

Alexandre Caussarieau
Thomas Gaumart

RÉNOVATION DES FAÇADES

Guide à l'usage
des professionnels

PIERRE
BRIQUE
BÉTON

2^e édition



RÉNOVATION DES FAÇADES

Guide à l'usage des professionnels

Rénover une façade est à la fois une obligation légale (Art. L132-1 du code de la construction et de l'habitation) et une action de mise en valeur du patrimoine. Cette catégorie de travaux exige un savoir-faire spécifique garantissant un traitement efficace, durable, et respectueux des spécificités architecturales de chaque façade. Pour vous guider tout au long de la rénovation – depuis le diagnostic des pathologies jusqu'à la mise en œuvre des travaux – ce manuel professionnel désormais classique a été soigneusement mis à jour. Illustrée d'un grand nombre de photographies et de schémas, cette nouvelle édition passe méthodiquement en revue toutes les techniques disponibles.

La première partie du livre permet de poser un diagnostic de la façade : il s'agit d'identifier les différentes pathologies et d'en comprendre l'origine afin de choisir

la technique appropriée. Un tableau à lecture directe synthétisant les correspondances entre pathologies et traitements a, de plus, été imprimé au verso de la couverture.

La seconde partie est composée de fiches correspondant chacune à un type de traitement. Claires et détaillées, elles indiquent les spécificités de chaque procédé et les étapes successives de sa mise en œuvre. On y retrouvera aussi bien les méthodes traditionnelles (retaille, repose de pierres, etc.) que les procédés actuels (nettoyage au laser, peeling, etc.), dont, en particulier, le traitement de la corrosion des fers à béton.

L'ouvrage contient par ailleurs les renseignements indispensables sur la législation, les démarches administratives et les aides, ainsi que les qualifications et les certifications.

Complet et pratique, ce manuel s'adresse à tous les acteurs de la rénovation : les prescripteurs (architectes, services techniques de municipalité, syndics d'immeuble, etc.), les maîtres d'ouvrage, les copropriétaires désireux de mieux suivre le déroulement des travaux et, bien sûr, les entreprises ou les artisans chargés de l'exécution des travaux.

Ingénieurs de l'Ecole supérieure d'ingénieurs des travaux de la construction (ESITC) de Cachan, Alexandre Caussarieau et Thomas Gaumart sont l'un spécialisé dans la restauration du patrimoine ancien et des monuments historiques (entreprise Léon Noël) et l'autre ingénieur maintenance responsable des services techniques d'un grand centre hospitalier départemental (La Roche/Yon). Carl Redon, spécialiste de la restauration des bétons (Renofors), a apporté son expertise à cette nouvelle édition.

Code éditeur : G13680
ISBN : 978-2-212-13680-7

www.editions-eyrolles.com

Rénovation des façades

Guide à l'usage

des professionnels

Pierre, brique, béton

Alexandre CAUSSARIEU

Thomas GAUMART

2^e édition 2013

EYROLLES

ÉDITIONS EYROLLES
61, bd Saint-Germain
75240 Paris Cedex 05
www.editions-eyrolles.com

Sauf mention contraire, les photos sont l'œuvre des auteurs de l'ouvrage.
Les dessins et les schémas ont été réalisés par Marcos Brêtas et Lionel Auvergne.

Avertissement de l'éditeur

La mise à disposition du présent document a un but d'information.
Cette information est fournie en l'état, les Éditions Eyrolles déclinant toute responsabilité quant à son utilisation, adaptation ou interprétation, dans le cadre d'une activité professionnelle.
Lorsque cet ouvrage se réfère aux normes en vigueur et réglementaires, il s'agit de celles en vigueur au moment de la publication. Aussi, nous invitons le lecteur à vérifier leur validité au moment de leur application.

