

Manuel de sensibilisation
à la restauration de la

MAÇONNERIE



Ministère de la Culture
et de la Communication

Direction de l'Architecture
et du Patrimoine

Mission Ingénierie
et Références Techniques

Ministère de la culture et de la communication

Direction de l'Architecture et du Patrimoine

Sous-direction des monuments historiques et des espaces protégés

Mission Ingénierie et Références Techniques

Manuel de sensibilisation à la restauration de

LA MAÇONNERIE

Ce manuel a été élaboré par Patrice de Brandois(t) et Florence Babics, Architectes du Patrimoine. Il s'inspire du guide de maîtrise d'ouvrage et de maîtrise d'œuvre des ouvrages de maçonnerie. Les auteurs remercient Philippe Bromblet du laboratoire de recherches des monuments historiques Jeannie Meyer du centre de recherche des monuments historiques pour leur participation.

Nous remercions également le groupement français des entreprises de restauration des monuments historiques (GMH), la confédération de l'artisanat et des petites entreprises du bâtiment (CAPEB), l'école d'Avignon, le laboratoire de recherche des monuments historiques (LRMH), et le centre de recherche des monuments historiques (CRMH) pour les photographies qu'ils ont bien voulu nous communiquer.

AVANT-PROPOS

Le Manuel de sensibilisation à la restauration de la maçonnerie est destiné à attirer l'attention des intervenants sur les monuments historiques concernant les précautions à prendre lors des restaurations les plus courantes.

Il comporte un historique sommaire des techniques de construction, la composition des matériaux et les écueils à éviter lors de leur mise en œuvre. Il ne traite pas de la réglementation en vigueur, notamment vis à vis des dispositifs de sécurité à mettre en place sur les chantiers. Il ne constitue pas non plus un relevé exhaustif des normes en vigueur en matière de construction. A cette occasion, il convient de noter que nombre de normes ne sont pas adaptées aux problèmes spécifiques du bâti existant et qu'une démarche méthodologique normalisée serait plus adaptée à ces cas, tous particuliers.

Ce document s'adresse aux maîtres d'ouvrage concernés par les travaux sur les édifices protégés, voire sur le patrimoine en général. En effet, l'attention nécessaire aux modifications susceptibles d'altérer les qualités esthétiques ou structurales des monuments historiques est applicable à tout élément bâti intéressant. Ajoutons que cet aperçu des différentes techniques de maçonnerie a semblé particulièrement opportun dans le cadre de la décentralisation.

Il a été développé à partir du Guide de maîtrise d'ouvrage et de maîtrise d'œuvre sur la maçonnerie, réalisé grâce à l'expérience de l'ensemble de nos partenaires sur les édifices protégés : historiens, architectes, entrepreneurs, que nous remercions pour leur contribution sans laquelle ce travail n'aurait pu être réalisé.

Souhaitons que cet ouvrage puisse faire comprendre l'intérêt de connaître la conception d'origine et les apports successifs de l'évolution du bâtiment ancien et la nécessité de leur prise en compte pour une intégration adéquate de l'intervention programmée.

SOMMAIRE

	page
Avant-propos	3
■ CHAPITRE 1 – OUVRAGES DE TERRASSEMENT	6
DISPOSITIONS RELATIVES À L'HYGIÈNE ET LA SÉCURITÉ	6
DISPOSITIONS PARTICULIÈRES RELATIVES AUX FOUILLES ARCHÉOLOGIQUES	6
■ CHAPITRE 2 – ASSÈCHEMENT DES MAÇONNERIES	7
PRÉAMBULE	7
LES DIVERSES SOURCES D'HUMIDITÉ	7
LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES D'ASSÈCHEMENT	7
1 - Cas de l'humidité ascensionnelle en provenance du sol	7
2 - Cas de l'humidité provoquée par les infiltrations d'eau de pluie	13
3 - Cas des condensations	15
4 - Cas de l'humidité accidentelle	15
LE TRAITEMENT DES ALGUES ET MOUSSES	16
■ CHAPITRE 3 – TYPES DE MAÇONNERIES	17
LES MAÇONNERIES DE MOELLONS	17
1 - Montage des murs	19
2 - Rejointement des maçonneries anciennes	20
3 - Confortations internes de maçonneries par injection de coulis	21
LES MAÇONNERIES DE BRIQUE	25
1 - Historique	25
2 - Différentes caractéristiques régionales	27
3 - Système constructif "briques et pierres"	29
4 - Techniques de façonnage et cuisson	30
5 - Principaux constituants de la brique et caractéristiques chimiques	31
6 - Mortiers	32
7 - Joints	33
8 - Ragréage	33
PATHOLOGIES DES MAÇONNERIES EN BRIQUE	34
1 - Mortiers	34
2 - Brique	34
DIAGNOSTIC ET RESTAURATION DES MAÇONNERIES DE BRIQUE	35
1 - Injection de coulis	36
2 - Traitements de surface	36
3 - Rejointoiement	36
4 - Hydrofugation	36
5 - Sablage	37
6 - Nettoyage par micro-sablage et hydrogommage	37
7 - Comblement de zones manquantes	37
8 - Remplacement de brique	37
LES COLOMBAGES OU PANS DE BOIS	37
1 - Éléments constitutifs	39
2 - Capacité portante et dimensionnement	41
3 - Diagnostic	42
4 - Restauration des pans de bois	43

LA CONSTRUCTION EN TERRE	45
1 - Définition	45
2 - Mise en œuvre du coffrage	46
3 - Construction des murs en pisés	47
4 - Construction des murs en masse	50
■ CHAPITRE 4 – LES MORTIERS	52
LES SABLES ET GRANULATS	52
LES LIANTS	54
1 - Chaux	54
2 - Plâtres	58
3 - Ciments	59
4 - Eau	61
5 - Produits d'ajout	61
6 - Adjuvants	62
7 - Matériaux non normalisés	62
■ CHAPITRE 5 – LES ENDUITS	63
COMPOSITION ET MISE EN ŒUVRE DES ENDUITS	63
1 - Exécution de la première couche d'enduit ou gobetis ou couche d'accrochage	65
2 - Exécution de la deuxième ou corps d'enduit ou dégrossi	66
3 - Couche de finition	67
LES DIFFERENTS TYPES D'ENDUITS ET DE FINITION	69
EXECUTION DES ENDUITS A DEUX COUCHES	73
ENDUITS AU MORTIER DE PLATRE ET PLATRE-ET-CHAUX	73
1 - Composition du mortier	74
2 - Mise en œuvre	74
3 - Protection des enduits	75
CONTROLE DE LA QUALITE DES ENDUITS EXECUTES	77
LES ENDUITS INTERIEURS	77
REFECTION ET RESTAURATION DES ENDUITS	77
1 - Analyses préalables et préparation des supports	77
2 - Reconnaissance de l'état existant du support et de l'enduit	77
3 - Réfection totale d'un enduit	80
4 - Réfection partielle d'un enduit lacunaire	82
5 - Consolidation d'un enduit ancien altéré	83
6 - Données à connaître sur les produits utilisés	84
7 - Vérification de la consolidation de l'enduit ancien	84
LES BADIGEONS ET LAITS DE CHAUX	85
1 - Matériaux constitutifs	86
2 - Supports	87
3 - Techniques de mise en œuvre	87
GLOSSAIRE	88
BIBLIOGRAPHIE	90

Chapitre 1

OUVRAGES DE TERRASSEMENT

Par ouvrage de terrassement, on entend l'ensemble des travaux destinés à modifier, de façon provisoire ou définitive, la forme d'un terrain dans le but d'y installer une construction ou tout autre ouvrage. Le déblai ou remblai de terres, le creusement de trous ou tranchées, et même le décapage de terrains sont des terrassements.

Préalablement à la réalisation d'un ouvrage de terrassement, il convient de prendre un certain nombre de dispositions et d'obtenir toutes les autorisations nécessaires.

■ DISPOSITIONS RELATIVES À L'HYGIÈNE ET LA SÉCURITÉ

Le Décret du 8 Janvier 1965, relatif aux mesures générales d'hygiène et de logement provisoire des travailleurs à respecter sur les installations de chantier doit être respecté.

L'emprise du chantier doit être délimitée au moyen de clôtures, palissades et autres éléments agréés, et les zones excavées doivent être balisées par des garde-corps.

Pendant la durée des travaux, des dispositifs assurant la stabilité des coupes de terrain et protégeant les éléments architecturaux doivent être installés.

[Ne pas entreprendre de travaux sans avoir acquis une bonne connaissance du terrain (nature et résistance du sous-sol, plan de récolement des réseaux, etc...).

■ DISPOSITIONS PARTICULIÈRES RELATIVES AUX FOUILLES ARCHÉOLOGIQUES

Les fouilles archéologiques ne peuvent être entreprises qu'après avis accordé par l'Etat, et s'exercent dans le cadre des Lois du 27 septembre 1941 et du 17 janvier 2001.

Il existe principalement deux modes de réalisation de fouilles archéologiques :

- 1- **les opérations d'archéologie préventive**, qui sont prescrites préalablement à l'aménagement de sites lorsque des travaux, publics ou privés sont susceptibles d'affecter le patrimoine archéologique.
- 2- **les opérations d'archéologie programmée**, qui sont motivées par des objectifs de recherche scientifique indépendants de toute menace pesant sur un gisement archéologique.

Lorsque des travaux concernent le sous-sol d'un monument susceptible de comporter un intérêt archéologique (une église, par exemple), ou de ses abords, il faut en aviser préalablement le Service Régional de l'Archéologie et lui fournir un dossier du projet, avec descriptif et plans des travaux envisagés.

Cas de découverte fortuite

Les découvertes dites "fortuites" demeurent régies par la loi du 27 septembre 1941 : elle oblige tout découvreur à en faire la déclaration auprès du maire de la commune. Celui-ci doit alors prévenir le Préfet, qui saisit le Service Régional de l'Archéologie. En cas de découverte de vestiges archéologiques mobiliers ou immobiliers pendant des travaux, le Service Régional de l'Archéologie examinera avec le Maître de l'ouvrage, dans les plus brefs délais, les mesures à prendre pour permettre l'étude ou la conservation des vestiges en respectant au mieux la poursuite des travaux.

L'administration dispose à cet effet d'un droit de visite sur les propriétés privées.

Chapitre 2

ASSÈCHEMENT DES MAÇONNERIES

■ PRÉAMBULE

Rappelons que l'humidité dans les matériaux est l'une des principales causes de dégradation d'un bâtiment : gonflements et pourrissement des bois, cristallisation saline, gonflement des plâtres, oxydation des métaux, développement d'organismes cryptogamiques* parasites tels que mousses et moisissures, formations de salpêtre, etc... qui sont autant de facteurs de destruction, plus ou moins rapides, des composants d'un édifice.

Il convient donc de lutter contre ce phénomène par la mise en œuvre de techniques visant à l'éliminer et à empêcher son retour.

Nous étudierons ici le problème spécifique de **l'humidité dans les maçonneries** – à l'exception des maçonneries immergées – et les moyens d'y remédier.

■ LES DIVERSES SOURCES D'HUMIDITE

On recense essentiellement quatre types d'humidité :

- 1- l'humidité ascensionnelle en provenance du sol
- 2- les infiltrations d'eau de pluie à travers les murs
- 3- la condensation de l'humidité contenue dans l'air
- 4- l'humidité d'origine accidentelle (liée par exemple à une rupture de canalisation d'eau, à une fuite de gouttière, etc.)

Une cinquième cause d'humidité est celle de l'eau de construction, mais il s'agit là d'un phénomène marginal dans la restauration des monuments anciens.

Il n'est pas rare que certaines sources d'humidité se combinent entre elles :

Il convient donc, avant toute préconisation d'un traitement d'assèchement, de procéder à un diagnostic précis et complet qui permettra d'identifier la ou les origines de l'humidité.

■ LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES D'ASSECHEMENT

Quel que soit le cas, il faut savoir être patient quant aux résultats attendus ; le délai d'assèchement d'une maçonnerie est en général très long : de l'ordre de plusieurs mois.

1°. CAS DE L'HUMIDITE ASCENSIONNELLE EN PROVENANCE DU SOL

Il s'agit de l'humidité contenue dans le sol et remontant par capillarité dans les maçonneries des murs et dans les dallages.

Cette humidité peut provenir :

- soit d'eaux circulant en surface ou dans les couches superficielles du sol, d'origines diverses mais localisables au niveau du diagnostic : eaux de ruissellement, sources, canalisations enterrées rompues, etc.
- soit de la nappe phréatique, lorsque celle-ci se trouve à faible profondeur,
- soit d'eaux baignant le pied des bâtiments telles que douves, cours d'eau, lac ou autres étangs. Les remèdes à apporter sont alors les mêmes que ceux utilisés pour lutter contre les remontées dues à la nappe phréatique.

A. Lutter contre les infiltrations latérales dues aux eaux superficielles

La solution idéale est de réussir à tarir la source d'humidité : dans ce cas, le problème sera facilement réglé.

Citons à titre d'exemple, le captage d'une source ou la réparation d'une canalisation.

a. interception des eaux superficielles

Si la source d'humidité ne peut être tarie, il faudra mettre en œuvre des procédés permettant d'intercepter les eaux superficielles avant qu'elles n'atteignent les fondations et les murs.

Ces procédés sont tous basés sur le même principe : le creusement d'une tranchée d'interception des eaux.

Il pourra parfois s'agir d'une simple tranchée ouverte permettant de dégager la base de murs enterrés par des remblais inopportuns.

Mais, le plus souvent, la tranchée devra être d'une profondeur telle qu'il sera impossible de la laisser ouverte.

Il sera alors possible de la couvrir, en créant une galerie périphérique qu'il faudra ventiler convenablement par des grilles judicieusement réparties.

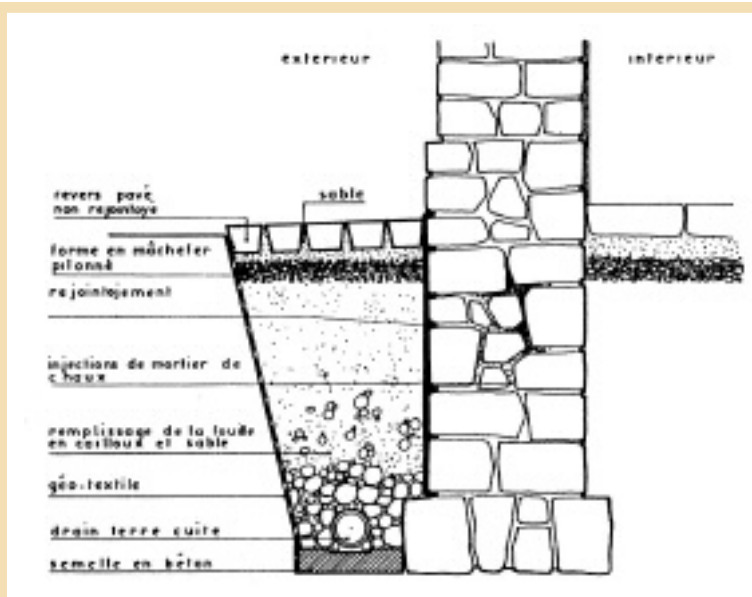
C'est une solution efficace, qui a aussi l'avantage d'assainir – au moins partiellement – par évaporation, les éventuelles remontées capillaires. Mais c'est une solution onéreuse, et les grilles d'aération peuvent parfois être gênantes sur le plan esthétique.

b. réalisation d'un drainage

La méthode la plus classique consiste à réaliser un drainage au pied de la maçonnerie ou à faible distance.

On commence par terrasser le long du mur à assainir, au maximum jusqu'au niveau des fondations. La partie du mur alors dégagée, est rejointoyée, si nécessaire, avec un mortier de chaux hydraulique naturelle. Le cas échéant, une semelle de béton est coulée en fond de fouille au niveau des fondations, un drain – tuyau perforé, en PVC, ou en poterie – est posé, sur toute la longueur du mur, avec un regard à chaque changement de direction.

Coupe sur drainage



Puis, la fouille est comblée de cailloux, de gravillons et de sable propre, après qu'elle ait été préalablement tapissée d'un géotextile empêchant la terre d'infiltrer et de colmater l'ensemble du drainage.

En finition superficielle, on remettra, suivant les cas, de la terre végétale, un gravillonnage ou un revers pavé non jointoyé.

Toute application sur la surface des murs, avant comblement, d'un enduit microporeux à base de résine, imperméable à l'eau mais perméable à la vapeur d'eau doit être étudiée soigneusement, car elle n'est pas sans risque.

CONSEILS DE PRUDENCE

- ne pas mettre en œuvre une finition de surface en pavage rejointoyé car l'eau de pluie rejaillirait sur les parements,
- ne jamais poser le drain au-dessous du niveau des fondations, car il risquerait d'assécher le sol de fondations, d'en changer la consistance, et de provoquer ainsi des désordres,
- assurer un exutoire au drainage, situé en contrebas de celui-ci. Il est possible d'avoir recours à des pompes de relevage, mais il s'agit là d'une solution à éviter, car d'une surveillance et d'un entretien par trop contraignants,
- éviter les prescriptions du DTU 20.11 concernant l'exécution d'un enduit étanche sur la paroi enterrée d'une construction neuve. Il est en effet indispensable qu'une maçonnerie ancienne puisse respirer, aussi bien pour permettre l'évacuation de l'eau emmagasinée avec le temps, que l'évaporation d'une éventuelle remontée d'humidité.

Dans le cas d'un mur avec contrefort, on réalisera le drainage au ras des contreforts, de façon à éviter la multiplication des regards qu'il convient d'installer à chaque changement de direction.

Variantes

Certaines variantes apportées à la technique traditionnelle du drainage consistent à intercaler, entre le mur et la terre dans laquelle il se trouve enterré, un bardage de plaques ondulées, des plaques de béton, ou des blocs drainants en béton poreux.

Une autre variante consiste à intercaler des nappes filtrantes constituées de deux matériaux accolés : un non tissé du côté des terres, une "bourre" de fibres synthétiques, d'environ 1 cm d'épaisseur le long des murs.

On peut toutefois se poser la question du bien-fondé de cette dernière solution, qui consiste à appliquer contre un mur à assainir, un matériau "humide".

En tout état de cause, ces variantes ont toutes pour inconvénient, la nécessité de créer un becquet de protection en tête, qui peut être difficile à réaliser sans nuire à l'esthétique du bâtiment.

La solution consiste alors à enterrer le becquet ou à la faire affleurer au niveau du terrain.

B • Lutter contre les remontées capillaires des eaux de la nappe phréatique ou d'eau baignant le pied des bâtiments

Là encore, diverses méthodes peuvent être employées : nous nous attachons aux procédés visant à mettre en œuvre une barrière étanche à la base des murs, et à ceux permettant d'évacuer l'eau contenue dans les murs.

a • mise en place d'une barrière étanche à la base des murs

Un premier procédé consiste à réaliser des saignées dans le mur, sur toute son épaisseur, et à y insérer un matériau étanche, en chape ou en feuilles. Cette insertion se fait par longueurs alternées successives de l'ordre de 80 cm, avec dans le cas d'utilisation de matériaux en feuille, un recouvrement d'une dizaine de cm collé ou soudé. La longueur de saignée est raccourcie dans les zones où il existe des concentrations de charges.

Ces saignées peuvent être réalisées soit par démontages d'une ou deux assises du mur, soit par sciage, à la scie circulaire, à la chaîne, ou à la scie à main.

Comme matériau d'insertion, on pourra utiliser :

- une chape étanche de mortier de ciment laitier avec hydrofuge ou de mortier de résine ou d'asphalte coulé, etc.
- un matériau en feuille : plomb de 2,5 mm d'épaisseur minimum, polyéthylène, feutre bitumé, etc.

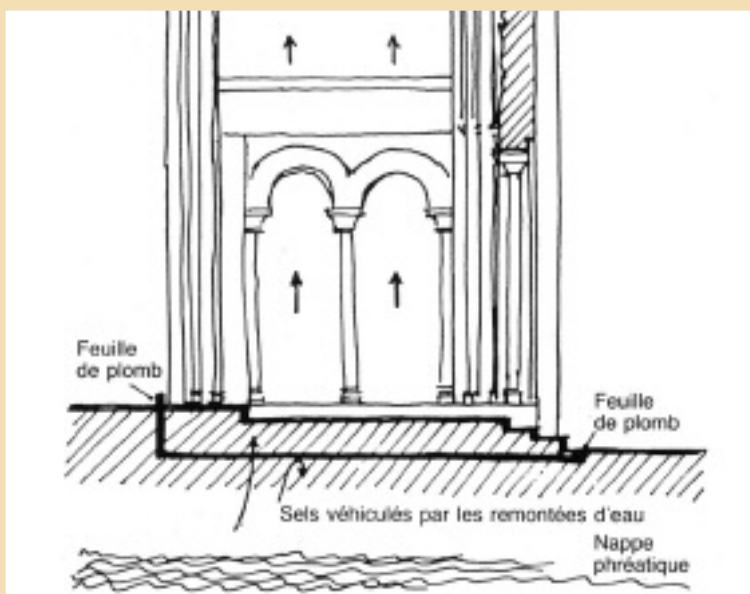
Les matériaux en feuille seront posés à sec, sur une chape de ciment lissée, après séchage de celle-ci et interposition, dans le cas d'une feuille de plomb (sous réserve que son utilisation reste autorisée), d'un matériau isolant ; en effet, le plomb, sous peine de désintégration dans le temps, ne doit jamais être mis en contact direct avec un mortier de chaux ou de ciment.

Inconvénients de cette méthode

- son caractère destructif
- les risques de tassement du matériau inséré
- les difficultés de mise en œuvre dans des murs épais
- son coût élevé

Ce procédé a été utilisé pour protéger les sculptures du portail de l'église de Moissac (Tarn et Garonne). Les pierres présentaient d'importantes altérations chimiques provoquées par les sels véhiculés par les remontées capillaires des eaux de la nappe phréatique, et se désagrégeaient peu à peu. La mise en œuvre d'une barrière en feuille de plomb a permis d'enrayer ce phénomène.

Interposition d'une feuille de plomb



b. injection de produit imperméabilisant

Une autre solution consiste à injecter, par gravité ou sous faible pression, des produits imperméabilisants à la base des murs, tels que gels acrylamides, résines époxydes, silicones, méthylsiliconates, stéarates d'aluminium, etc... Ces produits se diffusent dans les maçonneries par capillarité, et polymérisent en six mois environ, formant un écran imperméable à l'eau.

Mise en œuvre :

- Percement de trous de diamètre de 2,5 cm, à l'espacement d'environ 15 cm, de part et d'autre du mur, de profondeur variant en fonction de l'épaisseur de ce dernier.
- Injection du produit, soit par gravité à l'aide de tubes métalliques perforés et coudés, reliés à un réservoir contenant le produit à injecter, soit sous pression, chaque trou étant relié par une canalisation à une pompe permettant d'injecter le produit.
Dans les maçonneries de pierre, il faut injecter de préférence dans les joints.

Ce procédé donne de bons résultats dans les maçonneries de briques.

Le résultat escompté ne pourra être obtenu que si ont bien été prises en compte :

- les caractéristiques de capillarité des matériaux à injecter,
- l'adéquation à ces caractéristiques du produit à injecter (composition chimique, viscosité, vitesse de polymérisation, etc...)
- l'adéquation de la technique de mise en œuvre : emplacement, diamètre, profondeur et espacement des trous, quantité de produit à injecter, durée d'injection, pression éventuelle.
- La capacité du support à recevoir ce traitement.

Cela suppose que l'on ne s'adresse qu'à des entreprises hautement qualifiées.

CONSEILS DE PRUDENCE

Avant toute mise en œuvre, procéder à un essai sur une partie de mur à traiter, et attendre quelques mois pour juger du résultat.
Ne pas oublier de bien limiter la zone à traiter par deux lignes verticales d'injection, pour éviter la contamination latérale d'humidité.

C. Évacuation de l'eau contenue dans les murs

a. l'électro-osmose

Il s'agit d'une méthode basée sur l'utilisation des tensions électriques pour faire migrer l'eau en sens inverse de la remontée capillaire. C'est au 19ème siècle que l'on découvrit qu'en soumettant à une tension électrique un corps poreux saturé d'eau, il était possible de faire se déplacer le liquide de l'anode (pôle +) vers la cathode (pôle -).

En 1940, P. ERNST fit breveter un dispositif d'assèchement des murs basé sur ce phénomène d'électro-osmose : une différence de potentiel est créée entre le mur humide et le sol, le mur étant le pôle + et le sol, le pôle -.

Pour ce faire, on crée une pile électrique en utilisant des métaux différents - ou plus récemment des fibres de carbone - disposés de la façon suivante : dans le sol, des blocs de magnésium reliés par un fil de cuivre formant cathode et, dans le mur humide, des fils de cuivre, espacés de 30 à 50 cm, reliés eux aussi par un fil de cuivre, formant anode. La différence de

potentiel créée est de l'ordre de 1 volt et serait suffisante pour faire cheminer l'eau vers la base du mur.

Il convient toutefois de noter que son utilisation est impossible si la résistance électrique de sol est trop élevée, ainsi que s'il existe dans le sol des courants vagabonds, risquant d'inverser le sens de passage du courant mur-sol.

L'inconvénient majeur de cette méthode est qu'elle nécessite l'exécution d'une engravure importante et de nombreux percements, ce qui rend difficile son utilisation dans une maçonnerie de pierres apparentes.

Cette méthode – dite électro-osmose "passive" – a été améliorée en interposant une batterie, produisant un courant continu de l'ordre de 2 volts environ, entre la prise de terre et les conducteurs engravés dans le mur. C'est la méthode dite "active".

