

CONSOLIDATION DES MONUMENTS D'ARCHITECTURE PAR INJECTION DANS LES MAÇONNERIES

La méthode d'injection dans un monument détérioré par des fissures permet d'éviter la nécessité de reposer ou de « retourner » des constructions et parallèlement de conserver les éléments anciens du monument. Cependant, il est indispensable d'exclure au préalable toute nouvelle possibilité d'apparition de fissures; sans quoi d'autres parties de monument seraient atteintes de la même façon lors des nouveaux tassements des murs. Le choix de la composition de la solution à injecter dépend de la structure de la maçonnerie, des conditions de vie du monument et enfin de la présence à sa surface d'éléments décoratifs.

Les solutions de l'injection doivent répondre aux exigences suivantes : fluidité parfaite au moment de la pénétration dans les fissures; bonne adhésion aux matériaux de la maçonnerie; caractéristiques physiques et mécaniques communes des solutions et de la maçonnerie; résistance suffisante au gel; influence relativement limitée sur l'apparition de sels à la surface de la maçonnerie.

Les procédés mis en œuvre au cours des travaux d'injection ne doivent pas laisser de traces visibles à la surface des maçonneries. Le ciment doit être considéré comme un matériau essentiel dans les solutions d'injection puisqu'il est le plus simple et le plus efficace parmi les liants minéraux actuellement connus.

Il est d'ailleurs possible de remédier à certains défauts du ciment par des additions appropriées.

FLUIDITE DES SOLUTIONS

La fluidité des solutions d'injection est déterminée par la viscosité qui dépend de la consistance aqueuse variant toujours dans les fissures selon le degré d'absorption de l'eau par la maçonnerie.

La perte rapide d'une quantité considérable d'eau par des solutions composées purement de ciment et ayant une faible capacité de rétention de l'eau, provoque une densification prématurée des solutions et empêche leur bonne pénétration à l'intérieur de la maçonnerie; en cas de prise, elle contribue à créer des cassures provoquées par le tassement.

Il faut introduire dans pareilles solutions des adjuvants qui améliorent leur capacité de retenir l'eau dès le commencement du durcissement ainsi qu'au cours de l'absorption de l'eau par la maçonnerie. Dans l'étude

du régime d'absorption de l'eau par la maçonnerie, la grandeur du vide est déterminée à l'aide d'un appareil spécial (fig. 1), dans l'entonnoir duquel on pose de petits cylindres de 5 cm de diamètre en pierre ou en brique; le vide varie de 100 à 180 mm dans la colonne de mercure suivant la structure pierreuse.

Toutefois, la grandeur du vide influe très peu sur la quantité d'eau absorbée de la solution. C'est en réalité l'intensité d'absorption de l'eau qui augmente de manière sensible : ceci a été vérifié au travers de l'entonnoir à fond filtrant rempli par la solution à étudier. La composition de la solution exerce donc une plus grande influence.

On peut améliorer la capacité de rétention de l'eau des mortiers de ciment d'une manière artificielle à l'aide des additifs suivants : de la chaux en pâte, de la brique concassée ou du calcaire broyé (à raison de 80 à 90 % à travers un tamis ayant 10.000 ouvertures au cm^2), ainsi que certains plastificateurs organiques possédant une activité superficielle.

Parmi ces derniers peuvent être rangées des matières hydrophiles et hydrophobes.

Le sulfite alcalin hydrophile (CC6) contribue à la pose plus compacte des particules du ciment, ce qui s'exprime par une diminution de la capacité de rétention de l'eau des solutions injectées. Ce système oblige à humidifier d'avance et suffisamment la maçonnerie, parallèlement à l'utilisation des matériaux précités; alors que cette humidification empêche l'absorption de l'eau de la solution.

Des entraîneurs d'air hydrophobes, par exemple le sel sodique d'acide abiétique (du type « Vinsol » employé en Europe Occidentale) ou le savon alcalin (dérivé du pétrole), améliorent la capacité de rétention de l'eau des solutions d'injection grâce à la densité plus faible de pose des particules du ciment. Des additions hydrophobes possédant une activité superficielle sont particulièrement efficaces à condition que les solutions contiennent des charges minérales.

En Russie, du XIII^e au XIV^e siècle, on utilisait souvent en se basant sur des données empiriques des matières organiques similaires dans la fabrication des mortiers de chaux pour le support des fresques, par l'addition dans la chaux au moment de son hydratation d'écorce de sapin, de fibres de lin finement broyées, de paille d'orge ou de seigle; pendant l'hydratation, les matières possédant une activité superficielle entraînent inévitablement dans la chaux.