SOMMAIRE

Introduction	1
---------------------------	---

PARTIE 1 – DIAGNOSTIC DES PATHOLOGIES

1.1 DIFFÉRENTES PATHOLOGIES	5
1.1.1 Pathologies n'induisant pas de dégradation du support	5
1.1.2 Pathologies induisant une dégradation du support	7
1.1.3 Fissures	12
1.2 CAUSES DES PATHOLOGIES	14
1.2.1 Contexte architectural et environnemental	14
1.2.1.1 Configuration architecturale	14
1.2.1.2 Contexte environnemental	14
1.2.1.2.1 Conditions climatiques	15
1.2.1.2.2 Pollution	15
1.2.2 Pathologies des différents matériaux	16
1.2.2.1 Les pierres	16
1.2.2.1.1 Les différents types de pierre	17
1.2.2.1.2 Les sels	20
1.2.2.1.3 Le calcin	21
1.2.2.2 Les bétons	21
1.2.2.2.1 La composition du béton	21
1.2.2.2.2 Les principaux agents agressifs du béton	23
1.2.2.2.3 La rouille des aciers	23
1.2.2.3 Les briques	23
1.2.2.3.1 Les différents types de brique	24
1.2.2.3.2 L'appareillage des murs de brique	25
1.2.3 Problèmes liés à l'humidité	25
1.2.3.1 Humidité ascensionnelle (remontées capillaires)	25
1.2.3.1.1 Origines	25
1.2.3.1.2 Manifestations	25
1.2.3.2 Les infiltrations d'eau de pluie	26
1.2.3.2.1 Origines	26
1.2.3.2.2 Manifestations	26
1.2.3.3 Humidité d'origine accidentelle	26
1.2.3.3.1 Origines	26
1.2.3.3.2 Manifestations	27
1.2.3.4 Conséquences de l'humidité	27

PARTIE 2 – FICHES TRAITEMENT

2.1 RESTAURATION DES JOINTS	31
Joints rigides (pièrres ou moellons).....	32
Joints rigides (briques)	35
Joints rigides (pièrres de taille)	38
Joints souples	41
2.2 RÉPARATION	45
Biominéralisation	46
Consolidation par imprégnation	49
Électro-osmose phorèse	51
Réparation ponctuelle	54
Ragrément superficiel	57
Approche de diverses méthodes de traitement de la corrosion des fers à béton	60
Substitution de pierre identique	73
Substitution de pierre artificielle.....	83
2.3 NETTOYAGE PAR VOIE HUMIDE	87
Cataplasmes.....	88
Électro-lessivage	91
Ruissellement d'eau (ou nébulisation)	95
Nettoyage haute pression	98
Vapeur	100
Procédés chimiques.....	102
2.4 NETTOYAGE PAR VOIE SÈCHE	109
Laser.....	110
Peeling	113
Ponçage	116
Retaille.....	118
2.5 NETTOYAGE PAR PROJECTION DE MATIÈRE	121
Gommage	122
Hydrogommage	126
Sablage à sec.....	129
Sablage hydropneumatique.....	131
Microsablage.....	134

2.6 STABILISATION	137
Traitement de l'humidité provenant du sol	138
Traitement de l'humidité provenant de l'eau de pluie	145
Consolidation par harpes et tirants noyés	148
Traitement des fissures par injection.....	152
Traitement des fissures par colmatage	159
2.7 AUTRES PROCÉDÉS.....	163
Création d'ouverture	164
Procédés avancés.	169
Annexes	
Annexe A – Législation et démarches administratives.....	176
Annexe B – Aides et subventions	178
Annexe C – Qualifications et certifications	180
Annexe D – Adresses utiles	182

INTRODUCTION

La rénovation de façades permet d'aménager un environnement agréable et sûr pour les générations actuelles et de transmettre un patrimoine aux générations futures. Toute la difficulté de l'opération est de traiter le plus efficacement possible les pathologies ayant pu apparaître, et ce sans abîmer la façade elle-même ou transformer son aspect originel. Ce livre a pour objet de vous guider dans le choix et la mise en œuvre du traitement.

Sont présentés ici l'ensemble des procédés aujourd'hui à la disposition des entreprises de rénovation des façades. Ces traitements font appel aussi bien à des méthodes traditionnelles (retaille des pierres ou patine, par exemple) qu'à des procédés beaucoup plus modernes (laser, biomimérisation, etc.). En outre, l'évolution des technologies mises en œuvre dans l'industrie du bâtiment permet de présager de la mise au point de nouveaux traitements, encore au stade expérimental aujourd'hui ; ils sont présentés dans une fiche spécifique.

Une erreur fréquente est de simplement « donner un coup de propre » sans traiter les origines du problème. C'est souvent le cas pour les pathologies liées à l'humidité : un enduit étanche, par exemple, va enfermer l'humidité dans le mur, ce qui à terme peut induire des sinistres importants. Les traitements appliqués lors d'une rénovation doivent au contraire s'inscrire dans le long terme et permettre à la façade de retrouver un équilibre durable.

Ce livre traite de la rénovation des façades en pierre, brique et béton car ce sont les matériaux les plus répandus en France, et qui en outre développent le plus de pathologies. Les autres types de façade, en verre ou en métal par exemple, ne sont exempts de problèmes ; mais ceux-ci sont plutôt d'ordre structurel. On ne parle pas de restauration ou de rénovation de façades en mur-rideau (verre) ou en bardage (métal) : il s'agit plutôt de réfection ou de changement à neuf d'éléments dégradés.

