

SUR QUELQUES PROCÉDES DE PROTECTION DES MONUMENTS CONTRE L'HUMIDITÉ ASCENDANTE

On sait que la plupart des ouvrages anciens (monuments d'architecture) n'ont pas d'étanchéité qui pourrait les protéger contre l'action destructive des eaux phréatiques. Cependant, dans la pratique, les défauts dans les murs de clôture et les décors de ces monuments ne sont pas provoqués très souvent par l'absence d'étanchéité. On a constaté que l'apparition de l'eau de condensation n'est pas moins nuisible, de même que l'absence d'un régime hydrothermal nécessaire. En général, ces phénomènes sont intimement liés. Cependant, il n'est pas possible de révéler à l'instant les causes de destruction du monument.

Tout d'abord, il faut faire attention aux particularités constructives et architecturales de l'ouvrage et étudier la conception de sa superstructure et de sa partie enterrée (voir les croquis 1 et 2).

Si le bâtiment n'a pas de sous-sol ou de rez-de-chaussée, il fait humide en été à l'intérieur de ces ouvrages, non pas à cause d'une infiltration capillaire des eaux phréatiques à travers des fondations et des murs, mais à la suite du phénomène de condensation de l'eau. Dans des bâtiments anciens, le dallage des planchers se faisait très souvent en pierres à chaux (briques, grès cérame émaillé) posées sur la terre compactée, sur des gravats, à sous-couche calcaire ou sableuse.

Par la suite, des planchers ont été remplacés par des dalles en fonte ou des plaques en terre cuite posées sur une sous-couche en béton. Un grand refroidissement du bâtiment en hiver et en automne conduit à l'accumulation du froid dans sa partie inférieure, au niveau du plancher, ce qui provoque l'apparition de l'eau de condensation à l'intérieur du bâtiment durant la période chaude. Plus l'hiver est froid et l'été chaud, plus le phénomène d'apparition de l'eau de condensation est important (exemple : la cathédrale de la Nativité au couvent Savvino-Storojevsky).

L'humidité s'accumule dans ce cas sur le plancher en quantité considérable; la maçonnerie et l'enduit des murs commencent à l'absorber d'une manière intense, ce qui amène la destruction irréversible de la peinture

murale et des autres décors des locaux à une hauteur considérable du sol. S'il y a beaucoup de visiteurs dans le bâtiment, la présence de l'humidité et son action destructive s'aggravent (la cathédrale de l'Assomption du Kremlin de Moscou). Pour remédier à ces effets nuisibles de l'eau de condensation, il faut maintenir dans les monuments d'architecture un régime hydrothermal spécial comme une des mesures assurant des conditions d'exploitation nécessaires pour la conservation du bâtiment.

L'infiltration capillaire des eaux phréatiques est un phénomène qui n'est pas moins nuisible que la présence de l'eau de condensation. Des eaux phréatiques frappent des éléments de clôture lorsqu'il y a ou n'y a pas de sous-sol dans le bâtiment.

Des mesures spéciales ont montré que la migration des eaux phréatiques, qui traversent des murs en sens horizontal ou de bas en haut, peut avoir une grande étendue, c'est-à-dire frapper des murs périphériques d'une grande partie du bâtiment (exemple : le clocher d'Ivan le Grand du Kremlin).

Il est assez difficile d'empêcher la pénétration des eaux phréatiques dans le bâtiment. C'est beaucoup plus difficile dans les monuments d'architecture, notamment s'ils sont décorés de peintures murales.

L'installation d'un pavé en béton ceinturant le bâtiment, des réseaux de drainage, d'un cuvelage étanche des surfaces extérieures de la maçonnerie de fondation, ne donne pas satisfaction.

Il faut exclure le mouvement de l'eau dans l'épaisseur des fondations. Mais, c'est difficilement réalisable du point de vue technique. Dans ces cas, l'électro-osmose peut se révéler très utile.

Le développement actuel de la science et de la technique doit être complètement utilisé dans le but de conserver l'héritage culturel du peuple, notamment les monuments d'architecture. Nous allons examiner quelques exemples et commencer par la protection à l'aide de l'électro-osmose.

Les deux lignes (d'anodes et cathodique) sont branchées à une sous-station de commande et de contrôle composée de : un tableau de commande, un poste d'alimentation et un redresseur.