Ces divers procédés d'électro-osmose ont connu des fortunes diverses : des échecs, comme au musée du Jeu de Paume à Paris, mais aussi des réussites, comme au château de LAXENBURG, en Autriche.

En l'état actuel des connaissances, ce n'est donc pas un système totalement fiable.

Une variante de la "méthode active" a été mise au point, dans laquelle le sol n'est pas sollicité. Ce procédé consiste à forer, sur une ligne horizontale, une suite d'électrodes dans le mur à assainir, en alternant cathodes et anodes, soit de part et d'autre de la maçonnerie, soit sur la même face.

Ces électrodes sont alternées en courant continu, les anodes étant des barres en acier doux, en cuivre ou en aluminium, et les cathodes, des tuyaux perforés de matériaux identiques – l'eau migrant des anodes vers les cathodes est recueillie et évacuée par celles-ci.

Il faut n'utiliser que des courants de faible intensité – de 0,1 à 1,00 A/m³.

Des intensités supérieures pourraient provoquer un chauffage des maçonneries, et par voie de conséquence, l'apparition d'efflorescences.

b. l'électro-osmose – phorèse

Les divers procédés d'électro-osmose présentent tous l'inconvénient majeur de nécessiter un entretien et une surveillance constante : dès que, pour une raison accidentelle ou autre, le courant s'interrompt, l'humidité réapparaît. On a donc imaginé un procédé qui complète les effets de l'électro-osmose par ceux du phénomène d'électro-phorèse, c'est à dire, du mouvement de particules en suspension dans un liquide qui, sous l'action d'un champ électrique, se déplacent du pôle + vers le pôle -.

On comprend aisément que si, dans un système d'électro-osmose classique avec terre en pôle – et mur humide en pôle +, l'on injecte dans les trous où se trouvent les électrodes du mur, un produit de phorèse contenant des particules métalliques en suspension, celles-ci vont migrer, avec l'eau de l'humidité du mur, vers la terre (pôle -), et dans ce mouvement, colmater les capillaires des maçonneries.

On aura ainsi, après une durée d'un an et demi à deux ans – si toutefois, l'électro-osmose fonctionne normalement – créé à la base du mur, une barrière étanche, et le système d'électro-osmose pourra être déposé.

Il semble que cette technique ait donné de bons résultats en Autriche, en Allemagne et en Suisse. En France également, mais elle n'est pas utilisée suffisamment longtemps pour que l'on puisse juger avec sûreté de l'efficacité réelle du système.

c. l'assèchement électronique des murs

Son principe consiste, à l'aide d'un appareil composé de "circuits électroniques passifs" à inverser les champs électromagnétiques existants dans un bâtiment soumis à des remontées capillaires d'humidité, et par-là, à inverser le sens de celles-ci, comme dans l'électro-osmose.

Cet appareil fonctionne sans qu'il soit nécessaire de le relier aux maçonneries, et donc sans agression sur ces dernières.

Il s'agit là d'un système récent qui n'a pas encore fait l'objet de suffisamment d'applications pour que l'on puisse juger de son efficacité.

Seul l'avenir dira s'il s'agit là d'une solution "miracle"...

d. les siphons atmosphériques

Cette méthode, très en vogue jusque dans les années '70, a montré son inefficacité depuis, voire sa nocivité (perforations multiples des parois), et a été abandonnée.

Elle consistait à sceller à la base des murs à traiter et par assises horizontales, des siphons en poterie, appelés "siphons atmosphériques" dont le fonctionnement théorique était le suivant :

Ces siphons "pompaient" l'humidité du mur, l'air à l'intérieur du siphon se chargeait d'humidité par l'évaporation des parois, et devenu plus lourd, s'écoulait à l'extérieur en faisant place à une nouvelle quantité d'air sec, et ainsi de suite jusqu'à complet épuisement de l'humidité.

Après essais contrôlés sur des murs expérimentaux, ce procédé s'est révélé inefficace et les siphons atmosphériques mis en place à Versailles ou au Louvre dans les années '30 ont été déposés.

2°. CAS DE L'HUMIDITE PROVOQUEE PAR LES INFILTRATIONS D'EAU DE PLUIE

La pluie frappe contre les parois des murs et pénètre dans ceux-ci, les murs exposés aux vents dominants étant les plus vulnérables.

Cette action est aggravée en bord de mer, car la pluie chargée d'embruns dépose du sel sur les maçonneries ; celles-ci deviennent alors hydrophiles et retiennent l'eau : les murs sont alors constamment humides.

Un diagnostic précis des parois à traiter s'impose afin de déterminer l'origine exacte de la fuite, son étendue, et la raison pour laquelle l'étanchéité du mur n'est pas assurée.

Selon le résultat du diagnostic, les techniques à utiliser seront différentes, adaptées à chaque cas.

On peut citer :

- la reprise d'un jointoiement dégradé,
- la réfection d'un enduit n'assurant plus son rôle protecteur
- un remaillage ou des injections (mortiers, résines) pour colmater d'éventuelles fissures
- l'amélioration de l'imperméabilité de surface par l'application d'un repousseur d'eau ou "hydrofuge".

Mur humide dégradé



LES HYDROFUGES

Les produits hydrofuges sont des silicones, des résines fluorées ou des complexes organo-métalliques de métaux trivalents qui modifient la force qui s'oppose au mouillage.

Ces produits se présentent soit sous forme solvantée, soit en émulsion dans l'eau. Appliqués sur une surface, ils la rendent hydrophobes*. De ce fait, l'eau roule sur la paroi ainsi traitée sans pénétrer à l'intérieur de la pierre (effet perlant).

Un bon produit doit empêcher l'eau de pénétrer, mais impérativement permettre l'évaporation de la vapeur d'eau contenue à l'intérieur du mur et provenant soit des condensations, soit des remontées capillaires. Sinon, cette eau emprisonnée va dégrader la maçonnerie de l'intérieur. Les premiers hydrofuges, filmogènes*, sont aujourd'hui proscrits.

Il conviendra, avant tout traitement, de vérifier l'étanchéité des gouttières, chéneaux, descentes d'eaux pluviales et autres canalisations d'eau.

L'application se fait habituellement comme suit :

- préparation des fonds et le cas échéant, séchage ;
- application d'une première couche à la brosse ou au pulvérisateur suivant les produits, en utilisant le produit dilué selon les indications de la Fiche technique et le pourcentage de matière active dans le produit.

CONSEIL DE PRUDENCE

Ces produits étant relativement récents sur le marché, il convient d'être extrêmement prudent lors de leur préconisation, en raison du manque de recul sur leurs effets à long terme.

Des essais devront toujours être réalisés préalablement, sur une zone peu visible du bâtiment, afin d'observer notamment les modifications éventuelles de coloration du support (dans le cas de la pierre, par exemple). Mais il faut garder à l'esprit que ces essais ne sont pas réversibles.

Les restrictions et les préconisations d'application du fabricant seront scrupuleusement respectées.

3°. CAS DES CONDENSATIONS

Deux phénomènes sont à considérer selon qu'il s'agit des murs intérieurs ou des murs extérieurs.

Murs intérieurs :

Lorsqu'à un froid vif succède un temps tiède et humide, la vapeur se dépose sur les maçonneries qui n'ont pas eu le temps de se réchauffer et n'ont pas encore atteint la température ambiante.

En effet, à une température et à une pression déterminées, l'air ne peut contenir à l'état de vapeur, qu'une certaine quantité d'eau, définie par son poids par mètre cube d'air. Cette quantité d'eau diminue avec la température.

Si l'air ambiant se trouve brusquement refroidi, l'eau excédentaire que l'air ne peut plus retenir se condense en gouttelettes et se dépose sur les murs les plus froids.

Murs extérieurs :

En été, les gaz humides de l'atmosphère se déposent à la base des murs qui est la partie la plus froide.

En hiver, la terre refroidit moins vite que les murs extérieurs : les gaz humides remontant de la terre se déposent donc à la base des murs, là aussi.

Pour lutter contre ces condensations, on peut envisager, suivant les cas de :

- mettre en place une ventilation mécanique contrôlée,
- renforcer, par un doublage ventilé, l'isolation thermique des parois.
(ce procédé est le plus souvent impossible à réaliser dans un monument ancien pour des raisons esthétiques évidentes)
- mettre en œuvre un chauffage des locaux ou des murs.

4°. CAS DE L'HUMIDITÉ ACCIDENTELLE

Suite à un accident ou un défaut d'entretien, des ouvrages en toiture (chê-neaux, gouttières ou descentes), ou des canalisations (colonnes montantes, réseau de distribution encastré, chutes d'eaux usées, etc...) se mettent à fuir, parfois de façon insidieuse, non détectable immédiatement. L'eau pénètre alors dans les maçonneries et crée des désordres.

Un diagnostic précis des parois à traiter s'impose afin de déterminer avec certitude la cause et l'origine exacte de la fuite, ainsi que l' étendue des dégâts.

Après avoir remédié aux causes, la purge des éventuels éléments pourris et une bonne ventilation des zones touchées par la fuite viendra généralement à bout de l'humidité.

■ LE TRAITEMENT DES ALGUES ET DES MOUSSES

Dans certains cas, l'humidité, d'origines diverses, provoque la prolifération de mousses et d'algues sur les murs, du plus déplorable effet.

Pour lutter contre ces phénomènes, on peut employer les méthodes suivantes :

Une méthode ancienne consiste à traiter le mur avec de l'eau zinguée. Malheureusement le taux de concentration du zinc étant très faible, l'efficacité du traitement est de courte durée.

On obtient des résultats plus étendus en employant le naphthénate de zinc, ou d'autres produits tels qu'algicides ou fongicides, une solution aqueuse diluée de sels d'ammonium quaternaire.

Il convient d'arroser les murs à traiter, de préférence au début du printemps, avec une solution aqueuse d'ammonium quaternaire, produit qui présente l'avantage de ne pas contenir de composants corrosifs (phénol, iode, chlore, ou mercure).

Ce traitement arrêtant, mais ne supprimant pas, la végétation existante, il est possible de faire une application préalable de boue (épaisseur minimum 0,4 cm) formée d'Attapulgite contenant des concentrations de l'ordre de 0,5 % de Hyamine 1622 et de brosser légèrement après séchage.

Traitement chimique de pierres colonisées
par des mousses et des algues

Avant traitement



Après traitement



Chapitre 3

TYPES DE MAÇONNERIES

■ LES MAÇONNERIES DE MOELLONS

Dans nos pays, en dehors des constructions en bois, la pierre a été, jusqu'à l'apparition des matériaux actuels tels que le béton ou l'acier, le matériau de construction par excellence.

Les diverses caractéristiques des pierres, leur extraction, l'évolution de leur mise en œuvre aux différentes époques, ainsi que les maladies qui peuvent les atteindre, seront étudiées dans un autre ouvrage de la même collection, traitant essentiellement de la restauration des édifices en pierre de taille.



Moellons assisés - Bourgogne

Dans le cadre du présent volume, nous nous attacherons uniquement aux maçonneries de moellons, c'est à dire, aux maçonneries composées de blocs de pierre, bruts ou équarris, suffisamment petits pour être manipulés par un homme sans l'assistance d'un appareil de levage, et assemblés à l'aide d'un mortier.

Caractéristiques

Le choix des pierres est important, et s'effectue en fonction du type d'ouvrage à réaliser. Il est indispensable de connaître la provenance des moellons (carrières d'extraction), les caractéristiques géométriques auxquelles ils doivent satisfaire, ainsi que leur forme, leur couleur et leur texture.

Les caractéristiques des moellons mis en œuvre doivent pouvoir être contrôlées en référence à deux "échantillons limites" présentés au début du chantier.

Les moellons doivent être exempts des défauts suivants

- fils ou poils (matière terreuse en veines minces)
- moyes (matière terreuse remplissant des cavités)
- arêtes, pouffes (la pierre s'égrène à l'humidité ou sous le choc de l'outil)
- bousin (partie tendre interposée entre les lits de carrière)
- cendrules ou terrasses (fente ou cavité remplie d'une matière étrangère pulvérulente)
- clous (rognons très durs qui rendent la taille très difficile)
- fissures, pouvant être très fines, d'origine naturelle ou artificielle (usage de la poudre ou d'outils pneumatiques ou mécaniques suivant la nature de la pierre).

Moellon "Tête de chat" - Dordogne



Toutefois, certains de ces défauts peuvent être admis, s'ils sont connus ou existants dans le moellon d'origine et n'altèrent pas les caractéristiques prévues. Les particularités, telles que veinages, coquilles, géodes, crapauds, trous, nœuds, strates, verriers, oxydes et pyrites de fer, peuvent être aussi considérées comme acceptables si elles restent à un degré de simple différence de nuance.

Emploi des pierres calcaires par temps froid

Dans de nombreuses régions, les éclatements de la pierre dus au gel constituent les dégradations les plus importantes sur les bâtiments : elles résultent de l'expansion volumique de la glace.

En période de risque de gel, pour diminuer les risques de détérioration par le gel en période de froid, (d'octobre à mars inclus), les pierres calcaires livrées sur chantier doivent avoir une teneur en eau inférieure, ou au plus égale, à 75% de la teneur en eau critique définie par la norme NF.B.10.512.

Ces précautions ne concernent que les pierres calcaires.

Selon sa forme, sa taille ou son utilisation, le moellon est dit :

- assisé ou d'appareil : parfaitement équarri comme la pierre de taille en parallélépipèdes de 0,01 à 0,06 m³ aux cotes précises,
- de banc-franc, s'il s'agit d'un calcaire tendre qui ne convient guère que pour des murets et murs de clôture,
- bloqué, bourru, brut ou gisant : sans forme précise, il est utilisé surtout comme blocage dans l'épaisseur des murs et dans les massifs de fondations,
- clivé : s'il résulte du tranchage par clivage de pains de pierre sciés (on utilise une cliveuse, appareils de coupe à guillotine,
- en coupe : placé sur chant dans la construction d'une voûte, par opposition au moellon à plat qui est posé sur son lit,
- démaigri : si sa face arrière est moins large que sa face de parement,
- ébauché, ébousiné ou épiné : grossièrement taillé, mais comportant au moins une face de parement rectangulaire,
- éclaté, s'il résulte d'une taille grossière au pic, au marteau pneumatique ou à la masse,
- équarri : à peu près taillé en parallélépipède rectangle,
- lité : si ses faces de lit sont grossièrement taillées,
- piqué, smillé (ou esmillé) ou têtué : selon qu'il est taillé à la pointe (calcaire dur), à la smile ou au têt.

1°. MONTAGE DES MURS

Les murs en moellons sont les plus courants ; ils sont souvent en calcaire, facile à tailler, mais peuvent être réalisés avec toutes sortes de pierres.

La qualité de la maçonnerie dépend beaucoup de la pose et de la qualité du liant.

A • POSE DES MOELLONS "A BAIN SOUFFLANT" DE MORTIER

Les moellons sont posés sur un lit de mortier, bien serrés, de façon à ce que le mortier reflue en surface.

Il faut veiller à ce que les moellons soient convenablement humidifiés avant l'emploi, mais non ruisselants.

Ils doivent être bien enrobés afin qu'il n'y ait aucun contact direct entre eux ; les petits intervalles sont remplis de mortier et les plus importants sont garnis de cales de même nature que les moellons, de manière à obtenir une maçonnerie bien pleine.

Les moellons dits "de longue queue" alternent avec ceux de queue plus courte de façon à assurer une bonne liaison avec le reste de la maçonnerie.

Si les moellons sont destinés à être enduits, la maçonnerie est montée par assises sensiblement horizontales mais non réglées, sans souci d'une rectitude parfaite des lits.

Les joints verticaux sont décalés, autant que possible, et ne se prolongent jamais au-delà de deux hauteurs de moellons.

L'épaisseur des lits de mortier et des joints dépend des techniques régionales.

Lorsqu'il est prévu un jointoiement après coup, les joints sont dégarnis sur une profondeur de 3 à 6 cm, humidifiés, puis garnis au moyen d'un mortier adéquat.

Maçonnerie mixte de granit
et roches métamorphiques



B • POSE DES MOELLONS SUR CALES OU BAGUETTES

La pose est effectuée sur baguettes ou cales en bois blanc, humidifiées, réglées à l'épaisseur du joint ; les cales ou baguettes en chêne sont exclues, le tanin du chêne pouvant provoquer des taches et des coulures.

La couche de mortier étalée est plus épaisse que les baguettes et les cales, de façon à bien enrober le moellon.

Le moellon est posé sur le mortier et assujetti jusqu'à ce qu'il repose sur les baguettes ou les cales, qui sont retirées, au minimum, 24 heures après.

Si un jointolement est prévu après coup, on procède comme pour les moellons posés "à bain soufflant".

Surface de référence ou surface témoin

Si les moellons doivent rester apparents, on aura pris soin au préalable, de sélectionner une "surface de référence" d'appareillage et de parement existants.

S'il n'existe aucune surface à laquelle se référer, il faudra prévoir l'exécution d'une "surface témoin", afin de pouvoir juger de l'aspect obtenu.

Le mur ne sera monté qu'après acceptation de cette "surface témoin".

2°. REJOINTOLEMENT DES MAÇONNERIES ANCIENNES

Les joints des anciennes maçonneries en moellons doivent être débarrassés de toute trace de pollution (peinture éventuelle, plâtre, salissure, végétaux, etc.) et être dégarnis sur une profondeur de 3 à 6 cm.

Toutes les parties descellées, fissurées et friables doivent être éliminées.

Une fois dégarnis, les joints sont nettoyés soit à la brosse, soit à l'air comprimé, à une pression adaptée à la friabilité des moellons et des mortiers, puis humidifiés.

Le jointoiment n'est effectué qu'après présentation et acceptation par l'architecte d'une surface témoin.



Rejointement d'un mur

3°. CONFORTATIONS INTERNES DE MAÇONNERIE PAR INJECTION DE COULIS

La technique d'injection de coulis consiste à faire pénétrer au cœur des maçonneries un mortier, plus ou moins liquide, en confortement ou en remplacement du mortier de pose initial défectueux ou manquant. Ce procédé convient aussi bien aux maçonneries en élévation qu'aux fondations, pour un emploi localisé ou généralisé.

Objectif et intérêt

Le pourcentage de vides au cœur d'une maçonnerie ancienne est parfois important : il peut dater de l'origine de la construction ou avoir été aggravé au fil du temps et des intempéries, en particulier dans les ouvrages très exposés. Un apport de mortier par coulis d'injection permet de redonner une cohésion nouvelle aux maçonneries anciennes, et de leur restituer leurs propriétés mécaniques initiales, sans procéder à leur démontage. Elles peuvent ainsi conserver leur déformation et toute leur authenticité; à ce titre, l'injection de coulis peut être considérée comme un des outils de la restauration moderne, respectant les principes de la Charte de Venise.

Évolution de la technique d'injection

Vers 1840, lorsque débutent les premiers grands chantiers de restauration de monuments historiques, le seul procédé connu pour consolider des maçonneries fortement altérées est la dépose/reconstruction, avec les risques de modification délibérée que cela sous-entend.

A la fin du XIX^{ème} siècle, avec l'avènement du ciment armé, la consolidation sans dépose devient possible. Entre temps, l'expérience acquise sur les chantiers et le développement de l'archéologie ont fait évoluer la connaissance et émerger la notion d'authenticité.

Les premières injections consistent généralement à introduire du ciment dans les maçonneries affaiblies pour créer des zones "dures" devant se comporter comme des éléments structuraux enfouis dans la maçonnerie.

Au début du XX^{ème} siècle, les Allemands expérimentent à la cathédrale de Strasbourg des injections de ciment liquide sous pression. Les dégâts occasionnés par la 1^{ère} Guerre mondiale donnent un coup d'accélérateur à l'utilisation du ciment : on injecte jusqu'à 20 tonnes de ciment dans telle église de Caen, et à Reims, la pression d'injection est si forte que les assises de pierre sont rejetées vers l'extérieur ! Il faut attendre les années '40 pour voir évoluer la restauration vers des techniques plus légères.

C'est durant les vingt dernières années que la technique d'injection de coulis actuelle s'est affinée :

Vers 1980, le lavage préalable à l'eau des maçonneries internes est réservé aux cas particuliers, ainsi que l'injection sous forte pression.

Les deux décennies suivantes progressent principalement dans la composition des coulis et le choix des adjuvants, dans le but de s'accorder au mieux aux différents types de mortiers rencontrés.

Les déconvenues observées sur les maçonneries hourdées au plâtre incitent parallèlement à la mise au point de formules de coulis fluidifié à base de plâtre.

Des progrès importants sont également opérés dans les techniques de sondage non destructif permettant de repérer les faiblesses internes des maçonneries.

A • NATURE DES PRODUITS CONSTITUANT LES COULIS

Le choix des matériaux constitutifs du coulis est très important : il est défini à partir des études préliminaires. Le risque, en effet, est d'obtenir après injection, un mélange hétérogène constitué de l'ancien mortier d'une part, et du nouveau liant se présentant sous forme de blocs compacts et de filaments. Par ailleurs, la prise s'effectuant à l'intérieur des maçonneries, le temps de séchage est très long : les liants aériens (chaux grasse, argile) doivent donc être additionnés à des liants hydraulisés, suivant des pourcentages fixés au cas par cas.

Les liants utilisés pour la confection de coulis sont de 3 catégories

- la chaux de construction,
- le plâtre,
- sous certaines conditions, les ciments conformes à la norme NF P 15-301, ou les ciments spéciaux (par exemple : ciments finement broyés), additionnés à de l'eau de gâchage.

Peuvent également s'ajouter :

- des charges dont le rôle peut être d'expanser le coulis, de le rendre thixotrope, ou de s'opposer à sa décantation,
- des produits agissant sur les conditions de prise ou sur les performances finales (par exemple : addition des fumées de silice).

B • CARACTERISTIQUES DES COULIS

Les coulis doivent posséder les qualités suivantes :

1- facilité d'injection : le coulis doit rester fluide pendant toute la durée d'injection.

2- stabilité : le coulis doit effectuer le moins de retrait possible, être stable dans le temps et ne pas perdre ses caractéristiques mécaniques sous l'action d'agents extérieurs.

Mode et condition de pose

PRECAUTIONS A PRENDRE PREALABLEMENT A L'INJECTION

Il faut vérifier :

- l'étanchéité des joints entre les matériaux constitutifs de la maçonnerie, ou procéder à la réfection des joints, en réservant des trous de coulage et des événements,
- l'étanchéité et la bonne adhérence des enduits éventuels et, si besoin, mettre en place un platelage de maintien pour consolider les enduits fragiles à conserver (poussée hydrostatique),
- l'étanchéité de la base du mur à injecter pour éviter que le coulis ne s'infiltre et ne se perde dans le sol,
- la protection des ouvrages craignant l'humidité, l'injection provoquant un apport d'eau.

Pour les maçonneries très fragilisées ou instables, il faut :

- mettre en place des étalements avant le début des travaux d'injection car l'apport d'eau dans la fourrure par le coulis peut diminuer les liaisons internes, ce qui peut conduire à la ruine de l'ouvrage,
- remailler les fissures.

C • ETUDE PREALABLE D'INJECTABILITE

Toute confortation par injection doit faire l'objet d'une étude préalable d'injectabilité, adaptée aux objectifs. Cette étude comporte trois volets principaux :

- Identification de la maçonnerie existante
- Etude des coulis en laboratoire
- Epreuve de convenance sur chantier

a • Identification de la maçonnerie existante

Cette étude consiste à identifier les caractéristiques physico-chimiques des matériaux composant la maçonnerie dans toute son épaisseur (pierres de taille, moellons, briques, mais aussi les matériaux de remplissage, fourrure, mortier de pose, etc...).

La connaissance de la nature des liants composant le mortier en place permet de déterminer la formulation du coulis de confortation, afin d'éviter une incompatibilité entre matériaux. Ainsi, les maçonneries anciennes présentant des restes de plâtre interdisent l'injection de coulis à base de ciment.

Elle détermine aussi les dimensions respectives des murs, des matériaux de parements, des fourrures, des maçonneries de fondation, etc... afin d'estimer les volumes de vide à injecter.

b • formulation du ou des coulis en laboratoire

A partir de l'étude de la maçonnerie, les caractéristiques du ou des coulis sont définies : nature des liants, fluidité, maniabilité, retrait, etc.

L'étude en laboratoire permet de mettre au point le ou les coulis ayant les caractéristiques recherchées et compatibles avec la maçonnerie existante.

Il est notamment important d'éviter les risques de création de points durs à l'intérieur des maçonneries, préjudiciables à la stabilité de l'édifice et risquant

de perturber les échanges hygrométriques, avec des effets graves sur les enduits intérieurs et les peintures murales notamment (condensation).

c • Epreuve de convenance sur chantier

Cet essai consiste à réaliser une épreuve, bien délimitée, d'injection permettant de tester sur le chantier la composition du coulis mis au point par le laboratoire. Il permet d'affiner la composition du coulis, de préciser le maillage d'implantation des injecteurs et la pression d'injection, d'observer les résurgences de coulis par le sol ou par le parement, etc...

La pression d'injection doit en effet être adaptée à l'état de la maçonnerie : trop forte, elle peut déformer les parements, voire même ruiner la maçonnerie sous l'effet de la poussée hydrostatique; trop faible, elle ne permet pas au coulis de s'infiltrer efficacement dans la maçonnerie à consolider.

Les zones expérimentales sont ensuite contrôlées (par carottage, par mesure de vitesse de propagation du son, ou par auscultation au radar ou autre) pour juger de l'efficacité de l'injection et au besoin revoir certains paramètres.