Les deux parties de ce guide – *Diagnostic des pathologies* et *Fiches traitement* – s'articulent autour du tableau à double entrée situé au verso de la couverture. Après avoir identifié les pathologies d'une façade, le lecteur peut trouver grâce à ce tableau les traitements adaptés.

Partie 1

**DIAGNOSTIC
DES PATHOLOGIES**

1.1 DIFFÉRENTES PATHOLOGIES

Les façades des immeubles urbains comme des habitations rurales sont sujettes à de multiples agressions : humidité, vent, pollution, cycle gel/dégel, etc. En résultent différentes pathologies, depuis les simples salissures jusqu'aux dégradations du support pouvant mener à la ruine du bâtiment. Diagnostiquer ces problèmes nécessite une grande rigueur d'analyse : c'est tout un ensemble d'observations et de mesures qui permet de cerner les problèmes, d'en comprendre l'origine et de trouver le traitement approprié.

1.1.1 Pathologies n'induisant pas de dégradation du support

Résidus de peintures • Peinture adhérant encore ponctuellement au support.



Exemple de résidus de peinture.

Salissures et encroûtements noirs • Salissures directement liées à la pollution atmosphérique : dépôts de résidus de la combustion du fuel, de l'essence, de produits industriels, etc. Les encroûtements se différencient des salissures par leur épaisseur, qui est d'un millimètre environ. En règle générale cette croûte est peu adhérente sur les pierres dites « froides » (pierres dures à grains fermés, calcaire marbrier ou marbre par exemple). Elle se détache ou se ramollit sous l'action du ruissellement de l'eau. Sur les pierres tendres ou poreuses, par exemple la pierre de Saint-Maximin dans l'Oise, l'encroûtement est très rapide car des cristaux de gypse ou de calcite retiennent les particules noires.

Salissures grasses • Salissures invisibles à première vue, formant une sorte de pellicule grasse sur le support. Provenant de la pollution atmosphérique, les salissures grasses accompagnent souvent les salissures noires. Un test efficace pour les diagnostiquer consiste à projeter de l'eau sur la façade : si l'eau reste en surface et forme des perles, un traitement pour dissoudre ou entraîner les graisses est nécessaire.



© SMBR

Façade présentant des salissures noires et des salissures grasses (Maison de la Mutualité – Marseille).

Salissures rouges • Salissures aisément reconnaissables à l'aspect rouge que prend le support, et apparaissant suite à une abrasion de la brique ou de la pierre. Il ne s'agit donc pas d'un processus de superposition sur le matériau, comme c'est le cas pour une couche de salissure, mais plutôt d'une mise à nu d'une couleur contenue à l'intérieur de celui-ci. La couleur rouge peut être d'origine végétale, elle est alors causée par des micro-organismes de type cryptogame (il s'agit de champignons microscopiques incrustés dans la pierre), ou minérale, dans ce cas des grains de pyrite ou des oxydes fer constitutifs du support créent des traînées ocre ou rouges.



© SMBR

| Exemple de salissures rouges.

Salissures vertes • Appellation regroupant toutes les salissures d'origine biologique: mousses, lichens, moisissures, algues, etc. Ces salissures ne sont pas toujours vertes: elles peuvent prendre différentes teintes selon la nature des micro-organismes qui les composent. Il existe ainsi des salissures vertes de couleur noire, de la famille des lichens. Leur apparition est favorisée par l'humidité et par le vent, qui transporte les substances utiles à leur développement.



© Weber et Broutin

Exemple de salissures vertes.

1.1.2 Pathologies induisant une dégradation du support

Alvéolisation • Dépression sableuse ou pulvérulente creusée dans la roche ou la brique. Elle est due à l'action du vent qui, chargé de particules abrasives, érode et creuse le support. Le recul de la surface peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres.



© Weber et Broutin



© SMBR

Exemple d'alvéolisation.

Exemple de délitage.

Délitage • Séparation des plans de stratification ou de schistosité de la pierre (les « lits ») le plus souvent induite par une sollicitation mécanique, par exemple une surcharge de la structure. Le délitage se manifeste comme la desquamation par un débit en feuillets, mais la texture de la pierre n'est pas modifiée et on n'observe pas de zone pulvérulente. Le cycle gel/dégel peut être cause de délitage: les lits offrent un passage naturel à l'eau qui, en gelant, se dilate et détache les lits les uns des autres.

Désagrégation sableuse • Dépression sableuse ou pulvérulente apparaissant à la surface des pierres calcaires, due à l'action des remontées capillaires. Ce phénomène, qui s'apparente à une alvéolisation, peut creuser la pierre sur une profondeur de plusieurs dizaines de millimètres.



Exemple de désagrégation sableuse.