Le projet retenu prévoit un assèchement double à l'aide de l'électro-osmose : d'une part, « actif », c'est-à-dire avec la mise en circuit de la source du courant continu; d'autre part, « passif », prévoyant le court-circuit des anodes et des cathodes. Le passage d'un procédé à l'autre est prévu par l'intermédiaire d'un tableau de distribution.

Dans le cas d'humidité prolongée et abondante de la maçonnerie, l'électro-osmose unique ne peut pas enrayer cette humidité dans le monument. Un procédé complexe qui utilise l'électro-osmose, un système de climatisation et de réseaux de drainage a été retenu pour la protection contre l'humidité des locaux du rez-de-chaussée du clocher d'Yvan le Grand au Kremlin de Moscou.

Ce clocher date des années 1540. Après une explosion causée par des troupes de Napoléon en 1812, il a été reconstruit en 1815. Des études ont montré que ce bâtiment a été érigé sur une fondation continue en moellons, gros cailloux et briques, recouverts de mortier de chaux. La semelle de fondation est placée à 6 m environ sous la cote du plancher actuel. Il n'y a pas de sous-sol. Le plancher est couvert de briques et de débris de pierres à chaux recouvertes par deux couches d'asphalte et de plaque en PVC. On a noté dans le bâtiment une humidité élevée qui devient plus importante près de la semelle de fondation à l'angle nord-est, dans le mur est et près du poteau sud. Une humidité importante se révèle également dans les murs à l'angle sud-ouest, notamment à la partie supérieure des murs. Cette humidification est provoquée par le fait que l'escalier extérieur est accolé au mur et l'humidité pénètre dans le mur depuis cet escalier. Le rez-de-chaussée du clocher est utilisé pour des expositions. Cependant, l'organisation de ces expositions ainsi que la conservation du bâtiment proprement dit sont très difficiles à cause de l'humidité importante de ses murs.

Pour enlever cette humidité et créer les conditions nécessaires à la mise sur pied d'expositions au rez-de-chaussée, sont réalisées des propositions suivantes :

I. La protection contre l'humidité est assurée à l'aide de l'électro-osmose. Des anodes sont placés horizontalement à l'angle nord-est, dans le mur est et près du poteau sud. L'angle sud-ouest est protégé par le schéma vertical;

II. Une installation de climatisation assure un assèchement plus efficace des locaux en éliminant l'humidité de la surface intérieure des murs. Pour cela, des caissons sont interposés dans les murs pour la distribution de l'air humidifié et chauffé dans la zone supérieure, alors que d'autres caissons absorbent l'air de la zone moyenne pour la recirculation. Des écrans spéciaux écartés des murs de 50 cm sont destinés à permettre une libre circulation de l'air. De cette façon sont créées

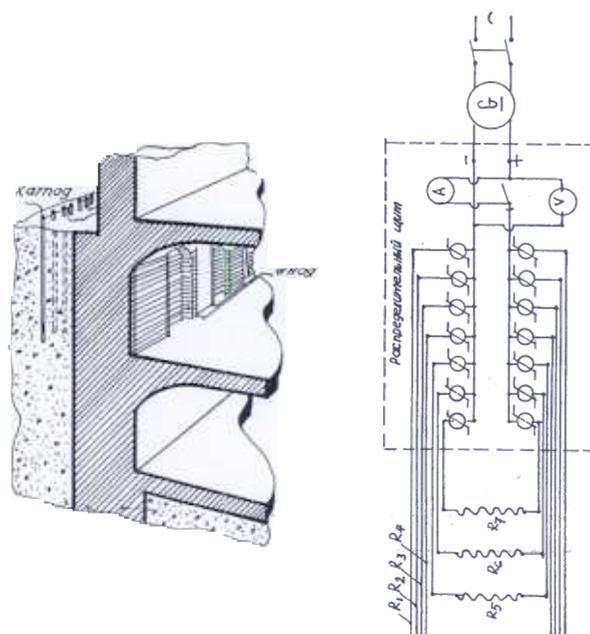


Fig. 3. — Salle des armures. Diagramme de protection par l'électro-osmose.

des aires d'exposition dotées de l'équipement qui permet d'assurer un régime hydrothermal obligatoire pour des locaux d'exposition si dans les murs de clôture du bâtiment s'est révélée une humidité importante.