Si les résultats sont favorables, on peut alors estimer plus précisément la quantité de coulis à injecter et évaluer son incidence sur la statique de l'édifice.

d • injection du ou des coulis

Pour l'injection du coulis, des trous sont réalisés dans les joints de maçonnerie, à espacement régulier, et des événements sont mis en place. A titre indicatif, l'espacement est égal, au maximum, à l'épaisseur de la maçonnerie.

L'injection se fait de préférence par gravité (injection gravitaire), ou sous faible pression (0.2 ou 0.3 MPa).

L'opération d'injection est effectuée par tronçons sur une hauteur maximale d'un mètre.

Pendant l'opération d'injection, il est nécessaire de mesurer la quantité de produit injecté par injecteur, la pression d'injection, le fonctionnement des événements et d'examiner la zone injectée et l'ouvrage pour déceler toute fuite ou déformation de la structure.

Des prélèvements sont effectués à la sortie des événements pour vérifier la qualité du coulis, en particulier la fluidité au cône de Marsh.

Le délai entre deux coulages doit correspondre au temps nécessaire à la prise du coulis déterminé par l'échantillon témoin.

e • contrôle de l'injection

Des contrôles sont systématiquement prévus avant les travaux de finition. Ils ont pour objectif de vérifier la cohésion du produit injecté par rapport au mortier en place, l'adhésion du coulis à la maçonnerie, et la conformité des propriétés entre les matériaux injectés et anciens.

Ils peuvent être réalisés par carottage (éventuellement complété par des essais mécaniques réalisés sur ces carottages), par examen endoscopique depuis le forage, par mesure de la vitesse de propagation du son avec comparaison à la valeur initiale, par auscultation au radar, ou par analyse chimique du coulis.

Afin d'obtenir des résultats probants, il est nécessaire de coupler les examens destructifs et non destructifs et de procéder à un contrôle de l'injection à plus long terme.

Exemple de problème de compatibilité entre la maçonnerie existante et le coulis injecté :

Eglise de Neauphle-le-Château

L'église Saint-Nicolas de Neauphle-le-Château a été érigée au XII^{ème} siècle, mais elle est surmontée d'une grosse tour né-gothique élevée en 1854. Construite de façon économique, celle-ci est composée de murs de faible épaisseur (35 à 40 cm), constitués pour moitié d'un parement extérieur en pierre de taille et d'une maçonnerie de moellons hourdée au plâtre gros, comme c'est souvent le cas en région parisienne.

En 1990, une importante campagne de restauration est lancée, comprenant notamment des travaux de confortement de la tour, dont la construction fragile a souffert au cours des décennies.

On procède à des changements de pierres, à la mise en place d'un chaînage en béton armé à la base de la tour, et surtout à des injections gravitaires de coulis de confortement des maçonneries. Ce coulis est fortement dosé en chaux XHA, c'est à dire chaux hydraulique artificielle, ou ciment.

Mais en 1994, d'importants désordres apparaissent sur la tour, fissurations, chutes de matériaux, basculement des pinacles, etc... Ces désordres s'intensifient au cours de l'hiver.

A l'issue de plusieurs expertises des désordres et analyses des mortiers, il est déterminé que la cause du sinistre provient de la production massive de sels de thaumasite provoquée par la réaction chimique entre le plâtre existant dans les maçonneries et le ciment du coulis, en présence d'humidité. Ces sels sont fortement gonflants, particulièrement à basse température, et poussent sur les maçonneries jusqu'à les fendre et les disloquer. Il est à noter que la chaux hydraulique naturelle opère une réaction identique.

La seule solution possible au problème a consisté à déposer entièrement la tour, à purger complètement les mortiers en cause, et à la remonter à l'identique, confortée par un chaînage en béton armé.

■ LES MACONNERIES DE BRIQUES

1°. HISTORIQUE

La brique est le fruit d'une longue évolution, qui prend sa source dans l'Orient méditerranéen dès le VIII^{ème} millénaire avant J.C., ce qui fait d'elle le plus ancien des produits "industriels".

C'est sur le site de Jéricho que l'on trouve, à cette époque, des constructions en boules d'argile séchées, qui, dès le millénaire suivant, commencent à être moulées dans leur forme parallélépipédique.

A Abydos, en haute Égypte, des parois en briques sont visibles dans une tombe princière du IV^{ème} millénaire avant J.C., soit un millénaire avant les premières constructions en pierre de Sakkhara.

L'idée d'appliquer à la brique les méthodes de cuisson employées pour la céramique depuis le néolithique ne voit le jour qu'à la fin du III^e millénaire, à Ur en Mésopotamie, où l'on trouve des briques cuites estampillées.

Ce sont les Romains qui généraliseront l'emploi de ce matériau, faisant une fois encore preuve de leur faculté à récupérer et à améliorer ce qu'ils découvraient d'intéressant dans les pays qu'ils soumettaient.

Introduite au sud de la péninsule, vers le V^e siècle avant J.C. par des colonies grecques, la brique s'y diffuse rapidement, essentiellement comme matériau de construction, voire de parement de murs construits en blocage ; ces parements étaient eux-mêmes recouverts de marbres ou de stucs travaillés à l'imitation des monuments grecs, décors actuellement tous disparus.

La raison principale de l'utilisation massive du nouveau matériau est très certainement sa maniabilité et sa grande rapidité de mise en œuvre, qui permettait de réduire les délais d'exécution des énormes programmes réalisés par les Romains. La construction des thermes de Caracalla, par exemple, monument de plus de douze hectares, n'a duré que cinq ans.

Ce n'est qu'à partir du II^e siècle après J.C., sous Trajan, puis Hadrien, que se développe une architecture où la brique devient un matériau noble et se montre, à la fois matériau de structure et élément de parure : seule, avec effets de polychromie obtenus par des briques de teintes différentes, ou associée à de la pierre ou du marbre.

En Gaule romaine, cependant, à l'exception de la région toulousaine, rares sont les monuments construits entièrement en brique. Cette dernière est plutôt utilisée dans des maçonneries dites en "opus mixtum" où alternent assises de moellons et assises de briques.

Avec l'effondrement de l'empire romain, la brique disparaît, au même titre que les autres constructions "en dur", jusqu'à la période médiévale.

Mais à partir du XII^e siècle, son expansion est à nouveau considérable, principalement dans les régions où la bonne pierre est rare, c'est à dire, dans la grande plaine d'argile et de limon d'Europe du Nord (Flandres, Hollande, Allemagne du Nord), d'où elle atteindra l'Europe centrale et l'Angleterre.

Elle se répand également au sud, dans la région toulousaine essentiellement pour ne parler que de la France.

Grâce à l'industrialisation, le XIX^e siècle offre à la brique un renouveau certain, notamment dans les innombrables demeures et pavillons de style "villégiature", où elle se prête à l'illusion, au pastiche, au rustique et au pittoresque ; les catalogues des fabricants s'enrichissent de multiples modèles et décors, et la sculpture décorative en façade devient accessible au plus grand nombre.

D'autre part le développement de l'architecture industrielle fait appel à la brique, laissée apparente qui, mariée au métal, permet de réaliser de grands volumes bâtis en même temps que les cités ouvrières adjacentes.

Au début du XX^e siècle, les programmes de logements sociaux des grandes villes font largement appel à ce matériau encore abondant et bon marché.

Aujourd'hui, la plupart des briqueteries locales ont fermé, uniformisant la production, le type et l'aspect des briques.

2°. DIFFÉRENTES CARACTÉRISTIQUES RÉGIONALES

A • Les régions du Sud

Dans ces régions sont conservés, à l'époque médiévale et plus tard, les grands formats hérités de l'époque romaine : 23 x 38 cm et 30 x 56 cm, pour la brique rectangulaire, et jusqu'à deux pieds de côté pour la carrée.

Elle était toutefois souvent refractionnée en triangles, dont une face était placée en parements permettant ainsi une grande économie de matériau et une bonne liaison avec le massif du mur exécuté en béton de tout venant.

Dans le Roussillon, le "cairo" traditionnel (ou "cayrou") mesure 22 x 44 x 6 cm, la "rajole" a les mêmes dimensions mais est plus fine, tout comme la "barcelonine" qui correspond à un demi "cairo".



Brique - Région du Sud

La brique de base que l'on dénommera "brique foraine" à partir du XVIII^e siècle, a des dimensions stables, de tournant autour de 28 x 40 ou 30 x 42 cm, et une épaisseur variant de 4,5 à 5 cm.

Cette épaisseur est maintenue sur les autres formats plus réduits : la "violette" de 36 x 12 cm (utilisée pour les voûtes), le "tiercerine" ou "barrot" de 27 x 12 cm.

Le principal atout des grandes briques est d'assurer, de par leur large surface, une bonne liaison entre les constituants du mur, et également d'éviter la distinction entre noyau du mur et parement.

B • Les régions du Nord

Il existe une coupure importante entre le Nord et le Sud du pays.

La brique que l'on trouve dans les régions septentrionales à l'époque médiévale, est d'un format différent de la "foraine" toulousaine ; mesurant environ 27 x 13 cm, voire 22 x 11 cm pour une épaisseur de 6 à 7 cm, elle est plus facile à manipuler et favorise une maçonnerie de parements, souvent polychromes, qui seront abondamment déclinés, suivant des caractéristiques locales.

En Flandre française, où la brique a été utilisée massivement, se sont développées des architectures composites, de briques de sable, de briques roses, noires, de pierre, de briques et pierres enduites.



Jeux de briques - Région du Nord

La brique de sable, de couleur jaune, constituée d'argile et de sable mélangés, était essentiellement employée dans la plaine maritime, à Calais, Bergues, Saint-Omer ou Dunkerque. Utilisée brute, sculptée ou moulurée et enduite à l'imitation de la pierre, elle a servi à l'édification d'édifices civils, mais aussi d'édifices religieux ou de remparts. Vers l'intérieur de la Flandre, on la trouve également mélangée à des briques roses, en assises alternées ou en motifs décoratifs géométriques, comme au château d'Esquelbecq (début XVII^e).

À Lille, à partir du milieu du XVII^e siècle, fleurit une architecture de pierres et de briques, le plus souvent revêtues de badigeons et de peintures (parfois à l'imitation de briques) dont le succès perdurera jusqu'au XIX^e siècle.

C. Les autres régions

La brique a été utilisée dans beaucoup d'autres régions françaises, souvent en remplissage de pans de bois, en Normandie, par exemple, et fréquemment aussi en architecture de briques et de pierres alternées.

Parmi les particularismes locaux, il convient de signaler les jeux d'appareils de la Sologne bourbonnaise, où les façades présentent de façon quasi systématique, un parement polychrome de briques noires et rouges, à motifs géométriques, formés de doubles bandes obliques d'une couleur, délimitant des losanges de l'autre couleur, avec, au centre, un motif de quatre briques de la première couleur.

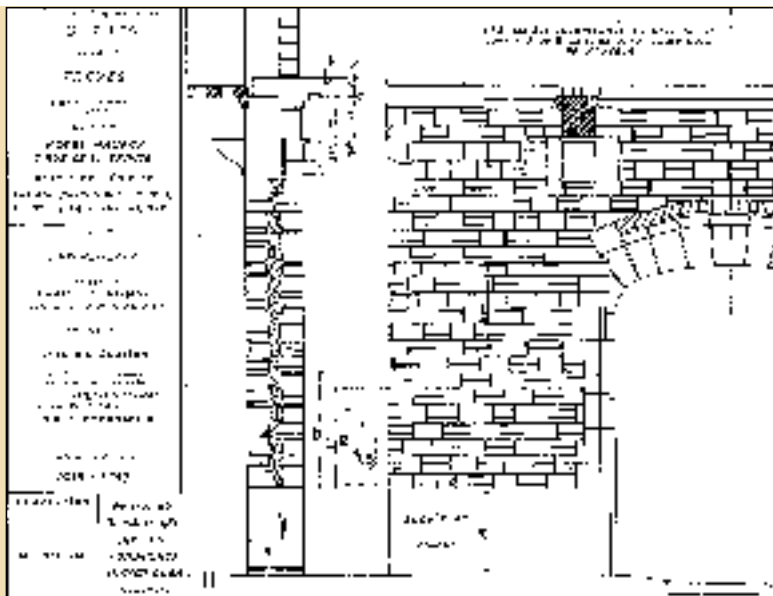
3°. SYSTÈME CONSTRUCTIF "BRIQUES ET PIERRES"

L'introduction d'éléments de pierre intervient fréquemment dans l'architecture de brique de qualité.

L'archétype de cette architecture, est sans doute, l'ancienne Place Royale, actuellement Place des Vosges, qui a définitivement fixé l'idée d'un style "Louis XIII", né sous Henri IV.

Mais dès le XV^e siècle, le château de Rambure, dans la Somme, ou l'aile Louis XII du château de Blois ont déjà adopté ce parti esthétique,

La pierre vient s'insérer, grâce à un harpage soigneux, dans le mur de briques pour en former l'ossature et marquer la modénature, plus particulièrement au droit des fenêtres et en chaînage d'angle.



Appareil craie et brique

Ce chaînage de pierres en harpe sera érigé en système, et se développera jusqu'à devenir, à l'époque classique, un appareil parfaitement régulier qui constituera le seul décor de la façade.

En 1528, un système inversé de "pierres et briques" est mis à la mode au château de Fontainebleau : les murs sont en moellons enduits, et l'ossature et la modénature sont en briques.

4°. TECHNIQUES DE FAÇONNAGE ET CUISSON

La production de la brique est un travail complexe qui, pour permettre une production en grande quantité à des coûts raisonnables, demande une parfaite organisation ; c'est la raison qui, sans doute, explique qu'il a fallu attendre la naissance, au troisième millénaire avant J.-C., d'une société organisée, pour que l'on envisage de cuire des briques, alors que la céramique existait depuis l'époque néolithique.

Cinq stades se succèdent dans la fabrication de la brique

- l'extraction de la terre (argile ou limon)
- la préparation de la pâte
- le façonnage
- le séchage
- la cuisson.

L'extraction, jusqu'à la fin du XIX^e siècle où furent inventées les premières excavatrices motorisées, se faisait à la pelle.

La préparation de la pâte - mélange d'une ou plusieurs terres argileuses, ou de limon, avec de l'eau et des éléments dits "dégraissants", comme le sable, indispensables lorsque les terres sont trop fines – se faisait aussi manuellement, ou avec l'aide d'un manège animal.

Pour le façonnage, dès l'antiquité, on voit apparaître le moule, cadre de bois avec ou sans fond, aux dimensions de la brique à produire. Dans ce moule, préalablement saupoudré de sable pour éviter que la pâte y adhère, le briquetier tasse et arase à la main, une portion d'argile qu'il démoule ensuite en la renversant sur une surface plane, elle aussi sablée.

Ce travail, long et fastidieux (un bon ouvrier pouvait façonner plusieurs centaines de briques par jour) restera inchangé jusqu'au milieu du XIX^e siècle, où un Allemand, Schlickeysen, met au point la première machine à façonner : l'étireuse.

L'étireuse de M. Schlickeysen

Introduite par la partie supérieure de la machine, la terre est malaxée dans un cylindre par une vis d'Archimède, actionnée par un manège (puis par la suite, motorisée) ; sous l'effet de la pression produite, la pâte est expulsée par un orifice rectangulaire, à la base du cylindre, et sort sous la forme d'un boudin parfaitement rectangulaire, qu'il suffit de le sectionner, au fur et à mesure de son apparition, à intervalles réguliers pour obtenir un parallélépipède rectangle parfait.

Ce système, entièrement mécanisé et automatisé, est toujours utilisé pour la production des briques mécaniques qui, hélas, ne peuvent en aucun cas convenir pour une restauration de bâtiment ancien tant elles sont lisses et régulières, impossibles à marier avec des briques anciennes façonnées manuellement.

Séchage

Il est en effet indispensable de faire sécher doucement la brique de terre crue, avant de la cuire, si l'on ne veut pas la voir se fendiller et éclater sous l'action de la chaleur.

Ce séchage se fait actuellement en séchoir artificiel, mais autrefois, la brique était mise à sécher sous de vastes hangars à l'air libre, uniquement pendant les périodes de l'année où aucun risque de gel n'était à craindre. Ce qui, dans les régions d'Europe du Nord, interdisait toute campagne de production de novembre à mars.

Cuisson

C'est là l'opération la plus délicate, la brique est mise à cuire dans un four. Les fours étaient à l'origine, de vastes cylindres de maçonnerie, à la base desquels on entretenait un violent feu de bois, sous la sole, grille de maçonnerie sur laquelle ont entreposait, tel un château de cartes, les différents éléments de terre à cuire : briques, carrelage, tuiles, etc.

Dans ce type de four, les degrés de cuisson étaient différents suivant la position des éléments : cuisson trop intense à proximité du feu, donnant des briques dures et sombres, trop faible à la partie supérieure, produisant des briques pâles et généralement trop tendres pour présenter de bonnes caractéristiques mécaniques.

Les éléments les mieux cuits, de très bonne qualité ne représentaient que le quart d'une fournée et étaient réservés aux jambages, encadrements ou parements extérieurs visibles. Les autres étaient utilisés en remplissage.

De nos jours, les fours industriels utilisent d'autres combustibles que le bois (gaz, fuel, etc.) et sont optimisés de manière à obtenir une chaleur répartie de façon régulière, pour une cuisson la plus homogène possible.

5°. PRINCIPAUX CONSTITUANTS DE LA BRIQUE ET CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES

Les briques cuites sont fabriquées avec tous types d'argile : les ilitiques (couleur marron gris à rouge, après cuisson), les kaoliniques (très claires) et les bravaisitiques (couleur orange à rose).

On trouve dans la pâte argileuse essentiellement des éléments métalliques, sous forme d'oxydes plus ou moins hydratés :

- les éléments dits "réfractaires" dont le degré de fusion est très supérieur à celui de la température (de 800 à 1000°) des fours à briques : il s'agit de la silice (SiO_2), et de l'aluminium (Al_2O_3).
- les éléments "colorants" dont la proportion détermine la couleur basique de la brique (le degré de cuisson étant l'autre facteur déterminant de cette couleur). Ce sont :
 - l'oxyde de fer,
 - l'oxyde de titane,
 - l'oxyde de manganèse.
- les "fondants", de deux types :
 - les oxydes alcalins : oxydes de sodium et de potassium,
 - les oxydes alcalino-terreux : chaux et magnésie.

Que se passe-t-il lors de la cuisson ?

La phase de cuisson est déterminante pour la dureté de la brique, sa couleur et sa résistance aux agents atmosphériques - au gel essentiellement.

Sous l'action de la chaleur maximale du four, et pendant un temps déterminé, les oxydes fondants provoquent la formation d'un verre siliceux impur, car chargé d'une importante quantité d'éléments restés en phase cristalline, tandis que les oxydants colorants teintent cette masse partiellement vitreuse :

- en rouge pour l'oxyde de fer,
- en jaune pour le titane,
- en noir pour le manganèse.

Mais pour les briques anciennes, ces colorations pouvaient être néanmoins affectées par la position des briques dans le four. Les différences de teintes avaient pour corollaire des différences de dureté, donc de taillabilité et de durabilité.

Un déficit de 20 à 30° dans la chaleur du four avait des conséquences très importantes sur la qualité des briques. Mais cette différence de température nécessitait un supplément considérable de combustible, qui a conduit à fabriquer des briques de moindre qualité.

CONSEIL DE PRUDENCE

Il convient de préciser que seules les briques de bonne qualité étaient destinées à rester apparentes : certaines maçonneries, exécutées plus grossièrement ou avec des briques de moindre qualité, étaient recouvertes d'enduits, et c'est donc une erreur de vouloir à tout prix supprimer ces enduits ; il s'agit là d'une mode aussi déplorable que celle de la "pierre apparente" systématique, qui met à jour de médiocres maçonneries de moellons originellement prévues pour être enduites.

6°. MORTIERS

Le mortier d'une maçonnerie de briques doit avoir deux propriétés spécifiques : l'adhérence vis à vis de la brique et une cohésion interne importante : c'est lui qui constitue la phase continue de l'assemblage et qui assure à la maçonnerie son monolithisme.

Il est généralement composé de sable et d'un liant plus ou moins hydraulique fait de chaux ou actuellement de ciment.

Les mortiers romains étaient réalisés avec de la chaux aérienne et de la poudre de brique pilée.

En Flandres, dans les régions où le sable manquait, le mortier de hourdage pouvait être composé d'argile crue et d'adjuvants comme la farine de seigle par exemple ; seul le rejointoiement était fait d'une bourre de quelques millimètres de chaux pure et de crin, ou de mortier traditionnel sable et chaux.

La granulométrie du sable est importante : un sable trop fin a tendance à faire trop de retrait.

Caractéristiques

Les propriétés physiques et mécaniques de la brique et de son mortier doivent être proches, sous peine de provoquer l'altération rapide soit des briques, soit du mortier.

Mais la capacité de montée capillaire de l'eau à travers le mortier, par exemple, ne doit pas être inférieure à celle de la brique : le mortier doit pouvoir agir comme une sorte de drain éliminant l'eau absorbée par les briques. Dans le cas contraire, c'est la brique qui sera attaquée.

De même, les mortiers doivent aussi avoir une résistance mécanique un peu plus faible que celle de la brique, mais un coefficient de dilatation proche.

Les mortiers à base de chaux aérienne remplissent en général ces conditions, mais ils sont peu utilisés à cause de leur faible durabilité ; afin d'augmenter leur durée de vie, les entrepreneurs appliquent beaucoup de ciment et peu de chaux, et serrent ce mortier dans les joints.

L'utilisation de chaux hydraulique adjuvantée permet d'augmenter la durabilité du mortier, mais diminue sa capacité de capillarité, ce qui peut nuire à la maçonnerie. En revanche, l'adjonction d'argile élève la vitesse de la montée capillaire, de même que l'ajout de sable, mais au prix d'une moindre résistance mécanique.

Il faut veiller à n'employer que du sable de rivière lavé.

Les dosages du mortier de pose sont donc à adapter aux caractéristiques de la brique à mettre en œuvre, et notamment à sa vitesse de capillarité.

7°. JOINTS

Dans une maçonnerie de parement classique, la surface du joint représente environ 15 à 25 % de la surface totale, ce qui n'est pas négligeable, et nécessite de la part de l'architecte une définition précise esthétique et qualitative (forme du joint, épaisseur, couleur, ...).

Le joint joue un rôle de protection important et doit avoir un comportement irréprochable dans le temps, quelles que soit les conditions d'exposition.

Sa dureté est à évaluer en fonction des sollicitations de l'ouvrage et doit s'harmoniser avec celle du mortier de pose et de la brique.

Il y a deux façons de faire les joints :

Soit "en montant", c'est-à-dire au fur et à mesure que le mur est monté, en utilisant le mortier de pose, soit "postérieurement", c'est-à-dire après que le mur soit fini.

Cette deuxième méthode donne un résultat plus soigné, tant du point de vue esthétique (choix de la composition du joint, régularité de couleur et de structure) que du point de vue qualitatif (possibilité de maturation et de stabilisation du mortier de pose, mise en œuvre par des rejointoyeurs professionnels).

Le rejointoyage "a posteriori" permet au mortier de pose d'effectuer son séchage et son retrait, et limite ainsi les risques de fissuration des joints ; l'observation montre que les murs rejointoyés ainsi ont moins de problèmes d'infiltrations d'eaux.

Le joint doit avoir une profondeur de l'ordre de 1,5 fois sa largeur.

8°. RAGRÉAGE

Les parements de briques de moindre qualité étaient enduits et souvent traités en faux appareils de briques ! Le mortier de ragréage pouvait être composé d'huile de lin, de poudre de brique et de sang de bœuf. Cette disposition existe au Capitole de Toulouse, par exemple.

■ PATHOLOGIES DES MAÇONNERIES EN BRIQUE

En dehors des problèmes strictement structurels (tassements, fondations, séismes, ...) on peut classer les pathologies en deux grandes catégories : celles liées à l'humidité et celles liées à la pollution atmosphérique.

Les pathologies destructives peuvent affecter soit la brique soit le mortier de pose, soit les deux. En outre, les joints peuvent être dégarnis et ne plus jouer leur rôle.

1°. MORTIER

C'est en fait la désagrégation du mortier de pose qui fragilise, puis détruit, les structures en maçonnerie de brique ; en effet, le mortier constitue à la fois la partie la plus "stratégique" et la plus faible de l'ensemble, et la rupture de sa continuité, pour quelque cause que ce soit, met en péril toute la maçonnerie.

Les causes de pathologies des mortiers peuvent être de 3 ordres :

1- causes mécaniques : des contraintes dues à des tassements différentiels, ou séismes, qui peuvent dépasser la résistance du mortier et le fissurer. Les contraintes peuvent aussi être provoquées par la croissance de végétaux s'insinuant à l'intérieur des joints.

2- causes chimiques dues à l'eau ou à la pollution : la chaux et le ciment, de nature basique, sont sensibles à l'action des acides, ce qui se traduit par des chaînes de décomposition qui produisent des sels dont certains (les chlorures et nitrates) s'éliminent par dissolution dans l'eau, et d'autres (les sulfates) cristallisent en produisant des gonflements (gypse ou ettringite).

3- causes biologiques : la capacité des micro-organismes, bactéries, levures et champignons à transformer de l'azote atmosphérique en acide nitrique, ou des pyrites en acide sulfurique ; la multiplication de ces phénomènes provoque des altérations parfaitement observables.

A cela s'ajoute l'action mécanique des intempéries lorsque les joints sont vidés.

2°. BRIQUE

Les pathologies de la brique résident dans l'altération de sa surface, de son aspect, dans l'augmentation de sa porosité et sa friabilité, jusqu'à la désagrégation..

