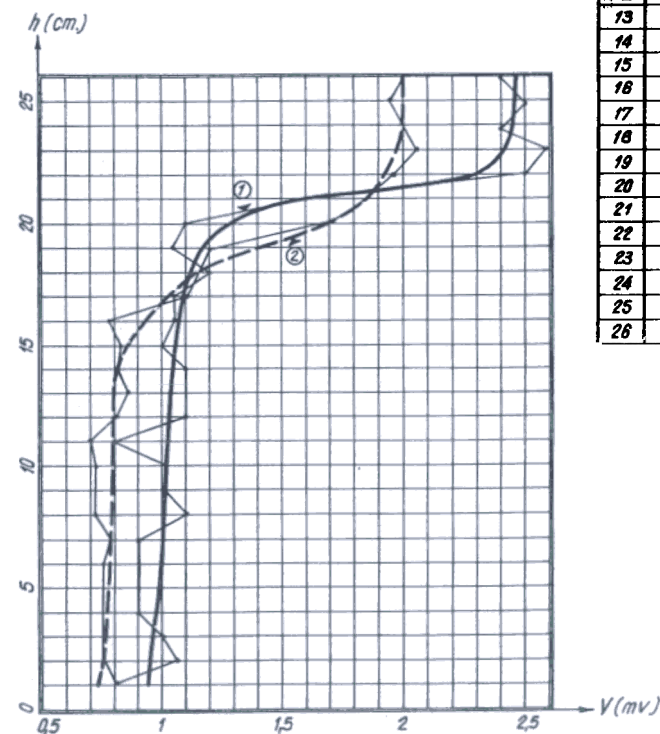


Fig 23



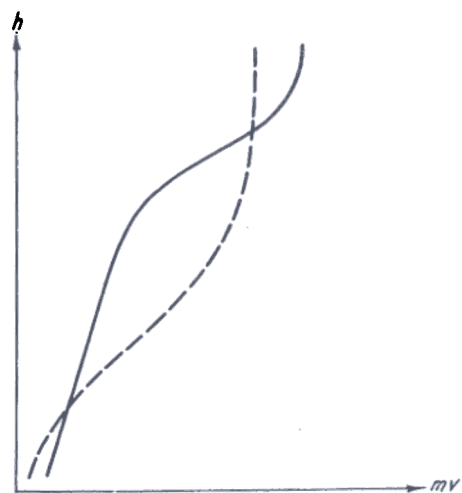
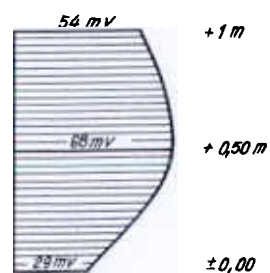
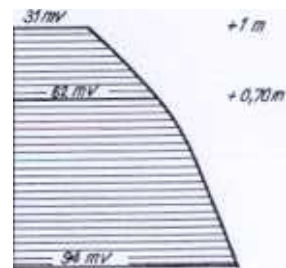


Fig. 24



Sample 1



Sample 2

Fig. 25

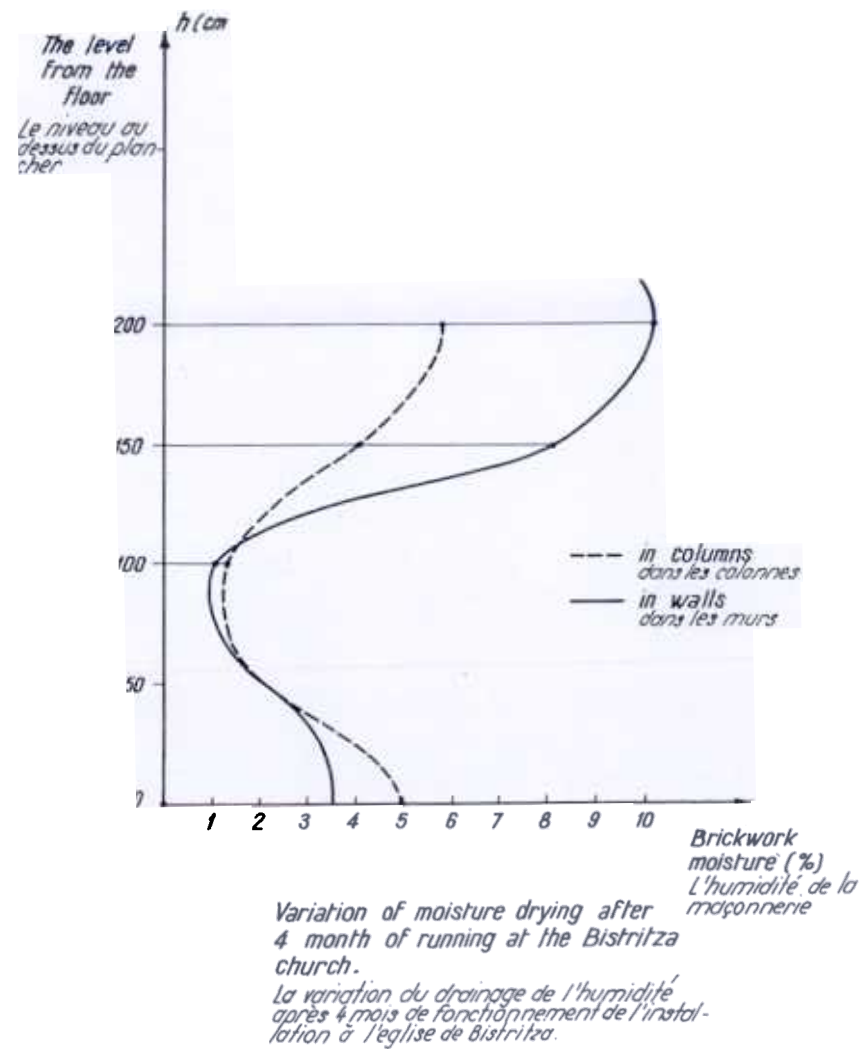


Fig. 26