III. Tout près de l'angle nord-est du bâtiment qui est humidifié violemment par des eaux de ruissellement et non pas chauffé par le soleil, on pose un réseau de drainage constitué de tubes métalliques écartés des murs périphériques de 2 m et enfoncés dans la terre à la profondeur de 0,5 par rapport au niveau de surface du pavé en béton ceinturant le monument de 6 m, c'est-à-dire à 1 m sous la semelle de fondation où se trouvent des sols sableux qui peuvent absorber l'eau s'écoulant des tubes de drainage. Ces tubes sont remplis de sable de Lubertsy. Dans ce cas, un procédé complexe (électro-osmose, climatisation, drainage) permet de protéger un monument contre l'action ultérieure de l'humidité élevée et d'assurer les possibilités d'utiliser ce monument en tant que musée.

Les deux exemples sus-mentionnés expliquent des cas plus rationnels de mise en œuvre de l'électro-osmose. Le choix des procédés ayant pour but d'éliminer l'humidité élevée du monument exige un examen détaillé préalable du monument, sans lequel il serait très malaisé d'élaborer des recommandations techniques appropriées, qui pourraient diminuer l'humidité dans le

monument et créer des conditions normales pour la conservation et l'utilisation de ce monument aujourd'hui. A cet égard, il faut noter l'organisation d'une inspection de la Cathédrale de l'Assomption du Kremlin de Moscou dans le but de révéler les causes qui ont provoqué l'humidité importante et la destruction des peintures murales.

On sait que la Cathédrale qui existe, a été construite de 1475 à 1479 par l'architecte A. Fiorovanti. Ses murs et fondations sont en pierre de chaux; ses voûtes sont en briques; ses piliers sont en briques revêtues de pierre calcaire.

Une humidité élevée des murs et des piles a été révélée dans la Cathédrale, notamment dans leur partie inférieure. Ce phénomène causait la destruction des peintures murales. Le siège du Patriarche placé près du pilier sud-est et fait en pierre de chaux revêtue ultérieurement d'une peinture à l'huile, subissait les attaques les plus graves. Cette destruction de la peinture murale et même de la pierre s'est marquée particulièrement dans la zone inférieure, à hauteur de taille d'homme (de 1,5 à 1,7 m). L'accumulation de l'humidité tout près du plancher a été justifiée par des recherches en laboratoire; la peinture murale reproduite dans les ateliers de restauration auprès du Ministère de la Culture de l'URSS a été soumise à des études. Ce travail accompli, l'Institut de recherches scientifiques a procédé à l'examen détaillé du monument pour assurer la protection contre l'humidité à l'aide de l'électro-osmose, notamment pour le pilier sur-est et le siège du Patriarche.

Cependant, l'inspection de la partie enterrée de l'ouvrage (fondations, murs, piles ainsi que plancher) a montré que :

Les fondations sont en blocs de pierres grossièrement taillés et posés sur un bon mortier de chaux. La teneur en humidité dans les fondations s'abaissait du plancher à la sous-couche. L'infiltration capillaire de l'humidité venant du sol n'est pas apparue parce que les eaux phréatiques se trouvent à 8,6 m plus bas que le niveau du plancher.

Le plancher est en dalles de fonte posées dans les années 1890, qui recouvrent une sous-couche en béton (épaisseur de quelques centimètres). Le béton est appliqué sur des dalles en pierre épaisses de 17 cm. Sous ces dalles se trouve une couche de sable sous laquelle il y a un entrevous du XVI^e siècle. Une couche de décombres née au cours du démontage et de la construction des deux églises précédentes règne plus profondément. Le sous-sol n'existe pas.

L'étude des couches qui forment maintenant le « plancher » de l'église a montré que l'accumulation la plus importante de l'humidité s'opérait dans la sous-couche en béton posée sous les dalles en fonte. L'accumulation de l'humidité est provoquée par des conditions d'exploitation du bâtiment (lavage des planchers avec un rinçage abondant; l'humidité apportée par les visiteurs en temps humide), ainsi que par la condensation due à l'absence du régime hydrothermal adéquat.

Le siège de Patriarche n'a pas de fondation et pose sur le plancher dallé en pierre du XV^e siècle. Les dalles en fonte sont posées sous le siège dans la maçonnerie, à une profondeur de 5 à 8 cm. L'humidité s'infiltrait depuis ces dalles et le béton suivant la surface extérieure de la maçonnerie en pierre du siège et provoquait la destruction de la peinture murale et de la pierre.