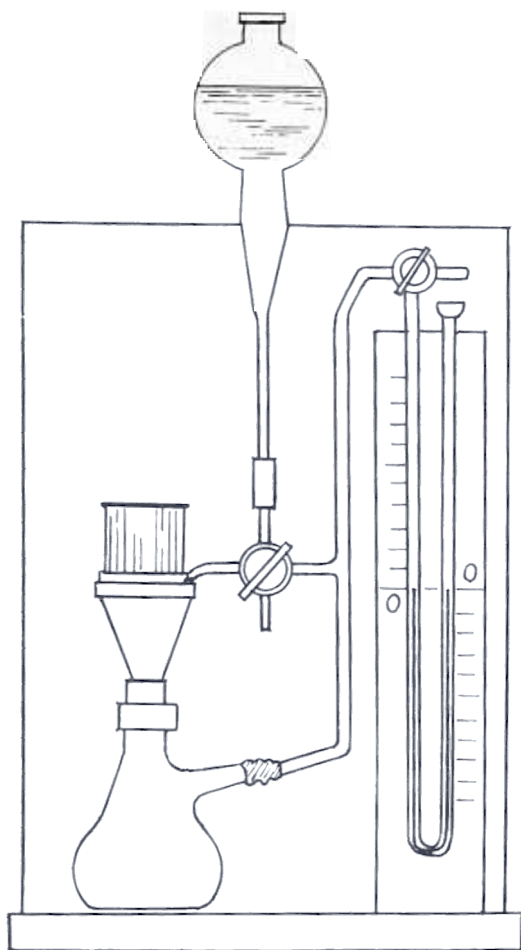


Fig. 1. — Appareil servant à déterminer la grandeur du vide durant l'absorption de l'eau par la pierre.

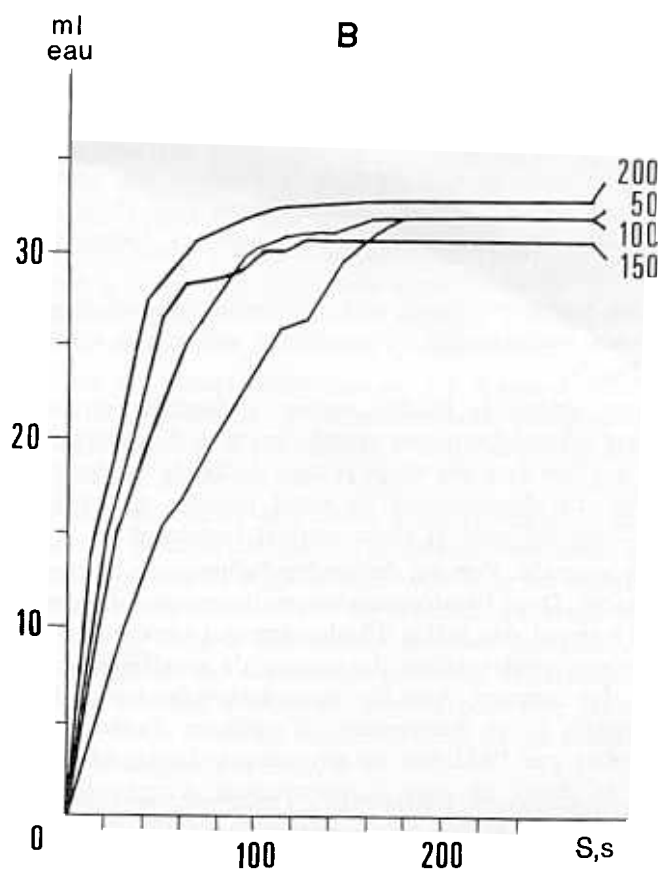
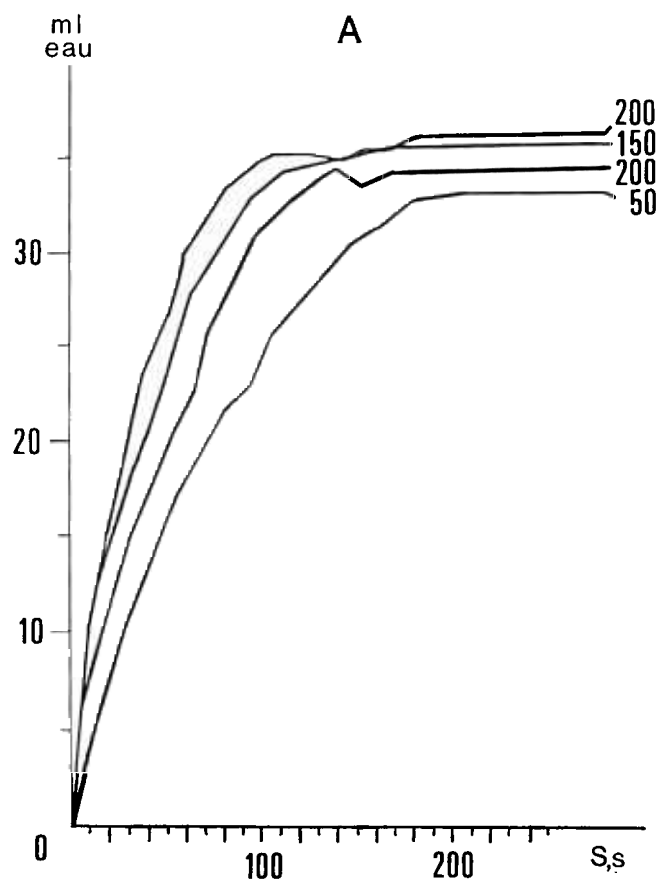