Lorsqu'elle est apparente, la brique subit l'action mécanique et chimique des intempéries. Le phénomène le plus grave est "l'alvéolisation" qui désagrège la brique : elle apparaît à la base des murs anciens, dans les zones soumises à remontées capillaires. Cela est dû à la structure cristalline cubique des chlorures présents dans l'eau.

La présence permanente d'eau peut même provoquer la dissolution interne des briques, qui prennent un aspect cartonneux et perdent leur résistance mécanique ; cette désagrégation est due à des effets électrolytiques sur l'argile. Ce phénomène affecte particulièrement les briques du XVIII^e siècle, encore cuites dans des fours à bois.

Elle peut aussi se désagréger peu à peu du fait de la trop faible capacité de capillarité du mortier et de sa trop forte étanchéité qui va empêcher l'eau contenue dans la brique de migrer dans le mortier et de s'évaporer : la face avant de la brique va reculer peu à peu et se creuser par rapport au joint.

L'utilisation d'un mortier trop résistant, peut aussi provoquer l'émiettement ou la cassure de la brique, par manque de souplesse.

Enfin, les parements de brique peuvent présenter des traces de salissures (noires), des traces moisissures (noires ou vertes), des traces de salpêtre (blanches et cotoneuses), ou encore des traces d'efflorescences (blanches granuleuses et sèches).

Il est à noter que salpêtre et efflorescences sont deux phénomènes différents.

Salpêtre et efflorescences

Le salpêtre provient d'une cristallisation de nitrates (d'ammonium, de calcium ou de potassium) à la surface de la maçonnerie, qui apparaît souvent à proximité d'égouts, d'anciennes étables ou écuries. Les sols y sont gorgés de bactéries nitrifiantes qui migrent dans les murs et cristallisent. Le salpêtre met de nombreuses années à se développer. Pour stopper le phénomène, il faut éliminer les bactéries à l'aide de formol ou de bactéricides anioniques, et traiter la cause de l'humidité.

Les efflorescences, elles, apparaissent très rapidement ; elles sont provoquées par la migration de sulfate de sodium provenant du mortier de jointoiement. Elles cèdent facilement au traitement par un gel acide, suivi éventuellement d'un hydrofuge microporeux.

■ DIAGNOSTIC ET RESTAURATION DES MAÇONNERIES DE BRIQUE

Face à un mur de brique altéré, il convient tout d'abord de procéder à un examen permettant d'identifier le type de pathologies : problème d'humidité, défaut de stabilité ?...

On tâchera ensuite d'en déterminer la (ou les) causes : s'il s'agit d'altérations dues à l'humidité, on identifiera si elle provient d'une faiblesse de la couverture - zinguerie, d'une porosité excessive du parement ou de remontées capillaires venues du sol.

Dans un premier temps, on s'attachera donc à tenter de supprimer les facteurs détériorants.

Ensuite on entreprendra de restaurer le parement abîmé.

Pour cela, il faut identifier le type de brique concerné (terre cuite, brique de sable, brique silico-calcaire...) et éventuellement retrouver son lieu de provenance.

Des analyses chimiques et des examens minéralogiques et microscopiques permettent aussi de déterminer la composition du mortier et la nature des altérations subies.

Par ailleurs, un examen visuel soigneux, appuyé éventuellement par des analyses, doit permettre de vérifier si la brique était nue ou apparente derrière un badigeon, ou totalement couverte.

Dans ces deux derniers cas, elle ne doit pas être décapée car, vraisemblablement sa qualité de cuisson ou d'aspect ne lui permet pas d'être laissée visible.

1°. INJECTION DE COULIS

Si l'intégrité de la maçonnerie est menacée, des injections de coulis de mortier peuvent être envisagées ; elles permettront de combler les vides ou les fissures repérés dans la maçonnerie.

Comme pour l'injection dans les maçonneries de pierre, la composition du coulis et le protocole suivi pour l'injection ont une grande importance pour la qualité des résultats.

Le coulis d'injection doit être compatible avec l'existant et présenter des caractéristiques analogues, car il doit y avoir une parfaite adhérence du coulis injecté sur le mortier existant et sur les briques ; la composition de ceux-ci doit donc être analysée préalablement et des essais réalisés.

2°. TRAITEMENTS DE SURFACE

Il est souvent nécessaire d'utiliser plusieurs méthodes de nettoyage avant de trouver la plus convenable, à cause des divers types de saletés qui se forment sur la maçonnerie en brique et des différentes caractéristiques des briques et mortiers.

Le nettoyage des efflorescences peut s'effectuer en grande partie à l'aide d'une brosse ; si c'est insuffisant, il faut laver le mur à l'eau, frotter à la brosse, et rincer de nouveau. Si le résultat n'est pas satisfaisant, on peut appliquer une solution d'acide muriatique (solution à 1 pour 9 d'eau) sur le mur bien mouillé, puis rincer.

Mais si des efflorescences apparaissent soudain sur un mur ancien, il faudra d'abord identifier la source de l'humidité excessive qui a engendré ce phénomène.

Le nettoyage des mousses, lichens, vignes et plantes grimpantes, nuisibles à la maçonnerie à cause de l'insinuation des racines dans les joints, s'effectue par l'application de sulfamate d'ammonium ou d'une solution de silico-fluor de zinc ou de magnésie (proportion 1 pour 40 d'eau) ; on peut également employer un herbicide commercial.

Le nettoyage des parasites, champignons, etc, s'effectue aisément avec un fongicide. Il peut être suivi d'un hydrofuge si l'on veut prolonger l'effet.

3°. REJOINTOIEMENT

La réfection des joints est une opération de protection primordiale pour la conservation du mur. Dans la mesure du possible, on s'attachera à conserver les joints des restaurations antérieures en bon état ; pour les autres, on procédera à la réfection des joints avec un mortier soigneusement adapté, ou conforme à l'état d'origine s'il est connu.

Colorer le mortier si nécessaire, avec de l'oxyde.

4°. HYDROFUGATION

La brique semble mieux réagir que la pierre aux procédés d'hydrofugation ; la brique ancienne particulièrement, qui est généralement plus poreuse et qui peut être améliorée par ce procédé. L'hydrofugation peut, pendant un certain temps, permettre à la brique d'éviter les altérations dues à la stagnation d'humidité.

Toutefois, le traitement hydrofuge, en rendant moins aisés les échanges hydriques, favorise les problèmes de pathologies dues au gel : il faut donc parfaitement maîtriser l'intervention.

5°. SABLAGE

Comme pour les parements de pierre, le sablage a été considéré à une époque comme une solution efficace de nettoyage ; mais cette technique, trop agressive, érode la couche extérieure protectrice qui, à l'image du calcin pour la pierre, protège la brique. Les actions destructives du gel s'en trouvent facilitées et mettent en péril la brique, surtout si sa cuisson n'a pas été parfaite.

6°. NETTOYAGE PAR MICRO-SABLAGE ET HYDRO-GOMMAGE

Le nettoyage des encrassements, dépôts noirs et salissures de suie s'effectue soit par application de compresses, soit par micro-sablage ou hydro-gommage.

Ces techniques de nettoyage, relativement douces, peuvent être adoptées pour la brique en bon état ; néanmoins, on se souviendra que la brique étant plus poreuse que la pierre, l'utilisation de l'eau doit être parfaitement contrôlée.

Mais attention, si la brique est très ancienne, il faut réfléchir à l'utilité d'effectuer un nettoyage qui ne durera pas plus de dix ans.

7°. COMBLEMENT DE ZONES MANQUANTES

Les réparations au mortier d'imitation sont plus difficiles à réaliser pour la brique que pour la pierre, d'une part pour des questions d'aspect, et d'autre part pour des questions de porosité :

la composition de ces mortiers leur donne généralement une capillarité plus faible que la brique qui ne permet pas la continuité des migrations hydriques.

8°. REMPLACEMENT DE BRIQUE

C'est la solution la plus souvent choisie, car la pulvérulence de la brique n'est pas réversible, et le remplacement est techniquement assez simple à réaliser. Toutefois, il faut être en mesure de retrouver le même type de brique, avec les mêmes caractéristiques et un aspect identique.

Ensuite il faut s'assurer, par une uniformisation des joints et une patine éventuelle, de l'intégration des éléments neufs dans le mur ancien.

C'est pourquoi le remplacement de briques anciennes doit être fait avec soin et parcimonie.

■ LES COLOMBAGES OU PANS DE BOIS

Si la tradition romaine de construction en pierres et en briques s'est maintenue dans de nombreux pays au Moyen-Âge, dans les pays du centre de l'Europe et en France, on bâtissait essentiellement en bois.

Ce type de construction a subsisté pendant plusieurs siècles, pour les édifices civils essentiellement, la technique s'améliorant et laissant une place croissante à la maçonnerie, cela vraisemblablement pour deux raisons essentielles : l'éloignement progressif des lieux d'exploitation dû à la diminution des forêts, et les risques d'incendie inhérents à ce type de construction.

En outre, cette évolution technique améliora la pérennité des constructions.

Pour éviter le pourrissement des bois en contact avec le sol, on commença par réaliser des soubassements en maçonnerie.

Les remplissages ne se firent plus uniquement en terre ou en torchis, mais en maçonneries diverses : de moellons, de briques, de tuileaux, etc.

Puis, les murs séparatifs entre deux maisons mitoyennes furent entièrement construits en maçonnerie, ce qui permettait d'y adosser des cheminées en toute sécurité, et d'améliorer considérablement l'isolation entre bâtiments consécutifs. Seules les façades et les refends continuèrent d'être édifiés en pan de bois, et ce malgré les nombreux textes de loi qui, de façon constante depuis le 16^{ème} siècle, tentèrent de réglementer, voire d'interdire leur utilisation.

Notons :

- un arrêt du Parlement du 17 mai 1571, exigeant la délivrance d'une permission spéciale pour pouvoir bâtir en pan de bois,
- un édit royal de 1607 qui proscriit l'usage du pan de bois au rez-de-chaussée,
- une ordonnance des Trésoriers de France grands voyers de Paris, datée du 18 août 1667, qui limite à huit toises (environ 15,60 m) la hauteur des façades en pans de bois, interdit les pignons sur rue et oblige à revêtir les pans de bois, à l'extérieur comme à l'intérieur, d'un enduit de plâtre sur lattes clouées,
- un règlement du maître général des bâtiments, du 1er juillet 1712, précisant les conditions de mise en œuvre de plinthes d'entablements, de corniches, etc. en plâtre,
- les ordonnances de police du 28 avril 1719 et du 13 octobre 1724 qui interdisent de n'adosser aucun conduit de cheminée à un pan de bois, et d'améliorer la liaison des maçonneries avec les poteaux de bois par chevillage et rainurage de ces derniers.

Façade à pans de bois
Strasbourg, la petite France



Malgré toutes ces réglementations et interdictions, l'usage du pan de bois s'est maintenu de façon courante jusqu'à la fin du XIX^e siècle.

Définition

Un pan de bois est un mur constitué d'une ossature de pièces de bois assemblées dans un plan vertical, et d'un remplissage ou "hourdis", comblant les vides entre les différentes pièces, réalisé soit en torchis, soit en maçonneries de briques, de tuiles, de gravats ou de petits moellons, hourdés à la chaux ou au plâtre.

La technique de mise en œuvre d'un pan de bois relève à la fois du savoir-faire du charpentier, et de celui du maçon.

En effet, ses exigences fonctionnelles sont identiques à celles d'un mur de

maçonnerie : stabilité aux efforts verticaux et horizontaux, étanchéité à l'eau et à l'air, isolation au froid et au bruit : Il est donc normal de l'étudier dans le cadre d'un ouvrage sur la maçonnerie.

1°. ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS

A • La structure

La structure d'un pan de bois est composée principalement :

- de pièces de bois verticales appelées "**poteaux**", véhiculant verticalement charges et surcharges,
- de pièces horizontales hautes et basses, appelées respectivement "**sablière haute**" et "**sablière de chambrée**", dans lesquelles les poteaux sont assemblés, par tenon et mortaise, et maintenus ainsi en position verticale,
- de pièces inclinées remplissant la fonction de contreventement, nommées "**décharges**" ou "**écharpes**". Si les écharpes forment un angle avec la verticale inférieur à 30°, elles sont nommées "guettes" ; si elles sont assemblées en croix, ce sont les "croix de St André".

Ces pièces obliques sont, elles aussi, assemblées par tenons et mortaises dans les sablières.

Ce type d'assemblage ne peut transmettre que des efforts de compression, et les écharpes sont toujours inclinées symétriquement par rapport à la verticale pour reprendre les efforts horizontaux parasites (vent, etc.), s'exerçant dans un sens ou dans l'autre.



Ossature d'un pan de bois

Les pans de bois ont une hauteur d'étage, et peuvent se superposer de fond en comble d'un édifice. Les solives et poutres des planchers viennent alors prendre appui sur les sablières hautes.

La rigidité de l'ensemble est assurée par des poteaux de plus fortes sections que les autres, filant sur la hauteur d'au moins deux étages, et interrompus de façon alternée à des étages différents.

Ces poteaux se trouvent systématiquement dans les angles – ce sont les "**poteaux corniers**".

D'autres éléments structurels interviennent encore dans la composition de pans de bois .

Ils peuvent être réalisés en différentes espèces de bois, le plus souvent en chêne, mais aussi suivant les régions, en châtaignier, en peuplier, en résineux, etc.

B • Les hourdis

Comme indiqué dans la définition du pan de bois, les hourdis remplissant les vides entre les bois peuvent être de plusieurs sortes.

Leur nature est un élément déterminant pour l'espacement des bois.

a • Le torchis ou pisé

C'est un mélange d'argile et de paille, ou d'autres fibres végétales, comme la bourre de maïs par exemple, ou encore de crins d'animaux, ces divers éléments étant utilisés pour une meilleure isolation thermique.

Il est bourré entre les tournisses rainurées à cet effet, et entre lesquelles sont bloquées pour le maintenir, des éclisses, pièces de bois de faible section, verticales, horizontales ou obliques.

En Sologne, on trouve aussi un système de remplissage par "palissons", petits fuseaux de bois enrobés de torchis.

Ce torchis a une résistance faible ; lorsqu'il est utilisé en surfaces larges (Sologne, Champagne humide), les pans de bois sont particulièrement détériorés.

Pan de bois, torchis d'argile et paille, recouvert d'enduit à la chaux



b • Les hourdis de briques ou de moellons

Les briques ou les petits moellons, sont hourdés au mortier de chaux ou de plâtre, ou encore à la terre argileuse.

Ce hourdis est stable par lui-même, et permet donc d'utiliser une structure de bois aux éléments assez espacés. On le rencontre dans les Landes, dans le pays de Bray.

c • Les hourdis de tuileaux

Les tuileaux, empilés entre les potelets, sont hourdés au plâtre ou à la chaux ; ils exigent, de par leurs faibles dimensions, que les pièces de bois soient très rapprochées.

d • Les hourdis de plâtre

Plâtras de démolition ou blocs de gypse, hourdés au plâtre, ce type de hourdis est très fréquent en région parisienne. Il n'est pas prévu pour rester apparent, mais est recouvert par un lattis cloué qui sert de support à un enduit plâtre.

Dans tous les cas, la bonne adhérence entre maçonnerie et pièces de bois est assurée par le rainurage de ces dernières et par un lardage de clous à bâteaux.

Dans tous les cas, la bonne adhérence entre maçonnerie et pièces de bois est assurée par le rainurage de ces derniers et par un lardage de clous à bâteaux.

2°. CAPACITÉ PORTANTE ET DIMENSIONNEMENT

La capacité portante d'un pan de bois s'exprime en kilogramme-force.

Elle est le produit de la capacité portante d'un des poteaux, multiplié par le nombre de poteaux, et affecté d'un coefficient de vétusté.

La capacité portante P d'un poteau est égale au produit de sa section transversale S , exprimée en cm^2 , par la contrainte de compression n , exprimée en kg/cm^2 et prise égale à la plus petite des valeurs de la contrainte de flambement (n_f) ou de la contrainte de compression transversale localisée (n_c).

Ces différentes valeurs varient en fonction des essences de bois utilisées.


La capacité portante théorique ainsi obtenue, ne tient pas compte des assemblages, de leur vétusté ni du degré d'altération des bois, mais elle permet de se rendre compte, par comparaison avec les charges et les surcharges de l'ouvrage, si le pan de bois a été dimensionné au plus juste ou, au contraire, très largement.

Seule une auscultation précise permet de déterminer le coefficient de vétusté qui, appliqué à la capacité portante théorique, donnera la capacité portante réelle.

Dimensionnements

Une donnée de base intéressante à connaître est celle de Rondelet qui, dans son Art de Bâtir, préconise une épaisseur de pan de bois égale à la moitié de celle d'un mur en maçonnerie soumis aux mêmes contraintes.



 Pan de bois et Hourdis de briques

Dimensionnements

Les dimensions des sections les plus utilisées sont données dans plusieurs manuels, datant pour la plupart du 19^{ème} siècle.

Nous citerons celle répertoriées par le Colonel EMY dans son traité de 1837 sur l'Art de la charpenterie, pour un pan de bois de quatre niveaux et d'une hauteur d'étage comprise entre 3,25 et 4 m.

1°) Pan de bois extérieur

Épaisseur	22 à 24 cm
Poteaux et cornières et poteaux de fond	24 à 27 cm
Sablières hautes et basses	22 à 24 cm
Poteaux	19 à 22 cm
Poteaux de remplage	16 à 22 cm
Écartement des poteaux de remplage	27 à 32 cm
Guettes ou décharges	16 à 22 cm
Tournisses et potelets	14 à 22 cm

2°) Pan de bois intérieur

Épaisseur	16 cm
Grosceur des poteaux	
- portant planchers	14 à 16 cm
- ne portant pas planchers	11 à 14 cm

3°. DIAGNOSTIC

En présence d'un mur enduit, comment déterminer s'il est en maçonnerie ou en pan de bois et procéder au diagnostic ?

A • L'épaisseur

L'épaisseur du mur est une première indication intéressante : dans le cas d'une maçonnerie de pierres, il ne sera jamais inférieur à une quarantaine de centimètres.

Dans le cas d'un pan de bois, son épaisseur est comprise entre 20 et 25 cm pour un mur extérieur et entre 14 et 20 cm pour un mur de refend.

Mais cette indication est loin d'être suffisante : un mur de briques pourra avoir des épaisseurs similaires, ou encore, dans des constructions postérieures aux années 1850, on pourra se trouver en présence d'un pan de fer.

Le détecteur de métaux et la caméra infra-rouge.

Un passage au détecteur de métaux permettra une identification immédiate d'éventuel pan de fer dans un mur.

L'utilisation d'une caméra à infrarouge, dans la mesure où il existe une différence de température entre les deux faces du mur, permettra, elle, l'identification d'un pan de bois par le barrage thermique qu'il constitue.

B • L'analyse des fissures

Avant tout, et si l'on ne dispose pas d'appareils techniques, une analyse d'éventuelles fissures peut renseigner efficacement tant sur les matériaux mis en œuvre que sur les pathologies.

- Dans une maçonnerie, les fissures ne seront jamais parfaitement rectilignes : dans un mur de briques, par exemple, elles seront en escalier, suivant les joints de la brique.

- Dans un pan de bois, les fissures vont suivre les pièces de bois, et seront donc rectilignes, verticales, horizontales ou, ce qui est plus caractéristique, obliques, en suivant les écharpes.
- Dans une maçonnerie à pan de fer, ces fissures obliques n'existent pas.

C • Les sondages

Enfin, des sondages localisés pourront être réalisés dans les zones présentant une forte altération visible, ainsi qu'aux points considérés comme les plus névralgiques, c'est à dire :

- sur les pièces de bois déterminées, par l'analyse théorique, comme étant les plus sollicitées,
- aux liaisons métalliques et à leur assemblage avec les pièces de bois,
- dans les zones les plus susceptibles d'être atteintes de pathologies :
 - par des infiltrations :
murs exposés aux pluies et vents dominants, balcons, étages en retrait, pour les extérieurs,
cuisines, salles d'eau, passages de chutes et de canalisations d'eau pour les intérieurs,
 - par la condensation :
dans les zones manifestement modifiées par rapport aux dispositions d'origine,
cuisines, salles d'eau, zones traversées par des canalisations d'eau froide.

4°. RESTAURATION DES PANS DE BOIS

A • Restauration des structures

Suivant l'état de détérioration des pièces de bois, le plus souvent au niveau des assemblages poteaux/sablières et écharpes/poteaux, plusieurs solutions sont envisageables :

- Le remplacement des pièces abîmées - travail délicat et onéreux - supposant la démolition du hourdis avoisinant et sa reconstruction après changement des pièces,
- L'enture, après dégradation des parties altérées, de pièces de bois greffées sur les parties saines - travail également assez délicat et onéreux -
- L'insertion, dans la pièce de bois, de tiges en fibre de verre renforcées, associées à une résine de polyester,



Pans de bois manquants et hourdis altérés

- La restauration, voire la reconstitution, des parties altérées (après purge de celles-ci), par l'utilisation d'un mortier époxydique léger, employé en masse, coffré et recouvert d'une résine de renforcement époxydique qui peut se teinter et se travailler à l'imitation des bois anciens contigus.

Cette dernière méthode permet la conservation d'un maximum de pièces anciennes, et une intervention plus légère et moins onéreuse. Elle est particulièrement recommandable dans le cas d'un pan de bois destiné à être enduit.

Si au contraire, ce dernier doit rester apparent, son emploi est plus discutable, surtout pour les pièces à vision rapprochée.

CONSEIL DE PRUDENCE

Pan de bois apparent ou enduit ?

Lors d'une restauration d'un pan de bois enduit, la question se pose le plus souvent de la suppression de l'enduit. De même qu'une certaine mode a conduit à décaper les enduits des maçonneries, la tendance à déshabiller les pans de bois pour les laisser apparents s'est développée. Cette suppression n'est envisageable que si l'on acquiert la certitude que le pan de bois a été à l'origine conçu pour rester apparent.

Dans le cas contraire, on prive le pan de bois de sa protection initiale, ce qui le met en danger, et l'on modifie fortement sa physionomie naturelle. Un moyen simple est de procéder à des sondages pour examiner d'une part, s'il a été apporté un soin particulier à la finition des pièces de bois, et vérifier, d'autre part, s'il existe sous le lattis et l'enduit de protection, un enduit ancien recouvrant le hourdis, et parfaitement arasé au nu des pièces de bois.



Pan de bois et hourdis restaurés

B • Restauration du hourdis

Dans les zones où il est détérioré, ou supprimé pour permettre le remplacement de pièces malades, le hourdis sera restitué à l'identique des parties avoisinantes.

On veillera à ce que la liaison entre hourdis et structure bois soit parfaitement assurée, généralement par un lardis de clous.

Si le pan de bois est destiné à rester apparent, le hourdis sera recouvert d'un enduit dont la composition et la teinte seront identiques à celles de l'enduit d'origine. **Cet enduit sera parfaitement arasé au nu des pièces de bois, et ne sera en aucun cas en saillie ou en retrait par rapport à celui-ci.**

Certains matériaux, comme la brique ou les tuileaux, peuvent rester apparents, en fonction des caractéristiques stylistiques régionales.

■ LA CONSTRUCTION EN TERRE

La terre a été utilisée pour la construction dans le monde entier, depuis les temps les plus reculés, avec une étonnante variété de mises en œuvre.

La plus ancienne de ces mises en œuvre est sans aucun doute la terre creusée de l'habitat troglodyte, concentré essentiellement en Chine, dans les pays méditerranéens d'Europe et dans les pays d'Afrique du Nord.

Nous avons vu la terre, mélangée à des substances végétales, utilisée en garnissage d'une structure de bois (Cf. le chapitre "Pan de bois").

Elle a été aussi employée pour créer des éléments de maçonnerie : mottes de terre découpées directement dans le sol, éléments moulés : briques de formes diverses de terre cuite séchée au soleil, extrudés, adobes, boudins, etc.

Elle a été façonnée en colombins, en boules empilées (bauge), en tresses, etc.

Mais, c'est en "pisé" qu'elle a été le plus employée, aussi bien dans nos régions, que dans des pays aussi différents que le Danemark, le Maroc, le Pérou ou la Chine.

De nombreux documents anciens décrivent ce dernier procédé, utilisé en France depuis les Romains et transmis depuis lors de génération en génération, dans le lyonnais tout d'abord, puis de proche en proche jusqu'à des provinces aussi éloignées que, par exemple, la Bretagne ou la Picardie (d'après ce qu'en dit Goiffon dans un ouvrage daté de 1772, intitulé "l'art du maçon piseur").

1°. DÉFINITION

Nous emprunterons la définition du pisé à l'ouvrage de Cointereaux "Les Cahiers de l'École d'Architecture Rurale", paru en 1790.

"Le pisé est un procédé d'après lequel on construit les maisons avec de la terre, sans la soutenir par aucune pièce de bois, et sans mélange de paille, ni de bourre. Il consiste à battre, lit par lit, entre des planches, à l'épaisseur ordinaire des murs de moellons, de la terre préparée à cet effet. Ainsi battue, elle se lie, prend de la consistance, et forme une masse homogène qui peut être élevée à toutes les hauteurs données pour les habitations".

(Cointereaux – Les Cahiers de l'École d'Architecture Rurale)

Cette technique d'une mise en œuvre simple, a permis l'édification de bâtiments très sains, car le pisé est très respirant, et contrairement à ce que l'on pourrait penser, très solide.