La protection contre l'humidité à l'aide de l'électro-osmose n'est pas ici recommandée. Par ailleurs, les recommandations retenues proposaient de changer radicalement le processus de lavage des planchers (répandre des sciures pendant le nettoyage et en temps humide) et d'installer une climatisation perfectionnée avec écran thermique à l'entrée. Ces mesures doivent entraîner la disparition de la condensation. Ces conditions accomplies, il faut contrôler l'humidité des éléments de construction précédents. Si la condensation ne cesse pas, il y a aura intérêt à remplacer les dalles en fonte avec sous-couche de béton par un autre type de dallage. Des échantillons pris en 1968 ont attesté une diminution de l'humidité. En effet, pour résoudre le problème de l'humidité excédentaire, il fallait effectuer une étude détaillée du monument lui-même. L'électro-osmose prévue à la suite de la première reconnaissance du monument a dû être remplacée par des mesures assurant un régime hydrothermal ad hoc et une amélioration des conditions d'exploitation.

La Cathédrale de la Nativité du monastère Savvino-Storojevsky près de Zagorsk présente un exemple identique. L'étude a montré que ce temple n'a pas de sous-sol et que le plancher existant, qui date des années 1910, est fait de dalles en terre cuite posées sur un sous-pavement en béton de quelques centimètres. Sous le pavement se trouvent des débris du revêtement en briques du XVII^e siècle, ainsi que des gravats. L'infiltration capillaire des eaux phréatiques n'a pas lieu. A la suite de l'absence de chauffage et à cause des dimensions relativement faibles de cette église, ses murs, son plancher et son sous-sol se refroidissent fortement en hiver; en été, on constate une condensation très importante sur le plancher, ce qui a provoqué la destruction complète des peintures murales des murs extérieurs du bâtiment. En quelques endroits, des traces de destruction ont été reconnues à une hauteur de 1,5 m et plus au-dessus du niveau de plancher. Des dommages sont visibles sur la surface extérieure des pierres calcaires. Il est très difficile d'installer la climatisation dans un monument dont les locaux s'élancent verticalement et dont l'éclairage zénithal est assuré par des « tambours » placés dans la partie supérieure, d'autant plus que toute la surface des murs, les voûtes et les « tambours » sont couverts de fresques.

Le schéma retenu pour la Cathédrale de la Dormition a donc été le suivant :

Dans les trois zones du monument, il faut maintenir un régime hydrothermal constant avec les paramètres ci-dessous (compte tenu d'un nombre maximum d'excursionnistes) :

Période d'été

° : de + 20° à + 23°
humidité : de 55 à 60 %

Période d'hiver

° : de - 18° à - 20°
humidité : de 55 à 60 %

Le projet prévoit une distribution d'air d'après le schéma que voici : un volume essentiel d'air pulsé est distribué dans la partie inférieure du local (hauteur de 1 à 3 m) à un angle de 35° sur la surface des murs intérieurs. On crée ainsi une couche d'appui d'air qui assure également le chauffage des « tambours » d'éclairage zénithal. L'air superflu doit être évacué par les vitrages spéciaux des « tambours » dotés de vannes à commande à distance qui permettent de régler la quantité d'air passant par chaque tambour. Pour maintenir les paramètres nécessaires de l'air dans les « tambours », on rejettent 25 % de la quantité générale de l'air pulsé; en hiver, cette quantité monte à 45 %. Tout le reste de l'air (c'est-à-dire respectivement 75 et 55 %) est acheminé pour la recirculation dans la zone inférieure de l'église. En outre, l'entrée principale qui donne à l'ouest est dotée d'un écran aérothermique.

L'installation d'une climatisation dotée d'appareillages de contrôle et de régulation automatiques exige des dépenses considérables. Elle exige aussi la pose de gaines d'air dans les locaux, ce qui provoque dans une certaine mesure la destruction de la maçonnerie originale. C'est pourquoi, pour le maintien d'un régime hydrothermal optimal dans les monuments d'architecture, qui ont des peintures murales, il est possible d'utiliser d'autres moyens techniques.