Fig. 2. — Graphique du pompage de l'eau des sections sous un vide différencié.

A. Composition des parties intégrantes : ciment et eau à 50/50.

B. Composition des parties intégrantes : ciment, argile et eau à 45/5/50.

(Les chiffres terminant les courbes expriment les mm. Hg sous vide).

L'emploi de hauts polymères offre aussi de larges possibilités d'exploitation : ainsi, l'utilisation d'émulsion d'acétate de polyvinyle est très efficace car elle améliore la capacité de rétention de l'eau des solutions et, ce qui est plus important, elle réduit leur viscosité.

TASSEMENT ET ADHESION

Le tassement des solutions et leur adhésion à la maçonnerie sont des phénomènes liés entre eux. Plus faible est le tassement, plus forte est l'adhésion, toutes conditions restant égales.

L'adhésion de la solution et des matériaux silicieux est favorisée par la formation des hydrosilicates de chaux dans la couche de contact; pour les carbonates de la maçonnerie un grand rôle est aussi joué par l'accroissement de la structure générale à la limite de liaison, analogue à l'accroissement des cristaux dans la solution saturée.

L'utilisation de ces propriétés permet d'obtenir une adhésion améliorée de la solution d'injection et de la maçonnerie par l'adjonction dans les solutions de sable fin, de brique ou de chaux fine. Et on obtient de la sorte des compositions résistantes à la rupture et possédant un durcissement retardé.

Les charges minérales précitées sont très efficaces en combinaison avec les plastificateurs - entraîneurs d'air, tels le sel sodique, l'acide abiétique, l'acide oléique et le savon alcalin.

Pour avoir des solutions d'injection n'occasionnant qu'un faible tassement et ne contenant pas de ciment, il est loisible d'employer de la chaux vive finement broyée en union avec de la chaux en pâte et des additions de gypse ou de sulfite alcalin hydrophile retardant parfaitement le processus d'hydratation et de durcissement de cette chaux. Compte tenu de la diversité des types de chaux, la quantité de ces additions sera fixée dans chaque cas particulier par des analyses spéciales en laboratoire.

Une tentative dirigée vers l'utilisation de solutions à chaux hydratée pour l'injection a donné des résultats négatifs.

Pour obtenir la fluidité voulue, il faudrait introduire dans ces solutions une grande quantité d'eau : plus de 2 à 3 fois le poids de la portion sèche de la chaux en pâte. Le durcissement ne serait possible qu'après un séchage suffisant et donc un fort tassement.

En revanche, l'emploi de poudre d'aluminium est remarquable. Dans l'ambiance alcaline du mortier de ciment se forment des bulles d'hydrogène qui provoquent une certaine augmentation du volume du mortier en cours de durcissement. Afin de mieux retenir les bulles d'hydrogène, il est indispensable d'améliorer l'adhésion du mortier par l'addition de sel sodique d'acide abiétique et de chaux en pâte. L'inconvénient d'application de l'aluminium résulte de la difficulté à répartir régulièrement la poudre d'aluminium dans une masse de

ciment plus importante que celle de la poudre elle-même.