Un témoignage du 18^{ème} siècle sur la solidité d'un édifice en pisé.
"Lorsque les murs en pisé sont bien faits, ils ne forment qu'une seule pièce, et lorsqu'ils sont revêtus à l'extérieur d'un bon enduit, ils peuvent durer des siècles. En 1764, je fus chargé de restaurer un ancien château dans le département de l'Ain. il était bâti en pisé depuis plus de 150 ans. Les murs avaient acquis une dureté et une consistance égales aux pierres tendres de moyenne qualité, telles que la pierre de St-Leu. On fut obligé, pour agrandir les ouvertures et faire de nouveaux percements, de se servir de marteaux à pointe et à taillant, comme pour la pierre de taille."

(J. Rondelet)

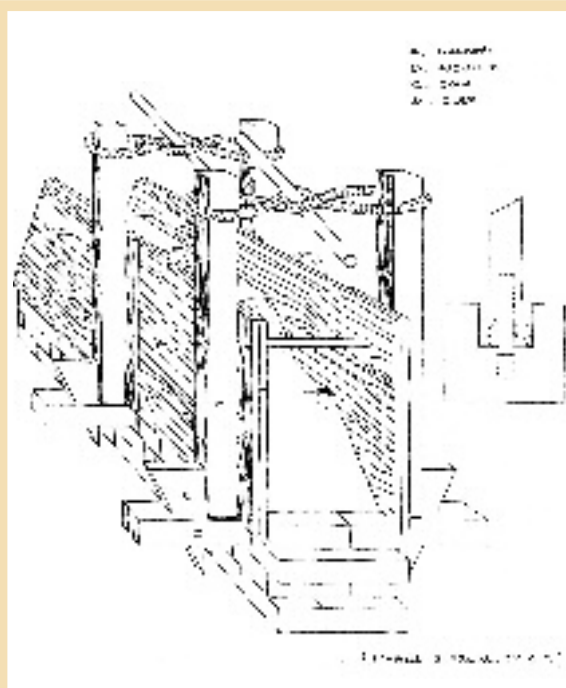
A condition, toutefois, qu'ait été particulièrement soignée la protection à l'eau : les constructions en terre sont en effet, plus que toutes autres, sensibles aux actions de l'eau : que celle-ci coule à la surface des murs et s'évapore aussitôt, la maçonnerie de terre n'en sera pas affectée. Si, par contre, elle y pénètre, la dégradation est inévitable.

Tout doit donc être mis en œuvre pour éviter les pathologies humides par pénétration de l'eau dans la masse des murs, plus particulièrement à la base de ceux-ci et en partie haute.

Comme le dit un diction populaire du Devon : "une maison en terre ne demande qu'un bon chapeau et de bonnes bottes ".

2°. MISE EN ŒUVRE DU COFFRAGE

L'on distingue deux techniques assez différentes, qui étaient utilisées essentiellement dans le Lyonnais et en Auvergne, pour une part, et dans le Bugey pour l'autre part.



Coffrage à bauge et détail du montage d'une de ses banchées dans une clef

A. Méthode du Lyonnais et d'Auvergne

Dans ces deux régions, les coffrages sont composés de deux banches, dont l'écartement est maintenu en pied par des entretoises (les "clefs" ou "lançonnières"), dans lesquelles sont fichés des poteaux (les "aiguilles"), serrés à la base par des coins, et en tête par une corde bridée par un bâton (Lyonnais) ou par un "joug" du même principe que les "clefs" (Auvergne). L'écartement des banches est assuré, en partie supérieure, par un petit bois appelé "gros du mur".

Les banches sont composées de trois ou quatre planches de bois, de deux à quatre mètres de longueur, assemblées à rainures et languettes par quatre montants, (les "barres"), et équipées de poignées (les "manettes") pour en faciliter la manutention.

Les dimensions optimales seraient de 2,60 m de longueur et 80 cm de hauteur.

Un fond de banche, appelé "closoir" ou "tête de moule", est utilisé pour fermer le coffrage lors de la réalisation des angles ou des baies. Il est constitué de deux planches verticales, assemblées extérieurement par deux planchettes. Sa forme est légèrement trapézoïdale lorsque l'on veut donner du fruit au mur.

Les poteaux, de même constitution que les clefs, dépassent la banche d'environ 50 cm. Ils serrent les banches sur l'assise du mur déjà exécuté par l'intermédiaire de coins de bois enfoncés dans les mortaises des clefs et des jougs.

B. Méthode du Bugey

Le procédé de construction est identique mais avec un système de maintien des banches par perches verticales de la hauteur du mur à construire. Celles-ci sont mises en œuvre au préalable sur toute la périphérie de l'édifice, ce qui facilite grandement le montage et le démontage des coffrages qu'il suffit de faire glisser d'une série de quatre poteaux à la suivante, en déliant et reliant les cordes de serrage des perches, et en soutenant les banches latéralement.

Ce système présente l'avantage de la rapidité, mais il ne permet d'édifier que des constructions de hauteur limitée, et le matériel nécessaire à sa mise en œuvre est encombrant et difficile à transporter.

3°. CONSTRUCTION DES MURS EN PISÉ

A. Extraction et préparation de la terre

Il convient de choisir une bonne terre : grasse, non organique, pas trop argileuse – elle se compacterait mal – pas trop humide, ferme mais plastique et sans mottes dures ("catons").

La composition idéale :

- limon : 20 à 35 %
- argile : 15 à 25 %
- sable : 40 à 50 %
- graviers : 0 à 15 %

Cette terre est piochée, bien divisée à la pelle, mise en tas, pour permettre aux grumeaux et aux trop gros cailloux de rouler en bas du tas. Les végétaux, qui risquent de pourrir, sont soigneusement enlevés.

Cette préparation se fait en quantité suffisante pour une seule journée de travail ; il est en effet impossible de "piser" une terre détrempée ou trop sèche – on prévoira donc des bâches pour la protéger de la pluie ou d'un soleil trop ardent, si cela s'avère nécessaire.

B. Confection du soubassement

Les murs de terre sont particulièrement sensibles aux risques d'érosion par l'eau : eaux stagnantes, ruissellements, rejaillissements, remontées capillaires, etc.

Pour éviter la dégradation de la partie basse des murs, on édifie un soubassement en maçonnerie de pierres ou de briques d'au moins quarante centimètres de hauteur.

Sa largeur est déterminée par la hauteur de l'édifice ; en effet, le bon rapport entre la hauteur et l'épaisseur du mur est situé entre 1/10 et 1/15. Mais il est difficile de descendre en dessous de 40 cm d'épaisseur sans gêner le travail des maçons piseurs.

C. Élévation du mur, suivant les méthodes lyonnaise et auvergnate

Sur le soubassement établi et nivelé, l'emplacement des dés est tracé, à un espacement déterminé par la longueur de la banche (~ 80 cm d'axe en axe pour des banches de 2,60 m). La maçonnerie est remontée d'une assise, en réservant des tranchées au droit de ces emplacements, pour pouvoir y loger les entretoises.

Puis, à partir d'un angle de l'édifice, la première série de quatre clefs est posée, les banches montées, avec poteaux, jous ou liages de cordes, gros du mur, fond de banche à l'aplomb de l'angle, le tout bien serré avec les coins (et les cordes dans les banches auvergnates), la partie inférieure des banches enserrant le mur de soubassement.

Les tranches des clefs sont ensuite couvertes de quelques pierres minces et d'un coulis de mortier de chaux, pour rattraper l'arase générale du mur du soubassement.

Le même mortier est prolongé en filet, sur le pourtour de l'encaissement, afin d'assurer une bonne finition des joints entre deux banchées.

La terre est ensuite versée dans le coffrage, par couches successives (les "tarrèdes") d'une vingtaine de centimètres d'épaisseur, ramenée à 10 cm par damage à coups de pisoirs administrés par des piseurs montés dans la banche, ceci pour assurer une parfaite adhérence entre les deux lits.

Après plusieurs passages successifs, la première couche est bien battue, et l'on passe à la suivante, jusqu'à remplir le moule, lit après lit.

Le coffrage est alors immédiatement démonté, et remonté, en recouvrant l'extrémité de la banchée précédente.

Cette extrémité est soit verticale soit, le plus souvent, oblique, à 45°. Cette disposition permet d'éviter l'utilisation du fond de banche, ce qui facilite le montage et le démontage du coffrage, et permet, en outre, une meilleure liaison de deux banchées successives.

Un joint de mortier est mis en œuvre en bordure de cette extrémité, avant de commencer la banchée suivante. L'opération est répétée jusqu'à avoir fait le tour complet de l'édifice, façades et refends tout ensemble.

On aura pris soin de vérifier de temps à autre, la verticalité du mur, à l'aide d'un fil à plomb.

La seconde assise est alors exécutée de la même façon, en chevauchant perpendiculairement, dans l'angle, la première assise, en décalant les trous des clés, pour éviter la formation de fissures verticales, et en tournant dans le sens contraire.

Puis, on laisse sécher de une à trois semaines, avant de recommencer les mêmes opérations.

Selon les régions, le pisé est laissé brut, ou badigeonné d'un lait de chaux, ou enduit à la chaux, au plâtre, ou encore recouvert d'un torchis ou d'un blanc de bourre, mélange de chaux, d'argile blanche, de sable et de poils d'animaux.

D. • Traitement des points particuliers

a • les angles :

ils peuvent être en pisé, avec interposition de lits de chaux entre chaque couche, ou bien faits d'une armature de branchages à intervalles réguliers.

On trouve souvent des traitement d'angles en chaînages de maçonneries : pierres, galets, briques, etc.

b • les chaînages :

les murs sont généralement chaînés, en encastrant dans l'épaisseur des murs, dans le plan horizontal, des madriers d'environ 15 cm de côté, assemblés aux angles. Ces bois sont noyés dans un bain de mortier de plâtre ou de terre, s'ils sont en chêne, de chaux s'ils sont en sapin, à raison de deux ou trois plans de chaînage sur une hauteur d'étage.

c • les ouvertures :

elles sont réalisées en posant deux closoirs dans la banche, légèrement évasés vers l'intérieur pour créer un ébrasement biaï.

Elles peuvent être traitées avec des jambages et des linteaux en bois ou enco- re en maçonneries de briques.

d • les planchers :

deux mises en œuvre sont possibles :

- soit en creusant le logement des poutres et solives dans les murs une fois qu'ils sont montés sur toute leur hauteur,
- soit en réservant l'encastrement des poutres et solives au sommet des murs, lorsque l'on a monté une hauteur d'étage. Ces réservations doivent se faire en dessous du niveau des clefs de la première assise de l'étage immédiatement supérieur.

Toutes précautions doivent être prises pour protéger l'about des pièces de bois noyées dans les murs (enduction d'asphalte, par exemple).

e • les charpentes et couvertures :

on ne trouve généralement pas de fermes de charpente dans les maisons en pisé, mais plutôt des charpentes simplifiées, à pannes reposant sur les pignons et sur des refends.

La couverture est celle utilisée traditionnellement dans la région. Elle peut être de tout type : chaume, ardoises, tuiles plates ou canal, etc., mais ne présente pas forcément de grands débords.

Elle doit être parfaitement étanche, les infiltrations d'eau dans les parties hautes des murs de pisé étant particulièrement redoutables pour la pérennité de l'édifice.

4°. CONSTRUCTION DES MURS EN "MÂSSE"

Le mode de construction appelé "mâsse" ou "bauge" était très répandu en Angleterre et à proximité des zones argileuses du Cotentin : de nombreux bâtiments construits ainsi subsistent encore. Exploitant au mieux les ressources locales, le mur en mâsse est constitué d'un mélange d'argile, de sable, d'éclats de pierre et de fibres végétales, à la texture uniforme.

Particularité : le mur en mâsse est construit sans ossature interne ; c'est sa forte épaisseur et sa cohésion interne qui lui confèrent sa solidité.

Maison construite en mâsse



A • Technique de construction traditionnelle :

L'argile est mouillée, retournée, tapée à la fourche et piétinée par des chevaux, jusqu'à l'obtention d'un mélange plastique. On y ajoute ensuite des fibres (paille, foin, crin...) à raison de 25 kg environ par m³, et on la foule au pied. Le mélange frais est alors monté à la fourche, en lits superposés et croisés, puis tassé à la trique. Après 2 à 3 semaines de séchage, les murs sont retaillés à la serpe ou à la bêche pour verticaliser les parements intérieurs et extérieurs ; puis un coup de truelle lisse les parements si aucun enduit n'est prévu.

Sur la hauteur de rejaillissement des eaux de pluie, la base du mur est généralement réalisée en maçonnerie traditionnelle de moellons. Les angles du bâtiment le sont parfois aussi, qu'il s'agisse d'une disposition d'origine ou d'un renfort ultérieur.

Fenêtres et portes sont très peu nombreuses et se limitent à de simples trous réservés lors du montage du mur, avec jambages et linteau en bois. Il arrive qu'ils soient même simplement retaillés à la hache dans le mur fini et sec.

B • Principales pathologies

Les principales pathologies sont liées à l'humidité. Ce sont aussi les plus graves car elles sont d'ordre structurel. Non traitées, elles peuvent affecter rapidement la construction jusqu'à son effondrement.

Les désordres se manifestent essentiellement de trois façons :

- les fissures,
- le flambement des murs,
- la décomposition de la terre.

a • Les fissures :

Les plus caractéristiques sont les fissures de retrait, dues à la mauvaise qualité de la terre employée, à sa trop grande humidification lors de l'élévation des murs, à un séchage trop rapide ou encore à de fortes variations hygrométriques.

Elles sont verticales et espacées assez régulièrement, de 50 cm à 1 m.

D'autres types de fissures, plus proprement structurales, sont dues à un dépassement des possibilités de résistance du matériau à des contraintes mécaniques.



Construction en masse : détail du soubassement en pierre

Rappelons à ce sujet que le matériau terre supporte mal les efforts de traction, flexion ou cisaillement, et ne travaille bien qu'en compression.

Les fissures structurales sont en général localisées en des points précis : ouvertures, appuis de poutres, liaisons avec des matériaux durs.

Elles peuvent aussi apparaître en pleine masse du mur, en cas de désordres au niveau des fondations.

b • Le flambement des murs :

Il arrive que les murs forment un ventre, sans pour autant que des fissures apparaissent, la terre présentant d'importantes caractéristiques de fluage.

Ce phénomène est dû à de fortes contraintes mécaniques, qu'un trop grand élancement du mur, l'absence de chaînage ou le nombre trop important d'ouvertures ne lui permet pas d'encaisser.

c • Décomposition de la terre :

Cette décomposition relève le plus souvent d'une pathologie humide : le matériau devient friable, s'effrite, s'érode ; là aussi, peuvent être mis en cause un mauvais choix de terre, une mauvaise exécution, l'action de parasites végétaux, d'insectes ou de rongeurs, les influences climatiques (vent + pluie).

Chapitre 4

LES MORTIERS

La méthode de construction la plus répandue consiste à assembler des éléments de pierres ou de briques avec un mortier.

Le rôle de ce mortier est très important : il permet de donner une certaine cohésion aux éléments de pierres ou de briques, et de mieux répartir les charges.

Il convient toutefois de ne pas les considérer comme une colle ou un adhésif, rendant la construction monolithique et indéformable. Bien au contraire – et ceci est particulièrement vrai pour les constructions des époques romane et gothique – ils conservent une certaine "souplesse" et permettent ainsi aux édifices de mieux supporter nombre de déformations dues à des causes diverses : trop fortes poussées de voûtes, faiblesse des fondations, etc.

■ Pour restaurer une maçonnerie ancienne, il est donc très important de bien analyser le mortier d'origine, et d'en employer un identique.

Les mortiers sont constitués essentiellement par malaxage de sable ou granulats, de liant et d'eau. Certains produits peuvent y être ajoutés pour changer leur coloration ou améliorer leurs propriétés.

Fabrication d'un mortier sable et chaux



■ LES SABLES ET GRANULATS

Dans tout mortier, quelle que soit la nature du liant, on utilise des granulats, charges inertes permettant de réduire la quantité de liant et dont le rôle et les effets varient selon la nature de ce dernier.

Mélangés à des ciments et des chaux artificielles, les granulats doivent être les plus neutres et uniformes possible, le liant assurant à lui seul, de par ses caractéristiques mécaniques élevées et son opacité, la résistance et la coloration du mortier.

Dans les mortiers réalisés avec des liants naturels (chaux ou plâtres) – les seuls pratiquement qui nous intéressent pour la restauration des monuments anciens – le choix des granulats est important car ils ont pour rôle :

- de donner de la résistance aux mortiers, dont ils constituent l'ossature,
- de diminuer les phénomènes de retrait, en donnant du volume au mortier,
- de colorer les mortiers, en jouant sur l'effet de transparence de la chaux,
- de personnaliser l'aspect du mur et lui donner ses caractéristiques régionales par la diversité des matériaux locaux employés.

Les granulats utilisés pour la réalisation des mortiers d'enduit sont les sables.

Matériaux formés de granulats fins, ils proviennent de la désagrégation, naturelle ou artificielle, d'une roche sédimentaire. Ils sont le plus souvent siliceux, ou silico-calcaires, rarement calcaires (poudre de marbre, par exemple).

Ils proviennent principalement :

- du lit des rivières,
- du littoral marin (soigneusement lavés),
- de carrières,
- de génération artificielle, par concassage de roches.

Dans le bâti ancien, les sables présentent des grains variant de l'infiniment petit (fines) à des éléments de plus de 10 mm, voire 15 mm pour les plus gros d'entre eux (graviers).

En tout état de cause, un sable bien "équilibré" doit présenter des grains de diamètres différents, permettant de limiter les vides, et donc d'éviter le surdosage en liant pour combler ceux-ci. En effet, un dosage trop riche en liant, peut provoquer un retrait important et des risques de micro-fissuration (faïençage).

Propriétés requises

Le sable utilisé pour réaliser des mortiers d'enduit doit :

- comporter une courbe granulométrique répartie (granulats de taille différente) : les enduits sont réalisés avec des sables dont la courbe granulométrique idéale est comprise entre 0,3 mm et 15 mm.

Dans le bâti traditionnel on observe des sables plus grossiers : il conviendra donc de faire des essais.

A l'inverse, des sables trop fins et un dosage important entraînent du retrait, ils sont donc à utiliser avec prudence et sur de faibles épaisseurs. On les associera avec des chaux aériennes permettant un resserrage successif de l'enduit. Dans tous ces cas, des essais de convenue sont à réaliser.

- être propre :
les sables ne doivent pas comprendre plus de 5 % d'éléments très fins comme les argiles, terre végétale, charbons.
- être inerte :
le sable utilisé doit être chimiquement inerte. Il faut éviter tous les sols comportant des sels, des déchets organiques. Dans le cas de sable peu sûr, il sera nécessaire de réaliser des tests de convenance, notamment dans le cas de sable de mer.
- être homogène :
pour la réalisation d'un enduit, et afin d'obtenir une bonne homogénéité sur l'ensemble des zones traitées, un approvisionnement global et unique du chantier doit être recherché.

Foisonnement des sables

Dans la composition du mortier, les volumes indiqués pour les sables supposent qu'ils sont à l'**état sec**. Or, dans la plupart des cas, les sables sont **plus ou moins humides** : la présence de l'eau augmente leur volume apparent, **c'est le foisonnement**.

Le foisonnement augmente en fonction du degré de finesse du sable. Il peut atteindre des valeurs relativement importantes, et si l'on n'en tient pas compte, on obtiendra un sous-dosage en sable préjudiciable à la bonne composition du mortier et à son ouvrabilité.

Sauf étude plus détaillée du problème, on peut, en première et grossière approximation, prendre en compte un coefficient de foisonnement de + 25%. Autrement dit, pour un volume apparent de sables sec de 400 litres, il faut compter en fait 500 litres.

Granulats particuliers

Certains granulats sont recherchés pour leur **réaction pouzzolanique** (réaction des silicates et aluminates contenus dans les granulats avec la chaux et l'eau de gâchage pour former un hydrate stable donnant au mortier une certaine hydraulicité).

Parmi ces principaux granulats, on peut citer :

- les tuileaux, tuiles, briques pilées, pouzzolanes, cendres, etc...

D'autres granulats sont recherchés pour des questions d'**aspect ou de coloration** :

- certaines poudres de pierre (marbre notamment), talc,
- certains limons ou argiles, utilisés notamment pour la coloration, ou en revêtement particulier sur certaines maçonneries argileuses.

■ LES LIANTS

On appelle "liants" les matières qui ont pour propriété d'assembler par collage des matériaux inertes. Le liant a une influence sur les résistances des mortiers, notamment la résistance à l'écrasement.

Selon leur origine, on distingue trois catégories de liant :

- organique
- minéral
- synthétique

Les principaux liants utilisés dans la construction – mais dont certains sont à proscrire dans les maçonneries des monuments anciens – sont d'origine minérale : ce sont les **chaux**, les **plâtres** et les **ciments**.

1°. CHAUX

La chaux a été utilisée depuis 6000 ans de façon très constante dans la construction.

Jusqu'à la révolution industrielle, elle a été le principal liant de la construction, qu'elle ait été incorporée à des mortiers de hourdage, à des enduits de parement, ou bien utilisée à l'état pur pour lier des peintures ou badigeons. Elle a également servi à réaliser les stucs et les fresques.

Elle a donc grandement participé à la solidité et la beauté des édifices, prestigieux ou non, de l'Antiquité à l'époque moderne.

La chaux est obtenue par calcination de pierres calcaires réduites en poudre, suivie d'une opération d'extinction à l'eau : selon la qualité des roches extraites, la nature de la chaux obtenue sera différente.

Composition

Analysées chimiquement, les chaux ont pour principaux composants, essentiellement des oxydes de calcium (CaO) et/ou des hydroxydes de calcium [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], pouvant comprendre des quantités moindres de magnésium (MgO), d'hydroxyde de magnésium [$\text{Mg}(\text{OH})_2$], de silicium (SiO_2), d'aluminium (Al_2O_3) et de fer (Fe_2O_3).

C'est actuellement la marque européenne EN 459 qui s'applique. Les chaux se divisent en deux catégories bien distinctes, selon que leur prise s'effectue sous l'action du gaz carbonique de l'air - **chaux aériennes** - ou sous l'action de l'eau - **chaux hydrauliques** -.

A • Les chaux aériennes

Grasses ou maigres suivant qu'elles sont obtenues à partir de calcaires très purs (chaux grasses) ou de calcaires contenant des impuretés (magnésie, silice, aluminium, fer), on les trouve sous deux formes :

a • les chaux vives

Elles sont constituées principalement d'oxyde de calcium et éventuellement d'oxyde de magnésium (chaux Dolomitiques). Elles sont obtenues par calcination dans un four, vers $900-1000^\circ$, de roches calcaires (carbonate de calcium CaCO_3 , dit pierre à chaux), donnant l'oxyde de calcium CaO , ou chaux vive anhydre, et un dégagement de gaz carbonique.

Elles étaient autrefois – très rarement aujourd'hui – éteintes sur le chantier : lors de l'opération d'extinction, les chaux vives ont une réaction exothermique lorsqu'elles entrent en contact avec l'eau.



Fosse à chaux sur un chantier en Roumanie

Fabrication de la chaux grasse sur un chantier médiéval

1 – Opération de cuisson : elle dure 3 jours, les pierres calcaires sont calcinées à 900° C ou 1000° C, dans un four.

2 – Opération d'extinction : on éteint ces pierres calcinées en les mélangeant à de l'eau dans un bac en tôle ou en bois. À côté de cette cuve, a été creusée une fosse de terre bien damée qui servira de bassin de refroidissement pour la chaux. Il est conseillé de limiter les phases successives de fabrication de 70 à 140 litres de chaux. On verse de l'eau sur la chaux en roche à raison de 50 % du volume, soit 35 litres d'eau pour 70 litres de chaux. La chaux fuse et c'est alors qu'il faut la malaxer avec beaucoup de patience pour en faire une espèce de pâte jusqu'à la fin de l'ébullition. On laisse couler cette sorte de pâte dans la fosse, en prenant soin de retenir les morceaux de roche non encore fondus. On laisse reposer cette masse pendant 15 jours, au moins, à l'air. Cette chaux peut être conservée pendant plusieurs années.

(Y.M. FROIDEVAUX "Techniques de l'architecture ancienne").

b • les chaux éteintes

A partir de chaux vives finement broyées, on procède à l'hydratation, ou "extinction contrôlée" de cette chaux vive pour obtenir l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 , ou chaux éteinte, prête à utiliser comme liant après tamisage ou blutage.

La réaction de prise de cette chaux est une réaction de carbonatation, dans laquelle le gaz carbonique de l'air (CO_2) se combine avec la chaux éteinte pour donner du carbonate de calcium (calcite) et de l'eau qui s'évapore : $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \gg \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$.

Cette réaction, lente et progressive, s'effectue à l'air (d'où le nom de chaux aérienne) : le durcissement complet qui suit la prise d'un enduit ou d'un mortier de chaux aérienne peut durer plusieurs mois ; sous l'eau, ou à l'abri de l'air, la chaux grasse peut rester 6 mois à un an (ou même plus – voir encart) avant de faire prise.

De la "souplesse" des constructions érigées avec un mortier de chaux aérienne.

Lors de la dernière guerre mondiale, la ville de Rouen subissait un bombardement en règle. De nombreux obus éclataient à l'intérieur de la cathédrale, détruisant le bas côté sud et détériorant bon nombre de piles dans les autres parties de l'édifice. En particulier, une des piles du transept, formée d'un faisceau de colonnettes, et atteignant 12 m de circonférence, était si gravement atteinte qu'il fut décidé de la remonter et de la reconstruire.

Après avoir mis en place le chevalement nécessaire à l'exécution de ces travaux, le démontage commença.