Dès l'arrivée de la période d'automne-hiver, il est très important d'empêcher un refroidissement des locaux pour éviter une condensation d'eau au printemps. Secundo, il faut évacuer l'air trop humidifié de la zone supérieure, celle où se trouvent les « tambours ». L'humidité s'élève au cours des visites. Des persiennes posées dans les vitrages des « tambours » peuvent remédier à ces effets (il serait utile qu'elles soient réglables). Il serait désirable en outre de chauffer l'espace intérieur des tambours dont les parois minces provoquent un refroidissement qui amène la destruction de la peinture murale à la suite de la condensation, du dégel et de la moisissure. Autrement dit, les schémas suivants peuvent être proposés pour maintenir un bon régime hydrothermal :

1^{re} variante. Chauffage électrique.

Conformément aux calculs thermique et technique, sont installées des piles thermo-électriques (comme des fluides calorifères essentiels) aux endroits déterminés. Les vitrages des « tambours » sont revêtus d'une émulsion qui conduit le courant électrique. Ces vitrages sont transparents, ont une température constante de chauffage (+ 104°) et peuvent chauffer les « tambours » sans abîmer l'architecture et l'esthétique de la partie supérieure du monument. L'installation de persiennes réglables aux vitrages des « tambours » permettra de maintenir un régime hydrothermal nécessaire dans les trois

zones des locaux (inférieure, moyenne et supérieure). Il y a intérêt à utiliser un appareillage approprié pour mesurer la température et l'humidité, et pour assurer le contrôle et la régulation nécessaire, manuelle ou automatique.

L'utilisation de l'électricité permet d'obtenir des appareils de chauffage relativement portatifs qui facilitent la manutention et l'exploitation sans détériorer les peintures murales.

2^e variante. La pratique justifie la possibilité d'utilisation du chauffage central dans les monuments-églises décorés de fresques. Dans ce cas, les fluides calorifères (batteries, registres) ne doivent pas être placés dans les murs (poteaux) ou tout près d'eux afin de ne pas détruire la peinture murale. Cependant, les « tambours » à parois minces exigent leur propre chauffage; c'est pourquoi, nous pouvons recommander d'utiliser les mêmes vitrages (batteries) revêtus d'une émulsion conductrice du courant électrique. Ainsi on applique un procédé complexe : en bas, des batteries de chauffage central, et dans les vitrages de « tambours », des batteries de glace. Cette variante exige également la pose de persiennes dans les vitrages des « tambours » ainsi que le contrôle et la régulation de la température et de l'humidité à l'aide de capteurs et de régulateurs manuels et automatiques. Dans certains cas, les batteries ouvertes de chauffage central peuvent être remplacées par des panneaux chauffants (fours anciens, etc.) dans lesquels sont interposés des registres (ou les mêmes batteries). Nous avons alors un type de chauffage rayonnant. Cependant, pour les monuments-musées, les planchers chauffants sont interdits parce qu'ils favorisent la circulation d'une grande quantité de poussières dans l'air.

Plusieurs variantes de chauffage et de ventilation peuvent être imaginées pour la conservation du monument. Toutefois, ces types de chauffage ne doivent pas altérer l'originalité de ce monument; son importance historique et sa valeur esthétique. Il en découle une conclusion : Les progrès scientifiques et techniques permettent aux architectes-restaurateurs de poser une série de problèmes aux spécialistes qui s'occupent des mêmes questions dans d'autres domaines que la conservation des monuments d'architecture et de la culture parallèlement à leur activité directe.

En effet, l'utilisation des découvertes récentes dans la lutte contre l'humidité élevée des monuments d'architecture (musées), permet de dire que :

Nous sommes en mesure de créer dans les monuments, qui étaient autrefois des ouvrages du culte décorés par la fresque, un climat artificiel (d'après un schéma plus ou moins perfectionné) et ainsi éviter les causes qui provoquent de graves destructions par suite de la condensation.