3 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET MECANQUES DES SOLUTIONS D'INJECTION DURCIES

La durée de vie de la maçonnerie consolidée par l'injection est déterminée par l'ensemble des caractéristiques physiques et mécaniques de la solution à injecter et de celles des maçonneries anciennes.

Les caractéristiques suivantes sont les plus importantes : résistance, déformabilité, coefficient de dilatation, perméabilité à la vapeur; s'il y a des fresques, une grande considération doit être apportée à l'absence de sels à la surface de la maçonnerie.

La résistance mécanique des solutions d'injection durcies doit correspondre à la résistance de la maçonnerie à consolider. La mise en œuvre de solutions à résistance supérieure à celle de la maçonnerie est erronée et exerce parfois une action nuisible compte tenu des tensions actives qui, à cause du monolithisme des constructions portantes, ne sont généralement pas notables.

L'analyse des maçonneries anciennes montre que leur particularité la plus caractéristique consiste en la présence dans les mortiers de chaux d'additions finement broyées sous forme de poussière de brique ou de poudre de calcaire. On notera que les mortiers fabriqués en Russie du XI^e au XIV^e siècle et qui se sont bien conservés jusqu'à nos jours, comportent de 15 à 50 % de brique broyée : celle-ci est finement concassée et passe par le tamis à 10.000 ouvertures au cm².

L'emploi d'additions minérales microscopiques permet de rapprocher les caractéristiques des solutions d'injection de ceux des maçonneries du temps passé.

Le choix des charges microscopiques dépend des conditions dans lesquelles la solution d'injection durcira.

Pour assurer un monolithisme supérieur de la maçonnerie, il est souhaitable d'employer des solutions possédant une plus grande déformabilité, ce qui peut empêcher dans une certaine mesure une fissuration nouvelle. Les solutions durcissant grâce à l'addition d'une plus grande quantité d'eau sont plus déformables que des mortiers de pose. Plus forte est l'activité de n'importe quel ciment, plus grand est le coefficient d'élasticité dans la pierre durcie, plus rigides sont généralement les ciments et moindre est leur déformabilité.

4. RESISTANCE AU GEL

Une résistance améliorée au gel n'est pas une exigence capitale. L'addition du sel sodique d'acide abiétique ou de savon alcalin accroît suffisamment la résistance au gel des solutions. Mais il est indispensable que ces travaux soient terminés un mois avant l'arrivée du froid pour que la maçonnerie humidifiée puisse avoir déjà légèrement séché.

Il est aussi nécessaire de rapprocher le coefficient de dilatation des solutions appliquées de celui de la maçonnerie, notamment pour les constructions délicates et ajourées.

La différence d'évolution de la solution remplissant la fissure et de celle de la maçonnerie contribuera à la désagrégation et à une perte d'adhésion entre la maçonnerie et la solution.

Des additions possédant quelque activité superficielle ne baissent que légèrement le coefficient de dilatation : une influence plus certaine est exercée par l'addition de charges minérales finement broyées : brique ou chaux concassée

En cas de remplissage au mortier des cassures parallèles à la surface du mur, c'est la pénétration à vapeur du mortier durci qui aura la plus grande importance, particulièrement dans les constructions de grandes dimensions qui sont facilement humidifiées.

Sinon, derrière la couche de solution plus dense que la maçonnerie, se produira inévitablement une accumulation d'eau qui gèlera en hiver et conduira à une nouvelle brisure. La pénétration à la vapeur des solutions anciennes composées de chaux et de sable est relativement grande, tandis que les mortiers de ciment ont à la vapeur une pénétration sensiblement plus faible.

Une pénétration supérieure peut être acquise en ajoutant des matières possédant une activité superficielle ainsi que des additions finement broyées.

5. FORMATION DE SELS EN SURFACE

La dernière exigence pour les solutions d'injection concerne l'absence de sels à la surface de la maçonnerie.

Ce qui ne dépend pas toujours de la composition des solutions, puisque des sels peuvent déjà se trouver à l'intérieur de la maçonnerie. Le mouvement d'eau dirigé vers la surface des maçonneries et l'apparition des sels à la surface de celles-ci sont provoqués par l'addition d'une quantité considérable d'eau au cours des travaux d'injection.

Les dépôts salins peuvent se produire à la suite de l'apparition en surface d'une certaine quantité de chaux libre.