Quelle ne fut la stupéfaction de découvrir qu'au centre de la pile, où l'air n'avait pu pénétrer, le mortier du 13ème siècle était à l'état pâteux, n'ayant toujours pas fait sa prise !

B • les chaux hydrauliques NHL et HL

Les chaux hydrauliques peuvent contenir jusqu'à 22% d'argile : cela leur donne des propriétés proches de celles des ciments.

Au contact de l'eau, elles ont la propriété de faire prise et de durcir. Le dioxyde de carbone présent dans l'air contribue également au processus de durcissement.

Le taux d'argile définit "l'indice d'hydraulicité" ; une chaux est dite :

- faiblement hydraulique si son taux d'argile est inférieur à 8 %,
- moyennement hydraulique, avec un taux d'argile de 8 à 14 %,
- éminemment hydraulique, à partir de 20 % d'argile.

On distingue :

a • les chaux hydrauliques naturelles dites chaux vives (NHL / Natural Hydraulic Lime)

Ce sont des chaux obtenues par la calcination de calcaire plus ou moins argileux ou siliceux, avec réduction en poudre par extinction, avec ou sans broyage, et sans ajout ; elles sont appelées "chaux hydrauliques naturelles" (NHL).

Les chaux hydrauliques naturelles auxquelles on additionne de façon appropriée des matériaux pouzzolaniques ou hydrauliques, jusqu'à 20 %, sont désignées par NHL-Z.

b • les chaux hydrauliques (HL / Hydraulic Lime)

Elles sont fabriquées par calcination de calcaires contenant de l'argile à l'état naturel ; après cuisson, broyage et extinction, on leur incorpore d'autres constituants pour corriger ou améliorer le produit obtenu : fillers calcaires, laitier, pouzzolanes, grappiers broyés.

Ces chaux sont constituées principalement de silicates de calcium, d'aluminates de calcium et d'hydroxyde de calcium produits par la calcination, l'extinction et le broyage de calcaires argileux et/ou par le mélange avec de l'hydroxyde de calcium de matériaux appropriés.

Des additifs organiques peuvent être ajoutés à tous les types de HL et NHL.

CONSEIL DE PRUDENCE

L'ancienne appellation "chaux hydraulique artificielle" ou XHA, qui distinguait des ciments Portland additionnés de fillers calcaires inertes, n'existe plus. Ces produits rejoignent désormais les ciments.

Marquage

Les chaux de construction conformes au présent document doivent porter un marquage sur le sac ainsi que sur le bon de livraison, sur la facture, ou sur tout autre document joint à la livraison, avec les indications suivantes :

- 1- le type de chaux de construction
- 2- l'appellation commerciale du type de chaux de construction (si différente du type)
- 3- le lieu de fabrication
- 4- le poids brut (si le conditionnement est en sac)

Classification des types de chaux de construction

Les différents types de chaux sont classés en fonction de leur teneur en hydroxyde de calcium (chaux calciques / CL), en hydroxyde de magnésium (chaux dolomitiques / DL) ou en fonction de leur résistance à la compression (chaux hydrauliques HL et NHL), comme suit :

1- chaux calcique 90	.....CL 90
2- chaux calcique 80	.....CL 80
3- chaux calcique 70	.....CL 70
4- chaux dolomitique 85	.....DL 85
5- chaux dolomitique 80	.....DL 80
6- chaux hydraulique 2	.....HL 2
7- chaux hydraulique 3,5	.....HL 3,5
8- chaux hydraulique 5	.....HL 5
9- chaux hydraulique naturelle 2	....NHL 2
10-chaux hydraulique naturelle 3,5	...NHL 3,5
11-chaux hydraulique naturelle 5	....NHL 5

Plus la teneur en argile est importante, plus l'indice d'hydraulicité est important et plus la résistance à la compression augmente.

2°. PLÂTRES

Le plâtre est connu depuis environ 10000 ans : la pyramide égyptienne de Chéops (2800 avant J.C.) en comporte.

Déjà utilisé par les Grecs, le plâtre a été introduit en Gaule par les Romains, et ses traditions de fabrication ont été maintenues par les moines (Citeaux, Cluny) ; son utilisation s'est développée à partir du XIII^e siècle pour les cloisons, jointoiements, crépis, puis pour les plafonds et la décoration.

La présentation de ce matériau millénaire en éléments préfabriqués (carreaux et plaques de plâtre) en fait un composant actuel et moderne du bâtiment, en particulier en France où les gisements de gypse sont abondants (surtout en région parisienne, Provence et sud-ouest).

Composition

Le plâtre est obtenu à partir de sulfate de chaux (gypse) dit "pierre à plâtre" ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) déshydraté par cuisson modérée, puis broyé.

On l'utilise en le réhydratant par mélange dans l'eau. Il se forme alors un gel colloïdal qui cristallise de façon irréversible, avec un léger gonflement et un dégagement de chaleur. L'enchevêtrement des cristaux en aiguilles, dit feutrage, donne sa cohésion au plâtre.

Même serré, le plâtre est toujours gâché avec une quantité d'eau (60 à 90 %) très supérieure à celle qui serait théoriquement nécessaire à sa réhydratation (de l'ordre de 25 % de son poids) ; d'où un temps de séchage relativement long avant élimination complète de l'eau en excès.

Principales caractéristiques du plâtre

Le plâtre est un matériau de dureté moyenne (sauf plâtre spécifique) : selon son taux d'eau de gâchage, sa résistance à la compression après 7 jours de séchage, va de 30 à 90 kg/cm². Sa résistance à l'arrachement va de 10 à 16 kg/cm².

La densité apparente du plâtre dépend aussi de son taux de gâchage : elle va de 1 (gâchage à 80 % d'eau) à 1,45 (gâchage à 45 %) et 1,70 pour le plâtre aluné. Le plâtre offre une excellente résistance au feu mais résiste mal à une exposition fréquente à l'humidité.

Fabrication du plâtre

Selon le niveau de déshydratation auquel on soumet le gypse par "cuisson", on obtient diverses qualités de plâtres allant des hémi-hydrates ou semi-hydrates, vers 150°C ($\text{CaSO}_4, 1/2\text{H}_2\text{O}$) aux anhydrites (CaSO_4), de 200 à 1200°C. La fabrication a lieu par voie sèche, par cuisson du gypse concassé dans des fours verticaux (four Beau). Elle est suivie d'un broyage (mouture) et de mélanges avec des ajouts ou avec d'autres qualités de plâtre pour obtenir les caractéristiques voulues. Bien que rare, la fabrication par voie humide se pratique aussi, en autoclave, sous pression, pour des plâtres spéciaux (par exemples, plâtres à mouler dentaires).

Principales variétés et dénomination des plâtres utilisés dans la restauration des monuments anciens

Plâtre gros de construction ou **PGC** : plâtre courant de mouture grossière, utilisé surtout pour les premières couches d'enduits et les scellements au plâtre.

Plâtre fin de construction, ou **PFC** : plâtre de mouture fine, exempt de gros grains, utilisé pour les plafonds et les couches de finition des enduits coupés

ou lissés.

D'autres types de plâtres sont employés pour des ouvrages spécifiques.

Par exemple :

Le plâtre aluné : après une première cuisson vers 150 °C, le plâtre est additionné, par immersion, d'une solution d'alun, puis recuit. Sans retrait ni expansion, il peut être utilisé en mortier par addition de granulats (calcaire, marbres) ; dur, pouvant être poli comme un marbre, il sert surtout à la confection des ouvrages en stuc.

Le plâtre boraté : plâtre pour stucs, obtenu en lui ajoutant une petite quantité de borate de soude.

Le plâtre-chaux

C'est un mélange souvent employé : il est constitué de plâtre, de chaux aérienne et d'une petite quantité de sable.

On l'utilise pour la confection d'enduits extérieurs, surtout dans la région parisienne ; une imperméabilisation superficielle est nécessaire par fluatation ou par traitement au silicate de potasse. Cette formule est plus résistante, en extérieur, que celle des enduits ou mortiers de plâtre pur qui nécessitent des ouvrages de protection contre la pluie et les ruissellements d'eau – bandeaux à larmier à chaque étage, peinture périodique.

Principaux emplois du plâtre

Les emplois du plâtre dans le bâtiment concernent en quasi-totalité des ouvrages intérieurs : enduits sur murs et plafonds, doublages et cloisons en éléments préfabriqués (carreaux et plaques cartonnées) ; le jointoiement au plâtre des pierres de taille, les ouvrages de stuc, de staff et certains ragréages de sols à base de plâtre complètent ces emplois intérieurs ; par contre, l'emploi du plâtre se retrouve sous forme d'augets de planchers.

L'emploi en enduit extérieur se trouve fréquemment dans les vieux quartiers de Paris, sous forme de mortier plâtre-chaux ou de plâtre gros à peindre.

CONSEILS DE PRUDENCE

- ne pas réaliser un enduit de plâtre sur un support avant qu'il n'ait terminé son retrait et soit bien stabilisé.
- sur une cloison mince, ne pas appliquer de plâtre (léger gonflement) sur une face, et un enduit de ciment (léger retrait) sur l'autre face.
- ne jamais recouvrir de plâtre un joint de structure ou de dilatation.
- ne jamais appliquer de ciment sur un support contenant du plâtre. Une exception concerne cependant des mortiers-colles spéciaux à base de ciment caséiné, destinés à la pose de revêtements céramiques sur plâtre.
- ne pas utiliser le plâtre pour des ouvrages qui risquent d'être fréquemment exposés à l'humidité.
- tenir compte du fait que le plâtre attaque les métaux ferreux (châssis de baies, armatures, outillage...)

3°. CIMENTS

Le ciment est un liant minéral en poudre, obtenu à partir de clinker, finement broyé – les clinkers sont de petites boulettes dures de silicate, ou nodules,

qui résultent de la cuisson d'un mélange d'argile et de calcaire.

Cette poudre, tout comme la chaux ou le plâtre, mélangée à de l'eau, fait prise et permet d'agglomérer entre eux des sables et des granulats pour constituer des mortiers ou des bétons qui sont de vraies roches artificielles.

La mise au point du premier ciment, en 1824 à Portland (Angleterre) est l'aboutissement de longues recherches et expérimentations menées par les bâtisseurs, puis les ingénieurs, pour l'amélioration des propriétés et des performances des mortiers de chaux.

La période de la reconstruction, après la Seconde Guerre mondiale, marque un tournant décisif dans le déclin de la chaux et l'avènement du ciment dans la construction. Mais, quelques décennies plus tard, ce dernier a clairement montré ses limites, tant au niveau de son comportement – en particulier lorsqu'il est allié aux maçonneries anciennes – que de son aspect esthétique. Les propriétés inégalables de la chaux sont redécouvertes à la faveur de la sauvegarde et la réhabilitation des centres anciens.

Pierres altérées par l'utilisation
de mortier de ciment



CONSEIL DE PRUDENCE

Même pour une utilisation, mesurée et maîtrisée, en coulis de confortation interne ou en réalisation de certaines structures de consolidation, l'emploi du ciment dans les maçonneries de pierres est formellement déconseillé.

Pendant les années '60 à '80, le ciment a été considéré comme une panacée à cause de sa résistance mécanique et son étanchéité. Mais ce produit a depuis largement démontré sa dangerosité, notamment sur le bâti ancien. Les dommages sont souvent irréversibles, car derrière la façade recouverte de ciment, la maçonnerie ou le pan de bois se sont désagrégés.

En effet, le ciment agresse la pierre : s'il est utilisé pour hourder des maçonneries de moellons, des sels se produisent, drainés par l'effet de capillarité différentielle vers la zone de jointure. La pierre subit alors une perte de ses particules ultra fines et devient poudreuse.

De même, lorsqu'un enduit de ciment et de sable est appliqué sur un mur en pierres, l'humidité emprisonnée ronge la pierre, l'enduit cloque et se détache en plaques. Les pierres, irrémédiablement altérées devront être remplacées. (cf. photo ci-dessus).

Lorsque les joints sont effectués au ciment, ils constituent une barrière étanche et contraignent l'humidité à migrer à travers la pierre ; à la longue, celle-ci est comme rongée, en retrait de plusieurs centimètres par rapport aux joints de ciment.

Autre erreur souvent commise : appliquer du ciment en soubassement d'une façade en maçonnerie : l'eau emprisonnée dans la maçonnerie est contrainte à remonter par capillarité jusqu'au bord supérieur du soubassement pour s'évaporer. Cette zone se dégrade alors rapidement.

4°. EAU

L'eau rentre dans la composition des mortiers afin de rendre plastique les mélanges poudreux, de permettre la carbonatation des chaux par dissolution du gaz carbonique, de permettre la prise des chaux hydrauliques.

Propriétés


L'eau doit être propre (norme NFP 18.303). Il est conseillé d'utiliser l'eau potable. Dans le cas contraire, il convient d'être attentif à ne pas utiliser les eaux chargées en sels (sulfates, eaux résiduelles...) ou acides.

Dans le cas de l'eau de mer dont l'usage traditionnel est attesté mais qui est a priori proscrite, il est nécessaire d'effectuer des essais de tenue et d'aspect (possibilité d'apparition de nuances, d'efflorescences).

5°. PRODUITS D'AJOUTS

Certains produits peuvent, par ailleurs selon les cas, être ajoutés au mortier afin d'en modifier les propriétés, c'est notamment le cas pour :



 Ancienne usine d'oxyde rouge

- les pigments, pour colorer les mortiers
- les armatures, pour renforcer la cohésion des mortiers
- les liants complémentaires divers

A noter : l'ajout de ciment blanc, ou autre liant artificiel, doit être évité ou rester très limité.

Les pigments

Les pigments sont des poudres colorées, insolubles, d'origine minérale. Ils sont utilisés traditionnellement pour peindre des parements en les mélangeant à un lait de chaux. Aujourd'hui on les utilise aussi en les mélangeant au mortier pour les colorer dans la masse, dans ce cas la norme du DTU 26.1 prévoit de ne pas dépasser 3 % du poids de chaux, mais on peut y déroger en fonction de la granulométrie et de la propreté du sable.

L'emploi de ces pigments oblige à contrôler leur tenue en milieu alcalin (compatibilité avec la chaux) : celle-ci est très bonne pour les terres naturelles (terre de Sienne, terre d'Ombrie, etc.) et les ocres, elle doit être vérifiée dans le cas d'oxyde métallique ou de tout autre produit colorant (généralement à déconseiller).

Les armatures

On trouve de nombreux cas d'armatures d'enduits faites de soies animales (poils de vache), de fibres végétales (lins), de pailles. Ces éléments constituent principalement une armature de l'enduit, ils ne sont pas normalisés et toute utilisation impose des essais de convenance, de tenue.

6°. ADJUVANTS

Certains produits appelés "adjuvants" peuvent être incorporés au mortier dans des quantités très faibles (≤ 1 % du poids de liant) afin d'en améliorer les propriétés.

Amélioration des propriétés des mortiers

Les adjuvants utilisés peuvent améliorer la tenue, la dureté, l'entraînement d'air, les propriétés hydrofuges du mortier.

Amélioration des propriétés de mise en œuvre

Les adjuvants utilisés peuvent améliorer l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau, le caractère mouillant. Ces adjuvants peuvent être des produits traditionnels ; il convient cependant de réaliser des essais préalablement et de vérifier la non-dégradation des propriétés des mortiers.

Les adjuvants contemporains doivent être utilisés conformément aux normes et prescriptions du fabricant, il convient dans ce cas de vérifier la compatibilité avec la chaux (milieux alcalins).

7°. MATERIAUX NON NORMALISES

Ce sont des contraintes d'ordre historique, de conformité d'aspect, de compatibilité avec la structure, etc... qui parfois imposent l'usage de matériaux non normalisés.

Ces matériaux, qui peuvent être de toutes origines (liant, terre, végétale, animale, etc.) seront employés avec prudence, après échantillonnage et essais systématiques de convenance s'il n'existe aucun avis technique ou procès-verbaux d'essais de laboratoire référencés.

Chapitre 5

LES ENDUITS

Les édifices anciens présentent fréquemment des maçonneries recouvertes de mortier – le plus souvent de même composition que celui utilisé pour la construction des murs – dénommé "enduit" lorsqu'il est utilisé en revêtement.

Le rôle de ces enduits est très important, aussi bien du point de vue de l'aspect de l'édifice que de celui de sa pérennité : c'est l'enduit qui confère son aspect final à la maçonnerie, mais également qui protège le parement extérieur du mur des intempéries.



Façade enduite en Provence

Si le premier point évoqué fait appel essentiellement à la culture et à la sensibilité du restaurateur, le second point mobilise ses connaissances et compétences techniques.

Il n'est qu'à voir, en effet, les conséquences désastreuses qu'un enduit de mauvaise composition peut avoir sur une maçonnerie, allant jusqu'à provoquer des altérations graves de la pierre.

Il est donc indispensable de bien connaître et d'utiliser à bon escient les différentes compositions et techniques de mise en œuvre des enduits.

Si la composition de base est en général simple et assez constante, la proportion des éléments constitutifs, leur teinte, l'ajout de certaines matières, la mise en œuvre et surtout la finition de surface varient beaucoup d'une région à l'autre, d'un type d'édifice à l'autre.

COMPOSITION ET MISE EN ŒUVRE DES ENDUITS

Les enduits traditionnels sont le plus souvent des mortiers à base de chaux. **ils sont réalisés en deux ou trois couches.**

- 1- une première couche** d'accrochage ou gobetis
- 2- une seconde couche** formant le corps d'enduit ou dégrossis
- 3- une troisième couche** appelée couche de finition

La résistance mécanique du mortier de chacune des couches constituant l'enduit doit être dégressive, la plus forte résistance mécanique étant assurée par la 1^{ère} couche d'accrochage (ou gobetis).

Schéma de principe
de l'enduit à trois couches

3^{ème} couche : LA FINITION

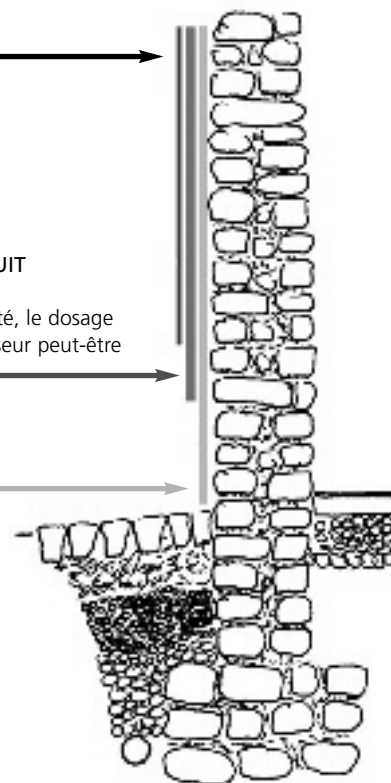
C'est la couche de présentation, de l'esthétique le mortier est faiblement dosé, la couche est fine 5 mm maxi

2^{ème} couche : LE CORPS D'ENDUIT

C'est la masse de l'enduit qui assure la protection l'étanchéité, le dosage adapté limite la fissuration l'épaisseur peut-être réduite au centimètre

1^{ère} couche : LE GOBETIS

C'est la couche d'accroche au support, le mortier est bien dosé, l'épaisseur faible.



Le dosage des mortiers d'enduit

La maîtrise des dosages est importante pour la réussite de l'enduit, tant pour sa résistance mécanique et sa pérennité que pour son aspect esthétique. Par le passé, des spécialistes comme Vitruve, Plin ou Palladio ont chacun décrit leurs dosages et leur façon de faire. Actuellement, un DTU donne le dosage en liant par m³ de mortier, pour support neuf et support ancien.

COUCHE	SUPPORT NEUF	SUPPORT ANCIEN
1 ^{ère} couche/gobetis	500 à 600 kg/m ³	400 à 450 kg/m ³
2 ^{ème} couche/corps	350 à 400 kg/m ³	300 à 350 kg/m ³
3 ^{ème} couche/ finition	250 à 300 kg/m ³	150 à 250 kg/m ³

On remarque qu'un support neuf nécessite un dosage plus riche en liant qu'un support ancien.

CONSEIL DE PRUDENCE

Certains tableaux peuvent indiquer un poids ou un volume de liant par m³ de sable : il convient de prendre en compte qu'il s'agit alors de sable sec; dans le cas de sable humide, son volume augmente par suite du foisonnement qu'entraîne la présence d'eau, ce qui modifie le dosage.

J. Claude Rochette, inspecteur général des Monuments Historiques, donne dans une intervention aux "Entretiens du Patrimoine" d'Amiens, en octobre 1989, les recommandations suivantes :

Comment réaliser un enduit complet ? En principe, trois couches sont nécessaires :

- 1- la couche d'accrochage ou gobetis qui doit pénétrer le plus possible dans le support et rester très rugueuse doit être réalisée avec un mortier hydraulique.
- 2- le corps de l'enduit généralement réalisé avec un mortier "bâtard" de chaux aérienne et de chaux hydraulique. Il doit être plus "maigre" que la couche d'accrochage.
- 3- la couche de finition réalisée avec un mortier de chaux aérienne pure. Cette couche de finition peut être appliquée de plusieurs manières : taloché, jeté à la truelle. Mais en général, pour un enduit destiné à rester apparent, on recommande de gratter ou de brosser un enduit appliqué à la taloche. Ceci afin d'ôter la laitance de chaux blanche et de faire "chanter" l'agrégat. Pour les mortiers destinés à être badigeonnés, on peut le lisser.

Voici en "volumes", un dosage moyen pour un enduit réalisé en trois couches.

	Chaux aérienne	Chaux hydraulique naturelle	Agrégats
Couche d'accrochage	0	1 vol.	2 vol.
Corps d'enduit	0,5 vol.	0,5 vol.	3 vol.
Couche de finition	1 vol.	0	4 vol.

Plus le mortier est "aérien" près de la surface, plus il est "maigre", c'est à dire chargé en agrégats.

- pour obtenir un bel et bon mortier de chaux à l'ancienne, la matière du liant est essentielle. Pas de salut hors de la chaux aérienne. Pas d'effets satisfaisants avec des liants hydrauliques (chaux hydrauliques, ciments) et ceci quels que soient les agrégats.

- le choix des agrégats ne vient qu'ensuite : sable de rivière, sablon coloré, rognures de pierre, tuileau ou brique pilés, pouzzolane, etc.

- le tour de main de l'ouvrier est également essentiel. Il faut parfois réapprendre aux entreprises le mélange des agrégats, le dosage en eau, les précautions à prendre dans l'application en fonction de la surface à traiter, du temps qu'il fait, de l'ensoleillement ; les gestes de la truelle et de la taloche, la sensibilité, le broyage, après la première prise, sont à retrouver.

Mais un bon mortier n'est pas tout. L'architecte n'intervient pas seulement pour définir sa composition. Il doit définir les parties à enduire et s'assurer qu'il opère sur des surfaces saines et protégées de l'eau. L'eau dans les maçonneries est en effet l'ennemi n°1 pour la conservation de la peau des édifices.

1° • EXÉCUTION DE LA PREMIÈRE COUCHE D'ENDUIT OU GOBETIS OU COUCHE D'ACCROCHAGE

La première couche a pour fonction d'assurer l'adhérence de l'enduit au support. Elle est donc fortement dosée en chaux, mais le dosage du liant doit être adapté aux caractéristiques du support.

Son épaisseur doit rester faible de façon que son retrait soit pratiquement achevé avant l'application de la 2^{ème} couche.

Le sable utilisé doit être de granulométrie grossière.

Le dosage en eau doit tenir compte notamment des conditions climatiques de pose.

CONSEIL DE PRUDENCE

La première couche permet de donner à l'enduit une accroche semblable à celle d'un mur maçonné ; elle n'est donc pas toujours indispensable sur une maçonnerie traditionnelle.

Le mortier est projeté vigoureusement sur le support, soit manuellement, soit à la machine. La surface de cette première couche doit être rugueuse pour favoriser l'adhérence de la 2^{ème} couche : pas d'opération surfaçage sur cette couche.

2°. EXÉCUTION DE LA DEUXIÈME COUCHE OU CORPS D'ENDUIT OU DÉGROSSIS

La deuxième couche, qui constitue le corps de l'enduit, lui donne sa forme définitive : elle assure le "planage" et la fonction d'imperméabilisation.

Elle doit être homogène et compacte : sa compacité est obtenue par un serrage à la taloche*. Son dosage en liant est plus faible que celui de la première couche afin de réduire les risques de fissuration (plus un mortier est chargé en chaux, plus le risque de faïençage est grand, lié au phénomène de retrait de la chaux au moment de la prise).

Cette couche est exécutée lorsque la première couche a effectué une partie de son retrait. Le délai d'attente, jamais inférieur à 3 jours, est variable et dépend de plusieurs paramètres (conditions atmosphériques, nature du support, constitution de l'enduit de 1^{ère} couche).

Le mortier du corps d'enduit doit avoir une consistance ferme mais maniable. La couche support (gobetis) doit être humidifiée, mais non ruisselante. L'application du corps d'enduit peut être effectuée en une ou deux passes, frais sur frais, suivant l'épaisseur, à la machine ou manuellement.

L'état de surface doit être rugueux (le lissage à la truelle est interdit).

Cette couche doit être réalisée en fonction des caractéristiques visuelles recherchées (planéité, rectitude des arêtes, gorges, arrondis, etc.) que l'on aura définies. Mais on ne doit pas rechercher une planéité totale : la présence des pierres doit pouvoir se sentir.

La valeur moyenne de l'épaisseur des deux premières couches doit assurer un recouvrement des maçonneries d'environ 10 mm.

Il est à noter que la plupart des enduits anciens étaient très peu épais, de 5 à 10 mm. En tout état de cause, l'important est de ne pas dépasser le nu extérieur des pierres d'encadrement (voir photo ci-contre).