Une protection de l'ouvrage à l'aide de l'électro-osmose peut être employée pour lutter contre l'infiltration capillaire des eaux phréatiques. Nous avons appliqué des

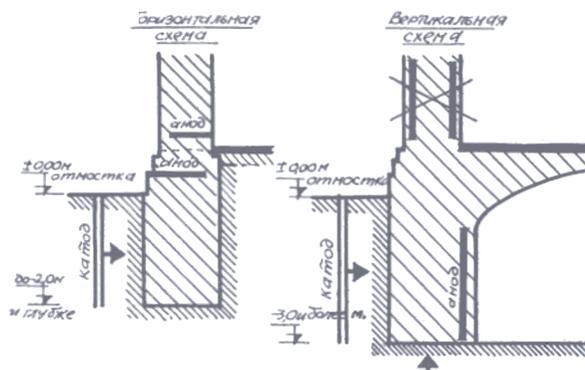


Fig. 4. — Exemples d'emploi de l'électro-osmose en d'anciens monuments. Vues horizontale et verticale.

schémas horizontal et vertical de la construction d'électro-osmose; ceci nous permet de dire dans quelles conditions doit être choisi tel ou tel de ces schémas (schéma 4).

Schéma horizontal. Ligne d'anode (fil de cuivre)

Les fils de cuivre enduits par un mastic qui conduit le courant électrique, doivent être placés au niveau du plancher et au-dessous de ce dernier, mais pas plus bas que la cote du pavé en béton ceinturant le bâtiment. Cette ligne peut être disposée contre les surfaces intérieure et extérieure des murs. Une ligne cathodique (tube en fer) doit être posée dans le sol au-dessous de la cote du pavé en béton ceinturant le bâtiment.

Schéma vertical. L'application de ce schéma est recommandée pour une disposition de locaux sous le sol (sous la terre). Dans ces conditions, les lignes cathodique et anodique peuvent être placées en parallèle et à un même niveau (exemple : rez-de-chaussée du Palais des Armures). Une disposition de la ligne cathodique à la surface externe des murs du bâtiment au-dessus du pavé en béton ceinturant ce bâtiment est interdite. Cette disposition pourrait provoquer la destruction de la maçonnerie et l'altération des décors de la façade. C'est pourquoi, les lignes anodique et cathodique doivent être disposées dans la plupart des cas à des niveaux différents : anode dans le bâtiment et cathode à l'extérieur, sous le revêtement en béton qui ceinture le bâtiment. Le choix du schéma de construction d'une ligne anodique (pose des électrodes dans un mur, ou disposition des fils de cuivre parallèlement à la paroi externe du mur) exige beaucoup de soin car il est lié à la conservation de la peinture murale et d'autres décorations du bâtiment.

Pour utiliser l'électro-osmose d'une manière plus effi-

cace, il faut connaître la réactivité des matériaux employés dans les maçonneries anciennes et actuelles par rapport à l'électro-osmose.

Les réalisations dans le domaine du scellement des sols dont nous disposons à présent, doivent être utilisées plus rationnellement pour faire d'une couche de terre d'une épaisseur donnée qui enveloppe la partie souterraine du bâtiment, une masse totalement étanche. Ainsi peut être créée une protection imperméable à l'humidité sans destruction de la maçonnerie originale du bâtiment.

Des réactifs chimiques peuvent être également utilisés pour un scellement des coupures stratigraphiques des couches repérées au cours des fouilles et des recherches archéologiques. Ce scellement est très efficace.

Il permettra de changer la méthodologie des recherches architecturales et archéologiques, facilitera la conservation de niveaux entiers d'une souche cultivée (qui sont détruits à l'heure actuelle) et des vestiges d'ouvrages découverts à la suite des fouilles (sur toute leur hauteur; y compris les parties au-dessus et au-dessous du sol). En conclusion, nous souhaitons perfectionner de toutes nos forces les méthodes d'étude des monuments. Il faut limiter le nombre d'échantillons prélevés dans la maçonnerie originale et utiliser dans la mesure du possible des appareils de mesure électrique. Ces appareils permettent de répéter un procédé, de mesurer l'humidité. Ils diminuent le temps nécessaire à l'obtention des résultats et n'endommagent pas les monuments.

Durant les deux dernières années, la pratique a démontré d'une manière convaincante que la conservation des monuments d'architecture dépendait dans une grande mesure de l'efficacité de la collaboration créatrice des architectes-restaurateurs avec d'autres spécialistes.

V. I. FEDOROV
(Moscou)

Fig. 1. Ancient building without substructure.

Fig. 2. — Ancient building with foundations and base

Fig. 3. Armoury. Diagram showing protection by electro-osmosis

Fig. 4. — Examples of the use of electro-osmosis in ancient buildings. Horizontal and vertical systems.