La chaux libre se dégageant au cours de l'hydratation du ciment (CaOH_2) a l'aspect des substances cristallines et n'a pas la structure colloïde de la chaux en pâte. De ce fait, la chaux libre du ciment est entraînée par l'humidité à la surface de la maçonnerie et, CaOH_2 se transformant en CaCO_3 , crée un dépôt insoluble de couleur blanche extrêmement nocif pour les fresques.

En fonction des conditions locales, de la composition des sels, de la présence ou au contraire de l'absence de fresques, on peut estimer dans chaque cas d'espèce si les sels sont admissibles à la surface des maçonneries ou non.

6. CHOIX DES COMPOSANTES DE LA SOLUTION

Il est utile d'employer comme liants essentiels les ciments de haut fourneau produits en U.R.S.S. ou les ciments de Portland de marques moyennes 300-400 qui sont finement broyés.

Les ciments de haut fourneau possèdent une capacité de rétention d'eau supérieure et une viscosité moindre dans les solutions liquéfiées d'injection.

En outre, ces ciments contiennent moins de chaux libre, ce qui limite les possibilités de voir apparaître des sels à la surface de la maçonnerie consolidée. La faible résistance au gel des ciments de haut fourneau peut être améliorée dans une certaine mesure à l'aide d'additions possédant une activité superficielle.

Les ciments expansifs ne peuvent être recommandés pour les solutions d'injection. Au cours de leur injection, en raison de la quantité considérable d'eau, l'effet de leur expansion ne se produit pas; dans les cas de consolidation des maçonneries anciennes, il n'est pas possible d'augmenter assez la pression dans la solution afin de pousser l'eau au-dehors.

Des solutions d'injection à base de chaux vive concassée en combinaison avec des retardateurs (CC6 et autres), compte tenu de la difficulté de leur fabrication, ne sont recommandables que pour les cas particuliers où des fresques voisinent avec la maçonnerie à consolider.

La destination de certains plastificateurs et des poudres minérales est déterminée par les conditions suivantes :

— Pour des fissures d'une largeur de 1,5 à 2 mm et moins, on peut employer des additions hydrophiles de type « CC6 » connues en U.R.S.S. et utilisées à raison de 0,02 à 0,25 % du poids de ciment, mais à condition d'humidification suffisante et préalable des fissures. Ceci est obligatoire dans tous les cas. Le même effet peut être atteint à l'aide d'une émulsion d'acétate de polyvinyle (de 50 % de concentration) (ПВАС) additionnée à la solution d'injection à raison de 10 % du poids du ciment. Cette addition diminue considérablement la viscosité de la solution et retient l'eau.

— Pour des fissures moyennes de 3 à 5 mm et même de 10 mm de largeur, il est recommandé d'utiliser en qualité d'addition le sel sodique d'acide abiétique avec des poudres minérales très fines.

— Pour des fissures profondes, il est conseillé d'additionner la solution de 20 % de brique concassée ou de chaux en poudre et de 0,02 à 0,03 % de sel sodique d'acide abiétique ou 10 % de ПВАС du poids du ciment. Pour remplir des fissures apparues par suite de la désagrégation des couches de parement de la maçonnerie, la quantité d'additions broyées peut être portée à 30-40 % du poids du ciment et celle du sel sodique d'acide abiétique à 0,03-0,04 %.

Les additions minérales (brique broyée, chaux) doivent pouvoir traverser un tamis ayant 10.000 ouvertures par cm^2 à raison de 85-90 %.

La brique broyée est recommandée pour les fissures d'une maçonnerie massive et humide; la chaux en poussière est conseillée pour les parties sèches du bâtiment. La chaux en pâte peut être utilisée avec succès à raison de 10 à 15 % en qualité d'addition pour remplir plusieurs fissures dans la maçonnerie de constructions situées au-dessus du sol (particulièrement avec du ciment de haut fourneau).

Cependant, pour des fissures de plus de 15 à 20 mm de largeur, il faut introduire, outre de la chaux en pâte, de la fine poussière minérale employée en quantité égale. Pour des fissures de faible largeur (moins de 1,0-1,5 mm) il est conseillé d'ajouter « CC6 » à raison de 0,2-0,3 %.

Des additions de savon alcalin peuvent être employées à raison de 0,2 à 0,3 % pour la consolidation des éléments extérieurs des bâtiments et des parties de maçonnerie qui se refroidissent rapidement en hiver (par exemple, des colonnes et des parapets).