L'uniformité d'aspect ne pouvant pas être garantie avec ce type d'enduit, il doit être complété par une couche de finition et un badigeon.

3°. COUCHE DE FINITION

La couche de finition est celle la plus fine. Elle peut ne pas dépasser 2 à 3 mm. Plus elle est fine, plus elle va "vibrer" dans la lumière. Les finitions d'enduits couvrent une large gamme dont les variations et les nuances constituent un patrimoine et un savoir-faire liés aux particularités régionales.

L'inventaire ci-après, qui n'est pas exhaustif, présente les principales finitions d'enduits et leurs utilisations fréquentes.

La couche de finition détermine l'aspect de l'édifice; dans le cas de finitions lisses, talochées, stuquées, elle assure également un rôle de protection et contribue à l'amélioration de l'imperméabilisation.

On ne saurait trop insister sur la nécessité d'employer – sauf cas bien spécifique tel que la restauration d'une tyrolienne de ciment d'un bâtiment récent, par exemple – la chaux aérienne pour cette couche de finition.

En effet, avec cette chaux, un léger brossage ou même un lavage à l'éponge de l'enduit exécuté dans les 48 heures après sa mise en œuvre, permet d'éliminer la laitance de chaux qui vient en surface lors du talochage de l'enduit, faisant ainsi ressortir la texture et la couleur des agrégats.

A l'inverse, la laitance de la chaux hydraulique, tout comme celle du ciment, est parfaitement indélébile, et recouvre totalement les agrégats, d'une teinte uniforme et froide : l'enduit ne "chante" pas.



Problème d'enduit en saillie par rapport à la pierre

Dans la composition de certains enduits se trouve une proportion de plâtre (en Ile de France). Dans d'autres, ce sont des poils de vache blancs, en particulier sur la face intérieure des murs des habitations en pan de bois, pour leur qualité isotherme. Il s'agit d'une recette locale dont voici la formule :

1ère et 2ème couches (couches de fond et de dressage) :

- 2 parties de sable rude
- 1 partie de chaux grasse coulée
- 8 kg de poils de vache par mètre cube de mortier.

Il est conseillé d'adjoindre à ce mélange entre 5 et 25 % de plâtre pour accélérer le durcissement.

3ème couche :

- 100 l de chaux grasse coulée,
- 5 l de sable de rivière tamisé,
- 500 g de poils de vache blancs,
- adjonction de plâtre (entre 15 et 25 %).

On trouve beaucoup de ces enduits dans les Ardennes.

Y.M. Froidevaux – Techniques de l'architecture ancienne

RECOMMANDATIONS DIVERSES :

- Les enduits ne doivent jamais être entrepris en période de gel ni, sauf précautions spéciales :
 - sur des supports trop chauds ou desséchés
 - par vent sec.
- Pour éviter les phénomènes d'efflorescences, il est interdit d'appliquer les enduits teintés par une température inférieure à 8°C et pendant les périodes particulièrement humides.
- Les dosages en liant du mortier de chacune des couches constituant l'enduit doivent de préférence être dégressifs, le gobetis (ou couche d'accrochage) étant le plus chargé en liant.
- Les joints de structure doivent obligatoirement traverser l'épaisseur totale de l'enduit et être obturés par un calfeutrement.
- Au voisinage des chaînes d'angles en pierre apparente, l'enduit doit être légèrement en retrait ou au même nu que la pierre, mais jamais en saillie.
- Les pièces en bois de faible largeur (20 cm) doivent être recouvertes par un papier fort, feutre, etc., et l'enduit doit comporter une armature de renfort. Pour les pièces importantes le C.C.T.P. précisera la méthode particulière de traitement de la jonction.
- La tranche supérieure d'un enduit doit être protégée. Si la protection n'est pas assurée par une toiture ou une saillie (appui de baie débordant par exemple), il peut être nécessaire de rapporter un ouvrage complémentaire (bavette de zinc, de cuivre ou de plomb, par exemple).
- Les enduits doivent être protégés contre les vents secs et chauds ou contre un fort ensoleillement par bâches, parapluies, etc. Les bâches en plastique translucide, susceptibles de provoquer une surchauffe, sont proscrites.

■ LES DIFFERENTS TYPES D'ENDUITS ET DE FINITION

Au-delà de son rôle technique de protection, l'enduit assure la mise en scène de l'architecture ; il possède son langage, ses codes, ses modes, et selon les effets qu'il développe, donne une signification au bâti qu'il habille.

Les différentes techniques de finition permettent de décliner tout un jeu de textures et de colorations, allant de l'imitation d'autres matériaux - souvent la pierre, plus inaccessible - à la création plastique pure.

C'est du bon "coup de main" du compagnon et de sa dextérité que dépendent le bel aspect de l'enduit mais aussi sa tenue dans le temps.

Crépis jetés à la truelle

Définition : La couche de finition est simplement jetée à la truelle, ce qui donne un aspect de surface grossier. Suivant la souplesse du mortier, les reliefs sont plus ou moins vifs, anguleux.

Utilisation fréquente : Traitement des façades secondaires (pignons) de bâtiment d'architecture plus élaborée.

Mise en œuvre : L'aspect et le grain de l'enduit sont liés essentiellement au choix de granulat (nature roulée ou concassée et granulométrie). L'utilisation de la chaux aérienne et/ou hydraulique naturelle est possible.

Crépis jetés au balai

Définition : La couche de finition est projetée à l'aide d'un balai (genêt, cyprès, bouleau, buis... suivant les régions) trempé dans un mortier très souple que l'on frappe sur un bâton ou réciproquement. Comme pour l'enduit jeté à la truelle, les reliefs peuvent être plus ou moins affirmés, jusqu'à prendre l'apparence d'une tyrolienne.



Crépi aspect
de finition "fouettée"

Dans certaines régions, le même balai de buis est utilisé pour ensuite frapper l'enduit au moment où il commence à faire sa prise. Il en résulte un aspect de surface très particulier et vivant, où l'on arrive à lire, en l'examinant de près, les empreintes des feuilles de buis dans l'enduit. Un exemple intéressant de cette technique peut se voir sur le bâtiment de relevage des eaux (XVIII^e siècle), au château de Méreville, dans l'Essonne.

Utilisation fréquente : Traitement des bâtiments d'habitation et édifices majeurs (châteaux).

Architecture d'enduits composés (panneautage, faux appareils).

Mise en œuvre : L'aspect et le grain de l'enduit sont liés essentiellement au choix de granulats (nature roulée ou concassée et granulométrie). L'utilisation de gravillons et de sable très fin peut être nécessaire pour obtenir un grain important.

L'utilisation de chaux hydraulique naturelle permet de meilleurs résultats. Cette technique oblige une bonne maîtrise des gestes.

Crépis "tyroliens"

Définition : Utilisation d'une tyrolienne pour projeter la couche de finition (appareil à projeter des gouttelettes).

Utilisation fréquente : Utilisation de ce type de crépis dès la fin du XIX^{ème} siècle et jusqu'au milieu du XX^{ème} siècle, pour des architectures très typées (rocaillage, Art Déco, etc...)

Mise en œuvre : L'utilisation de liant très hydraulique (ciment prompt) est nécessaire.

Traditionnellement ces enduits sont teintés par des oxydes saturés, bleus, lie-de-vin, gris foncé etc...

Crépis tyrolien



Enduits talochés

Définition : La couche de finition est lissée par une taloche de bois qui va permettre l'obtention d'une surface frottée.

Utilisation fréquente : Traitement de bâtiments d'habitation et d'édifices majeurs. C'est certainement le type d'enduit le plus courant. Peut servir de support aux enduits jetés.

Mise en œuvre : Utilisation préférentielle de chaux aérienne ou hydraulique naturelle.

L'utilisation d'une taloche bois limite les remontées de laitance.

Le choix de la granulométrie influe sur la texture de la surface.



Talochage de l'enduit

Enduits lissés à la truelle

Définition : Comme pour l'enduit taloché, la surface est lissée, mais cette fois-ci avec le dos de la truelle. Cette technique permet de faire sortir en surface la laitance du mortier et d'obtenir un aspect plus fermé.

Utilisation fréquente : C'est certainement le traitement le plus ancien.

Mise en œuvre : Préférer l'emploi d'une chaux aérienne. Utiliser un sable fin et propre.

Enduits grésés

Définition : Lorsque le mortier a fait sa prise, la couche de finition a durci, elle est poncée à l'aide d'une pierre abrasive.

Utilisation fréquente : Pratique fréquente au début du XXe siècle (volonté de perfectionnisme).

Mise en œuvre : Utilisation indispensable d'un liant très hydraulique.

Enduits talochés regarnis

Définition : Sur la couche de finition talochée, une couche de pâte de chaux et de charge (lait de chaux coloré, très épais) est incorporée et serrée à la lisseuse sur sous-couche encore fraîche.

Utilisation fréquente : Traitement de bâtiment d'habitation et d'édifices majeurs

Mise en œuvre : Sur la couche de finition, l'application d'une pâte de chaux aérienne colorée avec des pigments s'effectue à la lisseuse.

Enduits stuqués

Définition : La couche de finition de cet enduit est très dosée en liant et les granulats sont très fins (poudre de marbre). L'effet recherché est une grande finesse de surface, proche de la brillance d'un marbre.

Utilisation fréquente : Utilisation plus fréquente à l'intérieur, mais possible à l'extérieur uniquement sur enduit frais (marmorino). Influence italienne.

Mise en œuvre : Les applications imposent l'utilisation de chaux aérienne. La mise en œuvre se fait en différentes passes frais sur frais. En extérieur, possible uniquement sur enduit taloché frais.

Imitation de matières

C'est la pierre taillée qui est le plus souvent imitée, au minimum les encadrements de fenêtre, bandeaux moulurés ou chaînes d'angle, mais parfois la façade toute entière.

Définition : La nature du mortier varie suivant les ouvrages réalisés, les matériaux locaux, l'utilisation de mortier de plâtre et chaux ou de prompt et chaux est fréquente.

Utilisation fréquente : Traitement de bâtiments d'habitation, et d'édifices majeurs.

Mise en œuvre : Essentiellement le savoir-faire



Effet de rocaille imitant des rondins de bois



Imitation d'un appareil en pierre de taille

Viellissement artificiel des enduits

Certaines techniques de finition d'enduits sont parfois envisagées pour donner à l'enduit un vieillissement artificiel (suppression des laitances, dégagement des grains de granulat...).

On peut citer :

a • Les enduits à pierre vue :

Ils sont réalisés comme un enduit, dont l'épaisseur ne suffit pas à couvrir l'ensemble des moellons des pierres, le nu de référence étant la "tête" des moellons. Ce type d'enduit cherche à imiter une surface usée dont les parties les plus fines, érodées, laissent apparaître la pierre.

b • Les enduits feutrés, lavés :


En fin de talochage, on utilise une éponge, une taloche-éponge ou un feutre imbibé d'eau, que l'on passe sur la surface de l'enduit.

L'objectif est de laver la laitance pour faire apparaître le granulat en surface. C'est une technique de vieillissement qui tend à reproduire un enduit légèrement érodé et à faire ressortir la couleur des granulats.

c • Les enduits grattés :

En fin de talochage, on utilise le tranchant de la truelle ou une planche à clous, pour gratter la pellicule de mortier de surface.



 Enduit à pierre vue

Cette opération cherche, comme la précédente à mettre en valeur le granulat, en lui conférant l'illusion d'un enduit usé.

Ce traitement est toutefois à déconseiller, car il favorise l'encrassement du parement et une mauvaise imperméabilité.

■ EXÉCUTION DES ENDUITS A DEUX COUCHES

Il est possible, dans certains cas où l'enduit doit être de faible épaisseur - par exemple, lorsque la saillie des pierres de chaînage d'angle est faible par rapport au nu général de la maçonnerie – de réaliser des enduits à deux couches.

Ces enduits comprennent :

- une couche formant le corps d'enduit ou dégrossis
- une deuxième couche appelée couche de finition

L'exécution de ces deux couches sera menée comme celles des couches correspondantes de l'enduit trois couches, avec un très grand soin.

■ ENDUITS AUX MORTIERS DE PLÂTRE ET PLÂTRE-ET-CHAUX

En région parisienne, les enduits traditionnels sont souvent à base de plâtre ou plâtre et chaux. Les techniques décrites ci-dessous visent les réfections d'enduit sur des maçonneries hourdées de plâtre, de chaux, de plâtre et chaux et ossature de pans de bois et lattes.

1°. COMPOSITION DU MORTIER

Mortier de plâtre et chaux CL

Le plâtre gros de construction et la chaux calcique CL sont compatibles quels que soient les dosages.

Façade enduite au plâtre



Les plus courants utilisés sont :

- 1 volume de plâtre gros
- 2 volumes de chaux CL
- 3 volumes de sable très propre

- 1 volume de plâtre gros
- 1 volume de chaux CL
- 1 volume de sable très propre

- 3 volumes de plâtre gros
- 1 volume de chaux CL
- 2 volumes de sable très propre

Le mélange doit être effectué à sec, avec des sables très secs, et hydraté au fur et à mesure des besoins.

2°. MISE EN ŒUVRE

Les renformis ne doivent pas dépasser pas 5 cm d'épaisseur. Au-delà, une mise en œuvre de petite maçonnerie sera exécutée.

Lorsque des supports de nature différente sont juxtaposés, un grillage non corrodable formant armature doit être appliqué à chaque jonction en débordant de part et d'autre d'au moins 15 cm, ce grillage sera fixé au support au moyen de clous, agrafes ou crochets non corrodables.

Si des fers sont mis à nu, ils doivent être brossés et soigneusement passivés.

Le mortier est mis en œuvre exclusivement par application manuelle, dans des épaisseurs moyennes de 3 à 5 cm, en une ou deux passes successives rapprochées. Chaque passe doit être recoupée d'une manière suffisamment grossière (Berthelet ou autre) avant l'application de la suivante pour en faciliter l'accrochage.

La dernière passe du mortier doit être coupée ou lissée pour donner l'aspect de finition. Les finitions jetées-truelle ou feutrées sont déconseillées et les finitions grattées sont à proscrire.

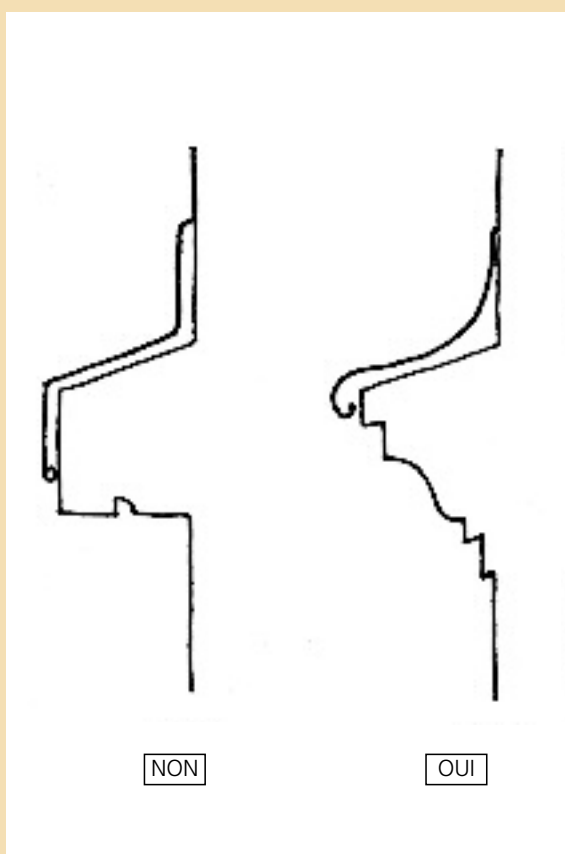
Dans tous les cas, il est préférable d'y associer un lait de chaux, une huile de lin, une colature ou un badigeon, pour renforcer l'imperméabilisation.

3°. PROTECTION DES ENDUITS


L'enduit doit être protégé contre la pluie battante par le débord de toiture et par l'ensemble des modénatures de façade : corniches, bandeaux et encadrements de baies.

Contre le ruissellement, les façades doivent être recoupées dans leur hauteur, à chaque niveau de plancher, par un bandeau exécuté dans le même matériau que le corps d'enduit, et recouvert sur sa partie supérieure d'une protection (zinc, cuivre, inox...) munie d'une goutte d'eau. La pente de ce bandeau doit être importante et tournée vers l'extérieur pour éviter les rejaillissements d'eau vers la façade.

Protection des soubassements : pour résister aux rejaillissements en pied de mur, les soubassements ne doivent pas être exécutés avec des mortiers au plâtre ou au plâtre et chaux.



Les moulures horizontales doivent permettre d'éloigner les eaux de ruissellement au niveau des "gouttes d'eau" tout en apportant un élément décoratif à la façade, accentuant les jeux d'ombre et de lumière.

 Coupe sur un bandeau horizontal

Enduit au mortier de chaux hydraulique NHL 3.5 sur support base plâtre

Cette technique est utilisée pour la réfection ou la réalisation d'enduit hydrauliques sur supports ou enduits au plâtre, plâtre-chaux et moellons de gypse, généralement incompatibles. **Elle est employée notamment pour protéger les bases de mur des rejaillissements.**

Elle n'est possible qu'avec un certain type précis de chaux hydraulique naturelle de type NHL 3,5, et doit faire l'objet d'essais préliminaires pour vérification de la compatibilité avec le support.

Exécution de l'enduit

• Gobetis

Dans certains cas, un gobetis peut être effectué. Le dosage courant utilisé est le suivant :

5 volumes de chaux NHL 3,5 + 10 volumes de sable

• Renformis ou corps d'enduit

Le renformis, et/ou le corps d'enduit, sera exécuté avec un mortier dont le dosage couramment utilisé est de :

- 4 volumes de chaux NHL 3,5 + 10 volumes de sable
- soit un dosage de 300 à 350 Kg de chaux par m³ de sable sec

La mise en œuvre se fera :

- manuellement par passes successives de 2 cm d'épaisseur
- mécaniquement par passes successives de 2 à 10 cm d'épaisseur (ce type de projection ne nécessite pas la mise en œuvre d'un gobetis préalable).

• Finition

A l'inverse des enduits plâtre-chaux CL, ce type d'enduit, dans le cas d'une réfection totale, supporte tous les types de finition, du fait de l'imperméabilisation acquise avec le renformis ou le corps d'enduit.

• Composition

Le mortier utilisé peut-être de toute nature y compris à base de liant hydraulique, pour autant que ses caractéristiques performantielles, après application d'une épaisseur supérieure à 5mm, soient voisines du mortier utilisé pour le corps d'enduit.

• Maçonneries hétérogènes

Lorsque des supports de nature différente sont juxtaposés, un grillage non corrodable ou un treillis céramique formant armature devra être appliqué à chaque jonction en débordant de part et d'autre d'au moins 15 cm et fixé au support au moyen de clous, agrafes ou crochets résistants en masse à la corrosion.

Si des fers sont mis à nu, ils devront être traités et passivés.

• Protection des enduits

Ce type d'enduit ne demande pas de protection particulière après exécution. Il permet la réalisation d'enduit de soubassement des façades enduites avec le mortier de type plâtre-chaux CL.

■ CONTRÔLE DE LA QUALITÉ DES ENDUITS EXECUTÉS

Les contrôles de la qualité des enduits concernent principalement l'épaisseur, la planéité, l'aplomb et l'aspect de l'enduit; ils sont effectués par contrôle visuel.

Un essai d'arrachement peut également être nécessaire pour vérifier l'adhérence de l'enduit au support : la rupture doit se produire dans l'enduit mais ni à l'interface pierre/enduit (adhérence trop faible), ni dans la pierre (adhérence trop forte, dommageable pour l'enduit)

Dans le cas d'une réfection parcellaire, des contrôles concernant le dosage des sels solubles, la composition de l'enduit (granulats et phase liante), son imbibition et sa perméabilité à l'air et à la vapeur d'eau permettent de s'assurer de la compatibilité du nouvel enduit avec l'enduit conservé.

■ LES ENDUITS INTERIEURS

Lorsque la fonction d'imperméabilisation n'est pas requise, les enduits intérieurs peuvent être appliqués en une ou deux couches en fonction de la nature du support et de l'aspect recherché et conformément aux prescriptions indiquées dans les chapitres relatifs aux supports correspondants.

La couche de finition pourra être de chaux pure lissée à la truelle, ou comportera certains adjuvants.

■ REFECTION ET RESTAURATION DES ENDUITS

Les causes de dégradation des enduits anciens sont diverses : remontées d'eau par capillarité, infiltrations dues aux agents atmosphériques (vent, pluies et gel), condensation, etc... Les enduits ainsi agressés présentent des désordres essentiellement de trois types qui peuvent d'ailleurs se combiner :
Ils deviennent pulvérulents,
ils se décolent de la couche support (perte de cohésion) ou
ils se fissurent.

1°. ANALYSES PREALABLES ET PREPARATION DES SUPPORTS

Avant toute restauration, on commence par procéder à l'analyse précise des enduits anciens existant sur l'édifice, ainsi qu'à celle des mortiers de construction des murs.

Parallèlement, on analyse l'état des maçonneries et, le cas échéant, on prépare le support pour accueillir le nouvel enduit.

2°. RECONNAISSANCE DE L'ETAT EXISTANT DU SUPPORT ET DE L'ENDUIT

Les données à connaître seront différentes suivant que l'on se propose de :

1- procéder à la réfection totale d'un enduit,

soit que la maçonnerie se présente sans enduit, soit qu'elle soit recouverte d'un enduit récent ou inadapté, qu'il convient de piocher.

2- refaire partiellement un enduit lacunaire,

lorsque l'on se trouve en présence d'une maçonnerie présentant des restes plus ou moins importants d'enduits.



Enduit altéré et lacunaire

3- consolider un enduit ancien altéré, lorsque celui-ci présente des pathologies.

Pour chacun de ces cas, les examens et essais décrits ci-après peuvent être réalisés suivant des ordres de priorité différents.

A • Etude de la nature des altérations de l'enduit et du support

Qu'il s'agisse de la reprise d'un enduit lacunaire ou de la consolidation d'un enduit ancien, il convient d'analyser tout d'abord la nature des altérations de l'enduit conservé.

Les altérations les plus courantes d'un enduit ancien sont la **fissuration**, le **décollement**, l'**effritement ou pulvérulence**, les **efflorescences** et les **colonisations biologiques**.

On observera donc la morphologie des altérations de l'enduit et leur localisation, l'état du support, la présence d'humidité, etc... en procédant aux quatre examens suivants :

B • Examen du support

Cet examen doit permettre d'identifier la nature et l'état du support et de repérer les altérations particulières du support qui nécessitent une intervention préalable à la restauration.

C • Observation de l'enduit à l'œil nu et à la loupe de terrain

Cette observation approfondie de l'état de conservation de l'enduit permettra de repérer les altérations particulières de l'enduit qui nécessitent une intervention préalable à la restauration.

D • Dosage des sels solubles

Il permettra de connaître la teneur en sels solubles de l'enduit et du support, et de mettre éventuellement en évidence une salinisation.

E • Mesure de l'humidité

Elle donnera des informations sur le taux d'humidité dans l'enduit et dans son support, et permettra, le cas échéant, de mettre en évidence des remontées capillaires ou des infiltrations.

Remarques

- la liste proposée n'est pas exhaustive, et d'autres essais peuvent apporter des informations intéressantes,
- les résultats et les données exigés peuvent, pour certains, être obtenus par des essais ou des observations rapides sur le terrain sans nécessiter obligatoirement des essais de laboratoire,
- les données fiables déjà obtenues par des cas très proches de celui à traiter peuvent être réutilisées sans qu'il y ait nécessité de refaire systématiquement de nouveaux essais,
- tous les essais mentionnés ne sont pas à mettre en œuvre systématiquement.

F • Etude des caractéristiques de l'enduit ancien

L'analyse de prélèvements effectués par carottage ou sciage permettra d'obtenir de précieuses informations ; il existe en effet toute une panoplie d'examens plus ou moins sophistiqués qui permettent d'obtenir des informations sur :

- l'épaisseur de l'enduit, sa stratigraphie
- sa colorimétrie
- sa composition (granulats et phase liante)
- sa porosité
- sa capillarité
- sa perméabilité à l'air (ou à l'azote) ou la vapeur d'eau
- sa dureté superficielle
- etc ...

Selon les informations recherchées, on pourra procéder aux examens suivants :

Examen à l'œil nu et à la loupe binoculaire de prélèvements d'enduit

Il renseigne sur la stratigraphie de l'enduit, sur l'épaisseur des couches qui le composent, et sur la technique d'enduit utilisée.

Colorimétrie

Cet examen fournit un code couleur (correspondant à la Charte de Munsell) qui aura valeur de référence pour la consolidation de l'enduit.

Examen pétrographique en section polie ou en lame mince

Il renseigne sur la texture de l'enduit, la nature des liants et des granulats et aidera à la détermination de la formulation de l'enduit à consolider.

Perméabilité à la vapeur d'eau ou perméabilité à l'air

Cet essai indique la capacité de transfert de l'air et de la vapeur d'eau par le matériau avant consolidation.

Imbibition capillaire

Cet examen renseigne sur la capacité de transfert de l'eau du matériau avant consolidation.

Mesure de dureté ou résistance à l'abrasion ou au percement

Cet essai indique la valeur de dureté superficielle ou de résistance superficielle de l'enduit avant consolidation.

Diffraction des rayons X :

Elle renseigne sur la composition chimique de l'enduit.

Analyse chimique :

Elle donne également la composition chimique de l'enduit.

Porosité totale ou porosimétrie :

Elle donne la capacité de stockage des fluides et fixe une valeur de référence avant consolidation.

Essai ATD/ATG :

Il détermine la courbe de déshydratation de l'enduit et sa perte pondérale en fonction de la température, ce qui permet de déterminer la formulation de l'enduit à consolider.

Examen MEB sur cassure :

C'est un examen de la pâte, des contacts pâte/granulats, qui permet une recherche des phases hydrauliques.

3°. RÉFECTION TOTALE D'UN ENDUIT

C'est le cas d'une maçonnerie sans enduit, ou avec un enduit récent à piocher.

Données à connaître sur le support

Il s'agit principalement de s'assurer de la compatibilité de l'enduit prévu avec son support.

On procédera essentiellement à un **diagnostic visuel** pour examiner la nature des supports : type de pierre, mortier de joint, etc...

On étudiera leurs altérations éventuelles : observation des morphologies des altérations (pulvérisation, fissuration, décollement, efflorescences, salissures,

colonisations biologiques, remontées capillaires, infiltration d'eau...) et leur localisation.

Le mortier de joint sera également à prendre en compte si celui-ci représente une part importante de la surface à enduire.

Les essais à effectuer auront pour objectif de déterminer :

- la nature et l'état du support
- la présence de sels solubles
- la porosité
- la capillarité
- la perméabilité à l'air (ou à l'azote) à la vapeur d'eau (sur échantillons carottés)
- l'humidité du support si infiltrations ou remontées capillaires possibles.

A • PIOCHEMENT TOTAL OU PARTIEL D'ANCIENS ENDUITS

Piochement

Que le support soit destiné à rester apparent ou non, l'opération de piochement s'effectuera de façon à ne pas mutiler l'épiderme du mur, sauf si l'Architecte prescrit formellement le piquage ou le martelage des moellons pour permettre l'adhérence du nouvel enduit.

Nettoyage

Au terme de l'opération de piochage, les zones à enduire ou à ré-enduire devront être débarrassées de tous les revêtements anciens tels qu'enduit de chaux, de mortier de ciment, de plâtre, de stuc, etc.

CONSEIL DE PRUDENCE

Le piochement d'anciens enduits requiert une attention particulière car ils peuvent recouvrir des éléments à caractère archéologique. Aussi, avant tout piochage, on effectuera une campagne de sondage pour vérifier qu'il n'existe pas de fresques ou de peintures murales sous les badigeons ou les différentes couches d'enduit superposées.

Il faudra néanmoins rester vigilant pendant toute la durée du piochage, pour réagir à la découverte, toujours possible, d'autres éléments intéressants, tels que briques vernissées ou émaillées, par exemple.

B • PREPARATION DES SUPPORTS

Nettoyage

La surface des supports doit être propre, exempte de traces de suie, de poussière, de salpêtre, etc... susceptibles de nuire à l'adhérence.

Toutes les matières sans cohésion et pulvérulentes devront être éliminées, essentiellement par piquetage, brossage ou lavage.

Dressement du parement

Si la surface à enduire présente des inégalités de 3 à 5 cm, ne permettant pas l'application directe de l'enduit, on exécutera une surcharge "en renformis", pour redresser la maçonnerie. Celle-ci sera exécutée avec un mortier compatible à la fois avec le support et avec l'enduit de finition prévu, le plus souvent un mortier de chaux hydraulique naturelle, exécuté en plusieurs passes successives de 1,5 cm chacune, et armé d'un treillis non corrodable (galva ou inox, laiton, etc.).

Lorsque les creux et inégalités sont supérieurs à 5 cm, le renformis sera remplacé par un ouvrage en maçonnerie compatible avec celle du support (moellons de petites tailles, briquettes, tuileaux, etc. hourdés au même mortier que celui du mur).

Cas de support composite

Si le support est constitué de matériaux différents, un treillis non corrodable doit être mis en place au droit de la jonction des deux matériaux, afin d'empêcher la fissuration de l'enduit due aux mouvements différentiels des deux matériaux.

Rejointoiement

Les joints seront dégarnis sur 1 à 3 cm de profondeur, suivant leur cohésion et leur adhérence. Ils seront ensuite brossés, dépoussiérés à la brosse métallique ou à l'air comprimé (adapter la pression à la friabilité des mortiers). Ils seront regarnis en même temps que la première passe d'enduit.

Humidification du support

Après protection des ouvrages existants, le support sera humidifié dans la masse, jusqu'à 24 heures avant l'application de l'enduit : l'eau ne doit plus perler ni ruisseler en surface au moment de la mise en œuvre de l'enduit.

C. PREPARATION DES SUPPORTS EN BRIQUE

Les peintures ou les vernis, de toute nature, appliqués sur les surfaces de murs doivent être enlevés mécaniquement, par brossage et lavage. Les décapants chimiques, risquant de réagir sur l'enduit, sont proscrits.

S'il existe des briques émaillées ou vernissées, deux solutions sont possibles :

- le vernis ou l'émail seront enlevés pour mettre à vif la terre cuite,
- une solution de pontage de la zone non adhérente peut être envisagée.

D. PREPARATION DES SUPPORTS EN MOELLONS

Les moellons, caillasses ou parties de blocs crevassés et dégradés doivent être purgés à vif, enlevés et remplacés.

Si les aspérités du moellon ne sont pas jugées suffisantes pour permettre l'adhérence de l'enduit, les parements peuvent être piqués ou martelés.

4°. REFECTION PARTIELLE D'UN ENDUIT ANCIEN LACUNAIRE

C'est le cas où la maçonnerie existante présente des restes d'enduit, plus ou moins importants, à conserver et à compléter par un enduit neuf.

Il s'agit d'analyser à la fois les caractéristiques du support et les propriétés de l'ancien enduit encore présent sur le parement, afin de déterminer les caractéristiques de l'enduit compatible à mettre en œuvre.

Les altérations de l'enduit et de son support

Les essais à effectuer auront pour objectif de déterminer :

- la nature et l'état du support
- la présence de sels solubles
- la porosité
- la capillarité
- la perméabilité à l'air (ou à l'azote) à la vapeur d'eau (sur échantillons carottés)
- l'humidité du support si infiltrations ou remontées capillaires possibles.

Données à connaître sur l'enduit ancien

Les essais à effectuer auront pour objectif de déterminer :

- l'épaisseur de l'enduit, sa stratigraphie
- sa composition (granulats et phase liante)
- sa colorimétrie
- sa porosité
- sa capillarité
- sa perméabilité à l'air (ou à l'azote) ou la vapeur d'eau
- sa dureté superficielle.

5°. CONSOLIDATION D'UN ENDUIT ANCIEN ALTÉRÉ

C'est le cas où la maçonnerie existante présente un enduit plus ou moins altéré que l'on souhaite néanmoins conserver.

Consolidation

La consolidation des enduits anciens s'opère de la manière suivante :

- 1- recherche et élimination des causes de pénétration d'eau par tout procédé adapté.
- 2- consolidation des parties pulvérulentes à l'aide de silicate d'éthyle ou d'un autre durcisseur testé et approuvé par le laboratoire.
- 3- reconstitution de l'adhérence de l'enduit à la maçonnerie-support après colmatage des fissures, et réalisation de solins autour des surfaces conservées (la technique la plus utilisée consiste à injecter un coulis par seringue - voir encart - complété éventuellement d'un accrochage mécanique par clous non corrodables).
- 4- mise en œuvre de complément d'enduit dans les zones lacunaires avec un mortier de même nature pour la sous-couche et la couche de finition (dureté, grain et couleur) selon les résultats des analyses des enduits existant réalisées comme décrit précédemment.

Injection d'un coulis de consolidation d'un enduit

Après colmatage de fissures et réalisation des solins nécessaires autour des surfaces conservées, on procède à des micro-injections obliques, exécutées à la seringue dans un semis de forages en quin-conce espacés d'au moins 15 cm.

Dans le cas de grandes surfaces délaquées, l'opération sera réalisée en apposant des plaquettes de bois maintenues sous pression sur l'enduit ancien. L'utilisation de clous de céramique pourra garantir une bonne tenue à terme.

Exemples de coulis :

- Coulis à base de :
Chaux hydraulique naturelle
Pouzzolane superventillée
Émulsion acrylique
Inconvénient de ce coulis : coloration grise due à la pouzzolane.
- Formule simplifiée :
Chaux hydraulique
Poudre de marbre
Eau
- Produits prêts à l'emploi après essais préliminaires

6°. DONNÉES A CONNAÎTRE SUR LES PRODUITS UTILISÉS

Produit de consolidation

Il est indispensable de connaître la formulation du produit (fournie par le fabricant dans la fiche technique ou dans tout autre document officiel), de manière à identifier sa nature, son type et ses principales propriétés.

Il est également nécessaire de procéder à des essais d'application in situ, de manière à observer le comportement du produit.

Mortier de colmatage

Il est indispensable de connaître la formulation du produit de manière à identifier sa nature, son type et ses principales propriétés.

Comme pour le produit de colmatage, des essais d'application in situ sont nécessaires, de manière à observer le comportement du produit mis en oeuvre. Par ailleurs, il est important de connaître la teneur en sels solubles, de manière à éviter d'utiliser des matériaux susceptibles d'apporter des sels solubles.

Coulis d'injection

Outre la connaissance de la formulation du produit, les essais in situ doivent permettre de contrôler la prise du coulis en milieu fermé, la qualité du remplissage et la facilité d'injection.

La teneur en sels solubles doit être connue, de manière à éviter d'utiliser des matériaux susceptibles d'apporter des sels solubles. Un essai de d'imbibition capillaire, évaluant la capacité de transport de l'eau et de l'air, permet d'adapter cette capacité du coulis à celle de l'enduit.

Un essai de résistance à l'arrachement permet d'évaluer l'adhérence du coulis et l'examen détaillé du type de rupture; une rupture à l'interface coulis/enduit indique une adhérence trop faible.

D'autres essais, souhaitables, peuvent fournir des renseignements utiles, en calculant la "valeur de retrait linéaire", ou la "valeur de viscosité" ou encore "l'injectabilité" (ou facilité à injecter).

7°. VERIFICATION DE LA CONSOLIDATION DE L'ENDUIT ANCIEN

Selon les possibilités, les contrôles sont réalisés en laboratoire sur des fragments ou sur des prélèvements faits dans les zones d'essais de convenance (prélèvement par carottage ou sciage).

Ils porteront essentiellement sur :

- la dureté superficielle (à comparer avec les résultats sur l'enduit altéré)
- la colorimétrie (évaluation des variations de couleur induite par la consolidation)
- la porosité
- la capillarité ou perméabilité
- la profondeur d'imprégnation et consommation

Ce dernier examen sera généralement effectué par sondage ; il est en effet important de vérifier que la consolidation a été réalisée de façon homogène qualitativement et quantitativement.

Ces contrôles sur l'enduit restauré seront à rapprocher de ceux effectués préalablement sur l'enduit altéré, afin de comparer les propriétés de ce dernier avant et après consolidation.

■ LES BADIGEONS ET LAITS DE CHAUX

Le lait de chaux désigne un mélange de chaux et d'eau, coloré ou non, destiné à être appliqué en revêtement peint à l'aide d'une brosse sur des parements minéraux (enduits, pierre).



■ Façades chaulées (Hautes-Alpes)

En faisant varier sa fluidité et ses adjuvants, on obtient :

le chaulage : lait de chaux très épais, blanc, destiné principalement aux usages agricoles, aux usages sanitaires, ou comme "bouche-pores" sur un support micro-fissuré.

la colature : lait de chaux épaissi d'une charge minérale (poudre de pierre, talc...) appliqué à la brosse et serré à l'outil.

le badigeon : lait de chaux plus dilué que le chaulage, généralement coloré, destiné à être appliqué sur des parements enduits, ou de pierres taillées. Il est masquant et atténue la texture du support et les défauts d'aspect de l'enduit.

l'eau forte ou **détrempe à la chaux** : badigeon dilué permettant la pose de couleurs plus saturées, donnant un aspect aquarellé, transparent, sans atténuer la texture du support.

la patine : lait de chaux très dilué, transparent, réservé essentiellement à l'homogénéisation des parements minéraux.

DOSAGES

Le dosage eau/chaux dépend de la texture et de l'aspect recherchés : plus la proportion d'eau diminue, plus le lait de chaux est épais, plus son aspect est masquant ; à l'inverse, plus il contient d'eau, plus il donne un effet "aquarellé".

chaulage	1 volume d'eau pour 1 volume de chaux
badigeon	2 à 3 volumes d'eau pour 1 volume de chaux
eau-forte	4 à 6 volumes d'eau pour 1 volume de chaux
patine	jusqu'à 20 volumes d'eau pour 1 volume de chaux

1°. MATERIAUX CONSTITUTIFS

A • Le liant : chaux aérienne ou chaux hydraulique

La chaux aérienne éteinte pour le bâtiment (chaux CL), ou chaux en pâte, permet, à dosage égal, des laits de chaux plus épais et une plus faible sédimentation des pigments.

La chaux hydraulique naturelle oblige à appliquer le lait de chaux dans la demi-journée suivant sa préparation.

B • L'eau

L'eau a pour rôle essentiel de donner sa plasticité au lait de chaux.

Elle doit être propre. Il est conseillé d'utiliser de l'eau potable. Dans le cas contraire, ne pas utiliser des eaux chargées en sels (sulfates, eaux résiduelles,...).

Dans le cas de l'eau de mer, dont l'usage traditionnel est attesté mais qui est a priori proscrite, il est nécessaire d'effectuer des essais de tenue et d'aspect (possibilité d'apparition de nuances et d'efflorescences).

Décor en trompe l'œil
à l'aide de badigeons d'eau forte



C • Les pigments

La coloration des laits de chaux est faite à l'aide de pigments en poudre, tels que les terres naturelles ou ocre, d'utilisation très ancienne, généralement compatibles avec la chaux.

Elle peut être réalisée aussi à base d'oxydes, dont le pouvoir colorant est important. Toujours vérifier la compatibilité des pigments utilisés avec la chaux (milieu alcalin).

Le mélange s'effectue en deux ou trois étapes : d'abord le mélange eau et chaux, ensuite l'ajout de pigments ou adjuvants, enfin, si nécessaire, redilution de l'ensemble.

D • Les adjuvants

Ils sont utilisés pour faciliter la mise en oeuvre ou la durabilité des laits de chaux. Qu'ils soient de caractère traditionnel (caséine, huile de lin...) ou de caractère contemporain (résine de synthèse...), leur dosage doit être adapté et leur compatibilité avec le lait de chaux (milieu alcalin) et le support doit être vérifiée.

2°. SUPPORTS

L'application de lait de chaux s'effectue sur des parements minéraux neufs ou anciens, nettoyés de toutes traces de pulvérulence ou de matériaux d'autre nature (rouille, peinture, suie...), et préalablement humidifiés de façon uniforme.

Lorsque le support est un enduit, des essais de convenance sont nécessaires.

3°. TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE

Deux techniques de mise en œuvre sont possibles : la technique "à sec", la plus fréquente, ou la technique "à fresque", principalement utilisée pour les eaux-fortes.

L'application se réalise à l'aide de brosse à badigeon (brosse rectangulaire ou ronde, de grande action, en soie naturelle) en couche croisée en terminant verticalement.



Badigeon de lait
de chaux sur enduit texturé

Suivant la qualité du support, deux ou trois couches peuvent être nécessaires, en augmentant à chaque fois la dilution (entre 15 et 50 %).

Dans le cas de l'application à sec, il convient d'humidifier préalablement le support et d'avoir contrôlé l'homogénéité du séchage.

Dans le cas de supports d'enduits neufs, l'application d'un lait de chaux de type "eau-forte" peut être réalisée sur l'enduit encore frais, selon la technique "à fresque"; on préférera dans ce cas l'utilisation d'une chaux aérienne pour le support et le lait de chaux.

GLOSSAIRE

Adjuvant : produit ajouté, en faible quantité, à un mortier pour en modifier les propriétés.

Aérienne : qualificatif d'une chaux qui fait sa prise à l'air.

Agrégat : matériau d'origine minérale constituant la charge d'un mortier (sable, gravier, cailloux concassés, ...)

Alcalin : qui a des propriétés basiques.

Aluminate : sel d'aluminium qui contribue à l'hydraulicité de la chaux.

Carbonate de calcium : CaCO_3 , constituant des roches calcaires.

Carbonatation : opération de prise de la chaux aérienne par transformation de l'acide carbonique (gaz carbonique dissous dans l'eau) en carbonate.

Caséine : sous-produit du lait utilisé dans la fabrication de certains matériaux en raison de son pouvoir collant.

Chaux : oxyde de calcium (CaO) obtenu par la calcination des pierres à chaux ou pierres à plâtre. Elles sont aériennes si leur prise s'effectue sous l'action du gaz carbonique de l'air et hydraulique lorsque ce résultat est obtenu sous l'action de l'eau.

Chaux grasse : qualificatif employé pour évoquer la plasticité et l'onctuosité des mortiers de chaux aérienne.

Chaux en pâte : chaux aérienne éteinte avec un excès d'eau et généralement conservée dans une fosse.

Chaux calciques : chaux enrichie en calcium .

Chaux calciques hydratées : chaux éteintes constituées principalement d'hydroxyde de calcium.

Chaux de carbure : produits dérivés de la fabrication d'acétylène à partir de carbure de calcium.

Chaux de coquillages : chaux éteintes fabriquées par la calcination de coquilles suivie d'extinction

Chaux dolomitiques : chaux vives constituées principalement d'oxyde de calcium et de magnésium.

Chaux dolomitiques hydratées : chaux éteintes constituées principalement d'hydroxyde de calcium, d'hydroxyde de magnésium et d'oxyde de magnésium.

Chaux éteintes : chaux aériennes constituées principalement d'hydroxyde de calcium et éventuellement de magnésium, résultant d'une extinction contrôlée de chaux vives. Elles n'ont pas de réaction exothermique lorsqu'elles entrent en contact avec l'eau. Elles sont produites sous forme de poudre ou de pâte.

Chaux hydratées : (=chaux éteinte, ou chaux aérienne) Hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2)

Chaux vives : chaux aériennes constituées principalement d'oxyde de calcium et de magnésium produites par la calcination de calcaire et/ou de dolomie. Les chaux vives ont une réaction exothermique lorsqu'elles entrent en contact avec l'eau. Les chaux vives se présentent en différents états granulaires, allant de la roche à des matériaux finement pulvérisés.

Ciment : liant hydraulique obtenu par calcination de composants mélangés (calcaires, fillers, clinkers, pouzzolane, laitiers, cendres, ...) ; les chaux dites " hydrauliques artificielles " sont des ciments.

Clinker : petites boulettes dures de silicate, résultant de la cuisson du mélange d'argile et de calcaire, constituant le matériau de base de fabrication du ciment.

Cône de Marsh : cône d'écoulement destiné à mesurer la fluidité et la réduction d'eau des coulis d'injection.

Couvrant : propriété d'un lait de chaux à couvrir de façon opaque une surface.

Crépi : enduit dont la finition est grossière

Efflorescence : dépôt cristallin blanchâtre traduisant une migration de sels solubles entraînés par l'humidité vers la surface des murs

Endoscopique : avec un instrument permettant d'examiner les cavités profondes (caméras vidéoscopiques, etc..)

Event : orifice en partie haute d'un réceptacle destiné à faciliter l'évacuation de l'air pendant son remplissage.

Faïençage : Micro-fissuration de l'enduit provoqué par un séchage trop rapide, une composition trop riche en liant ou un excès de particules très fines.

Foisonnement : augmentation du volume de la chaux lors de son extinction ; variation du volume d'un sable en fonction de son taux d'hydrométrie et de tassement.

Fresque : technique de décor mural s'effectuant par application de lait de chaux, très aérienne, coloré par des pigments naturels sur un enduit encore frais (a fresco).

Gobetis : première couche d'accrochage d'un enduit.

Gypse : roche sédimentaire composée de sulfate de calcium qui, chauffée, produit le plâtre.

Hourder : maçonner.

Jointoyer : exécuter les joints d'une maçonnerie.

Ocre : pigment naturel minéral coloré par des oxydes de fer ; les ocres varient principalement du jaune pâle au rouge foncé ou brun.

Ouvrabilité : délai d'utilisation d'un mortier.

Parement : faces verticales d'un mur.

Pigment : substance colorée insoluble, colorant la surface sur laquelle il est appliqué, mais sans pénétrer dans la matière.

Portland : nom d'une carrière en Angleterre où fut découvert le ciment ; par extension : ciment.

Pouzzolane : cendre volcaniques, riches en alumine, silice, chaux et fer qui, mélangé à de la chaux, confère au mortier obtenu des propriétés hydrauliques.

Retrait : diminution du volume d'un mortier au moment de sa prise, due à l'évaporation de l'eau.

Serrage : action de tasser un enduit, à la truelle par ex., de façon à en refermer les pores pour obtenir une finition lissée et éventuellement prévenir sa fissuration.

Stuc : enduit de finition composé d'un mélange de chaux aérienne et de poudre de marbre, imitant un parement de marbre coloré ou blanc.

Taloche : outil en bois utilisé pour porter le mortier et éventuellement l'appliquer en finition de parement.

Tuileau : fragments de poteries de terre cuite.

Thixotrope : produit qui se liquéfie lorsqu'on l'agite et se régénère lorsque l'agitation cesse.

BIBLIOGRAPHIE

ADAM Jean-Pierre,
"La construction romaine, matériaux et techniques", 2^{ème} édition,
 Grand Manuel Picard, Paris.

BOUINEAU Alain,
"Le renforcement des maçonneries anciennes à l'aide de coulis d'injection", LEM

BINDA L., BARONIO G., ABANEO S.
 (Politecnico Milano), MODENA C.
 (Univ. de Padova),
"repair and investigation techniques for stone masonry walls".

CARLI Félicien,
"le petit guide illustré de la chaux",
 Les cahiers de Terre et Couleurs.

Centre scientifique et technique
 de la construction,
"Ravalement des façades : choix des méthodes de nettoyage",
 note d'information technique,
 Bruxelles 1978.

COIGNET Jean, COIGNET Laurent,
"La maison ancienne, construction, diagnostic, interventions",
 Ed. Eyrolles, 2003 Paris.

COLLOMBET R.,
"L'humidité des bâtiments anciens, causes et effets, diagnostic, remèdes",
 Ed. du Moniteur, 1985, Paris.

CRA Terre,
"Traité de construction en terre",
 Ed. Parenthèses, 1989.

DUVAL Georges,
"Restauration et réutilisation des monuments anciens",
 Ed. Mardaga, 1990, Liège.

Ecole d'Avignon,
"Techniques et pratique de la chaux",
 Ed. EYROLLES, 1995, 2003, Paris.

FAUK Gilles,
"Pathologies de la brique, des maux communs avec la pierre",
 article des Cahiers Techniques du Bâtiment n°179,
 avril 1997, Paris.

FROIDEVAUX Yves-Marie,
"Techniques de l'architecture ancienne, construction et restauration",
 Ed. Mardaga, 1993, Liège.

FREAL Jacques,
"L'architecture paysanne en France. La maison", Ed. Serg, 1977, Ivry.

ICOMOS, **"La consolidation des mortiers dans les maçonneries anciennes"**, Journée technique internationale de l'ICOMOS, 1999, Paris.

Inventaire général des monuments et des richesses artistiques de la France,
 dir. J.-M. PEROUSE DE MONTCLOS,
"Architecture, méthode et vocabulaire",
 Ed. du Patrimoine, 2001, Paris.

"La protection des pierres - guide sur les hydrofuges de surface",
 Les cahiers du cercles des partenaires du patrimoine, 2000.

"Les remontées d'eau du sol dans les maçonneries",
 LRHM / ICOMOS, 1994, Paris.

Journées d'étude de la SFILC,
"Le dessalement des matériaux poreux",
 1996 Poitiers.

Ministère de l'Urbanisme et du Logement,
"Guide du diagnostic des structures",
 Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat,
 1984, Paris.

PIEN A., de BRUYN R. (CSTC Belgique),
"Traitement et contrôle de l'humidité ascensionnelle dans les maçonneries",
 1994, Paris.

VERGES-BELMIN, BROMBLET Ph.,
"Dossier sur le nettoyage",
 Monumental, 2000, Paris.

VIROLLEAUD F., LAURENT M.,
"Le ravalement, guide technique, réglementaire et juridique",
 Ed. du Moniteur, 1990, Paris.

VITRUVÉ, **"Les dix livres d'architecture, corrigés et traduits en 1684 par C. Perrault"**,
 Ed. Pierre Mardaga, Paris.

CREDIT PHOTOGRAPHIQUE

Ecole d'Avignon,
Avignon, p.20, p.63, p.64, p.69, p.70, p.72a, p.72b, p.73, p.74, p.85, p.86, p.87,

Florence BABICS,
p. de couverture, p.17, p.18, p.27, p.28, p.50, p.51, p.60, p.61, p.67, p.75, p.78,

CAPEB,
Paris, p.14, p.21, p.39, p.44, p.52, p.71,

Centre de Recherche sur les Monuments Historiques,
Paris, p.29, p.40, p.41, p.43,

Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques,
Champs-sur-Marne, p.16a, p.16b, p.55,

Jean-Manuel PAOLI,
p.38

J. FREAL, droits réservés,
p.46

Droits réservés,
p.8, p.10.

Ministère de la Culture et de la Communication

Manuels de sensibilisation de la direction de l'architecture et du patrimoine

Manuel de sensibilisation à la restauration de la maçonnerie

Manuel de sensibilisation à la restauration, à la conservation et à la création de vitraux



Les manuels sur internet

<http://www.culture.gouv.fr/culture/min/index-min.htm>



ISBN : 2-11-094663-6