En cas d'application de poudre d'aluminium (à raison de 1 g par kg de ciment) et pour mieux fixer les bulles d'hydrogène, il est indispensable d'ajouter de la chaux en pâte (de 10 à 15 %) ou du sel sodique d'acide abiétique (de 0,2 à 0,3 %) améliorant l'adhésion de la solution d'injection.

L'emploi du chlorure de calcium comme accélérateur de prise des mortiers de ciment n'est pas conseillé parce que ces additions favorisent l'apparition de sels à la surface des maçonneries. L'emploi de pareilles additions ne se justifie que pour la consolidation d'urgence des constructions risquant de s'effondrer.

7. EXECUTION DES TRAVAUX

L'injection des solutions dans les fissures de la maçonnerie sans le percement de trous et le scellement de tubes est facilement réalisable à l'aide d'injecteurs appropriés (fig. 3) proposés par l'auteur de la présente communication. Ces injecteurs sont apparus dans la période d'après-guerre pour la consolidation des monuments d'architecture à Moscou et dans d'autres villes de l'Union Soviétique.

Pour ce faire, on moule au-dessus des fissures une rosette en gypse ayant au fond une trouée à l'aide d'un poinçon en bois (fig. 4). Ensuite, après le badigeonnage des fissures, on serre l'injecteur contre la rosette. L'injecteur a une enveloppe en caoutchouc.

L'injection de la solution dans l'âme de la maçonnerie se fait au moyen d'une pompe. Pour l'exécution de ce travail, les pompes à bras, à diaphragme ou à piston conviennent le mieux.

Pour de larges fissures, on emploie des injecteurs de type conique pour lesquels des ouvertures sont formées dans la fissure même, mais dans la masse de la maçonnerie et non pas à sa surface (fig. 5).

L'alimentation en solution s'opère par des tuyaux de refoulement à clisse intérieure. La meilleure maniabilité est atteinte lorsque le diamètre des tuyaux n'excède pas 12 à 14 mm.

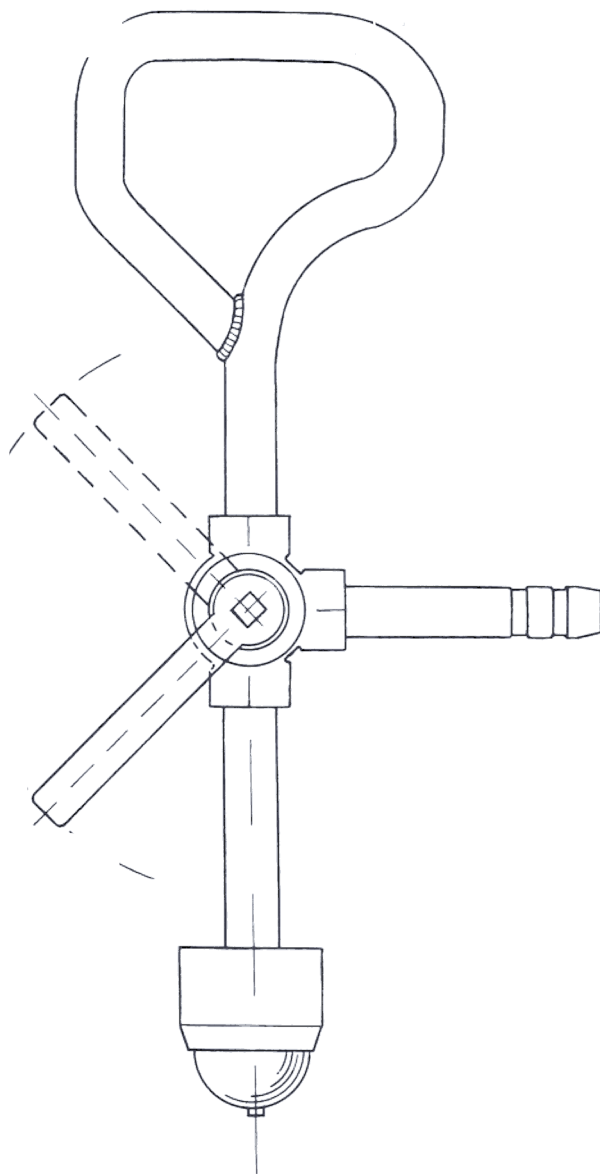


Fig. 3 Injecteur-presseur sphérique.

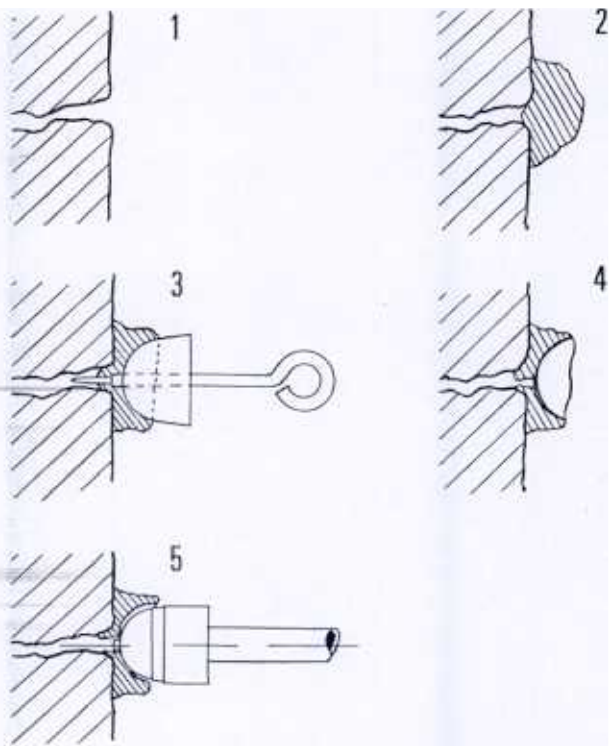


Fig. 4. — Pose de la rosette en gypse sur la fissure et appareil de moulage.

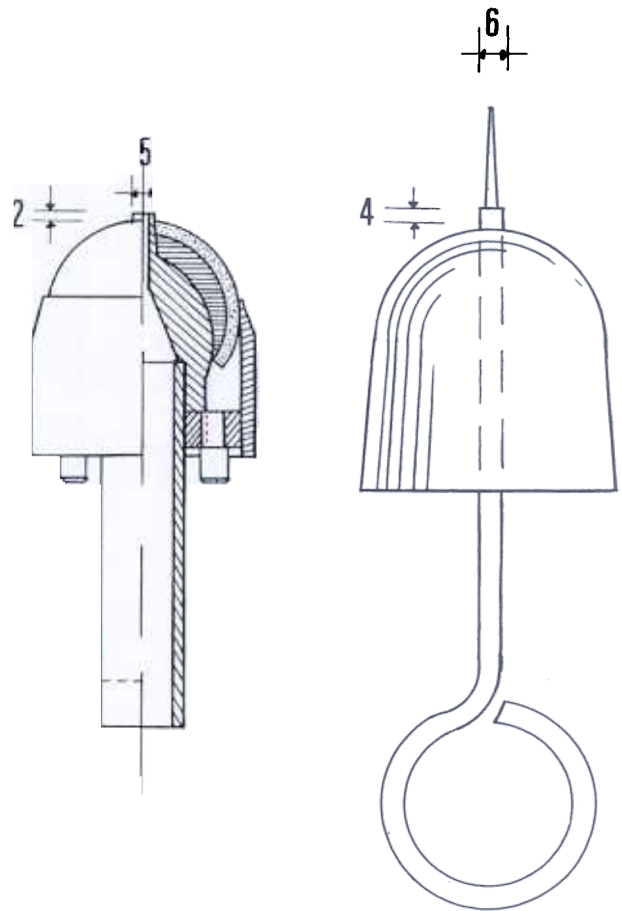
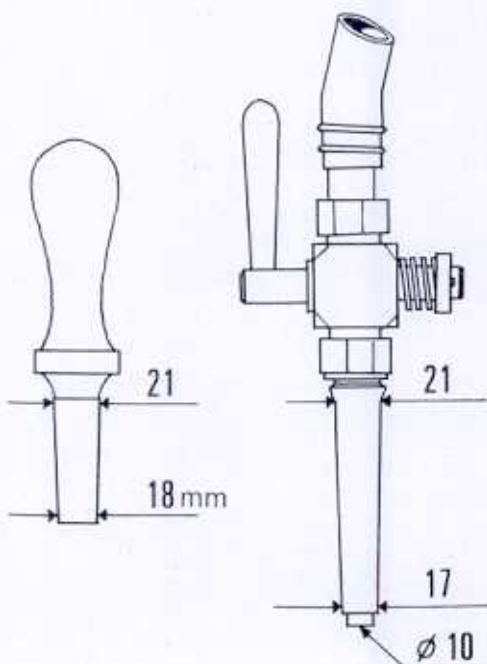


Fig. 5. Injeteur-presseur conique.





6. Rosettes moulées à la surface d'une maçonnerie.



Fig. 7. — Injection dans la maçonnerie d'une cathédrale ancienne de Russie.



Fig. 8. — Injection dans la maçonnerie d'un ancien pont du parc Nescoutchny à Moscou.

Avant le badigeonnage, les fissures sont nettoyées de la fine poussière. Cette opération est réalisée par l'air comprimé ou par le lavage à l'eau depuis les sections supérieures des fissures. L'espacement des rosettes doit être égal à 1,5 à 5 m; cet espacement est moindre pour des fissures étroites et supérieur pour des fissures larges. Avant l'injection, on humidifie la maçonnerie pour affaiblir son taux de rétention d'eau. Il ne faut pas oublier que la solution doit avoir une capacité de rétention de l'eau d'autant plus grande que la maçonnerie est plus sèche.

Si la maçonnerie est constituée de roche très dure (diabase ou granit), l'injection des solutions à base de chaux en pâte n'exige pas d'humidification préalable de la maçonnerie.

Une solution d'injection préparée est filtrée par une grille métallique à trous de 1,0-1,5 mm.

La consistance de la solution, c'est-à-dire le rapport eau - ciment, doit être de l'ordre de 1 : 6 à 1 : 1 et même à 1 : 0,7. Les solutions plus liquides sont injectées au début de chaque opération. Pour des fissures larges de 10 à 15 mm et plus, il faut employer des solutions plus denses ayant un rapport eau - ciment de 1 : 2 à 1 : 3 et plus.

Il est conseillé d'entamer l'injection dans les sections inférieures de la maçonnerie sous la pression de 0,5

à 1,0 at. Cette pression est portée jusqu'à 3 ou 4 at. L'injection répétée se fait avec des intervalles de 20 à 30 minutes. Après une pause de 2 heures, l'injection ne peut être reprise qu'après 12 heures.

La solution à injecter doit être continuellement mélangée dans le réservoir d'alimentation à l'aide d'un mélangeur électrique à hélice. L'injection se fait à plusieurs reprises jusqu'à disparition complète de la solution au sein de la maçonnerie. En règle générale, l'effet est acquis après deux ou trois répétitions.

Les interruptions de travail requièrent un nettoyage sérieux de la pompe et des tuyaux pour en éliminer les dépôts de solution. Il est préférable de les nettoyer par un soufflage d'air comprimé et de les suspendre ensuite par leur milieu afin d'autoriser un écoulement normal du reste de la solution et de l'eau.

Des procédés fondés sur l'expérience et les recherches conduites en laboratoire ont été le substrat des recommandations proposées dans la présente communication; des exemples en sont fournis par les figures 6, 7 et 8. Des revues soviétiques et bulgares ont publié plusieurs articles sur ce sujet.

N. ZVORIKINE
(Moscou).

SUMMARY

The article dealing with « The Strengthening of Architectural Monuments by Injection into the Masonry » treats the problems connected with the execution of this work in ancient monuments.

In particular, it is concerned with the requirements for the solutions used in variable conditions for the elements of the masonry of monuments.

Besides the requirements of perfect fluidity and of good adhesion to the material of the masonry, great attention is paid to all of the physical and mechanical characteristics of the injection solutions and of the masonry.

Fig. 1. — Apparatus for determining the size of the vacuum during the absorption of water by stone.

Fig. 2. — Graph of the sucking of the water of solutions without a differentiated vacuum.

*A. Composition of the integral parts : cement and water at 50/50.
B. Composition of the integral parts : cement, clay and water at 45/5/50.*

(The figures ending the curves express the mm. Hg. under vacuum).

Fig. 3. — Spherical injector-presser.

Requirements concerning the necessity of excluding any possibility of the appearance of salts on the surface of the masonry are taken into account, especially where there are frescoes or distemper paintings. Laboratory research is briefly described. The results of this research is the basis for the recommendations proposed by the author of this article.

The recommendations concerning the execution of the work indicate the very simple procedures and equipment which permit injection within the fissures of the masonry, without new holes and without visible traces on the surface of the masonry.

Fig. 4. — Placing the « rosette » on the fissure and grinding apparatus.

Fig. 5. — Conical injector-presser.

Fig. 6. — Ground « rosette » on the surface of a masonry.

Fig. 7. — Injection into the masonry of an old Russian cathedral.

Fig. 8. — Injection into the masonry of an old bridge in Nescouchny Park in Moscow.