Désagrégation saccharoïde • Dépolissage de la pierre, dont la surface prend l'aspect du sucre. La désagrégation saccharoïde survient dans un contexte de forte exposition au soleil, lorsqu'un matériau de couleur claire et un autre de couleur sombre (deux types de marbre par exemple) sont contigus. Le matériau clair absorbant peu la chaleur du soleil, le matériau sombre emmagasine plus d'énergie que si toute la surface était de même teinte. Il subit donc une altération plus rapide que s'il avait été placé dans une surface unie.

Desquamation • Décollement en croûtes ou en plaques de la surface du matériau dû le plus souvent au cycle gel/dégel. On observe par tranches successives un écaillage en plaques, puis une zone pulvérulente (dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs dizaines de millimètres) et enfin la roche dure. Ce phénomène est également appelé exfoliation ou écaillage.



Exemple de desquamation.

© Weber et Broutin

Dissolution • Désagrégation de surface des pierres calcaires due à l'acidité de l'air et des pluies. Cette acidité dissout le carbonate de calcium (CaCO_3) composant les pierres calcaires.

Éclatement • Rupture du béton causée par la corrosion des armatures. Les éclatements se produisent lorsqu'un acier mis à nu ou enrobé d'une épaisseur de béton insuffisante (moins de 2,5 cm) s'oxyde en présence d'eau. Se développe alors de la rouille, dont le volume plus important que l'acier induit un éclatement du béton.



Exemple de dissolution.

© Weber et Broutin



Exemple d'éclatement.

Efflorescences (traces blanches, salpêtre ou crypto-efflorescences) • Dépôts blanchâtres (lorsqu'ils ne sont pas encrassés) causés par la migration dans la maçonnerie d'eau chargée de sels solubles (nitrates, sulfates, etc.). Lorsque l'eau s'évapore, ces sels se déposent soit à l'intérieur même de la maçonnerie, créant des crypto-efflorescences, soit sur le parement extérieur, donnant ainsi naissance à des efflorescences (appelées plus familièrement « traces blanches »). La composition de cette couche superficielle est fonction de la solubilité et de la quantité des sels dissous par l'eau.

Les efflorescences n'entraînent pas de dommages mécaniques majeurs, tout au plus causent-elles parfois un effritement superficiel des matériaux. En revanche les crypto-efflorescences peuvent engendrer des dégradations importantes : détachement de plaques, décollement d'enduit, etc.

Lorsqu'elles sont composées de sulfates (sel de l'acide sulfurique contenu dans la maçonnerie), les efflorescences peuvent apparaître en n'importe quel point de la maçonnerie. Composées de nitrate (sel de l'acide nitrique), elles proviennent soit d'une infiltration latérale d'eau du sol, soit de remontées capillaires du sol à travers le mur. Elles ne peuvent donc se former qu'à la base des murs. Les efflorescences se manifestent sous forme de traînées ou de taches horizontales en bas des murs constituent donc un symptôme fiable d'humidité en provenance du sol. Par contre les manifestations d'efflorescences isolées, notamment sur les maçonneries de brique, ne constituent pas un symptôme suffisant pour déterminer le type d'humidité.

On utilise souvent le terme de salpêtre pour identifier les efflorescences d'une manière générale. En réalité le salpêtre est un type d'efflorescence constitué de nitrate de potassium.

Épafrure • Éclat causé par un choc direct.



Exemple d'attaque par les sels induite par des remontées capillaires.



Exemple d'épafrure.

Nitrification • Dissolution de surface des pierres calcaires due à l'action de micro-organismes, les bactéries nitrifiantes. Ces bactéries génèrent des acides nitreux et nitriques à partir de l'ammoniaque et de l'azote contenus dans l'eau de pluie ou dans les remontées capillaires. Ces acides dissolvent le calcaire de la pierre, dont la surface se transforme en une poudre grossière constituée surtout de grains siliceux ou de gros cristaux de calcite (qui résistent mieux aux acides que le calcaire).

Pathologies des joints • Différents types de dégradation des joints, depuis la simple altération ponctuelle jusqu'à la disparition totale. Ces pathologies sont dues le plus souvent au cycle gel/dégel, qui fait éclater les joints, ou à de mauvais dosages en liant. Ainsi un sous-dosage en chaux ou en ciment ne liera pas assez le sable et rendra le joint fragile et pulvérulent; à l'opposé, un mortier surdosé sera trop rigide par rapport à la façade (qui « bouge » toujours, en particulier à cause des variations de température et d'hygrométrie) et pourra entraîner une fissuration précoce du joint.



*Mur de brique
dont les joints
ont disparu.*

L'analyse de prélèvements en laboratoire peut apporter des indications complémentaires quant au degré de dégradation du support: étude de la pétrographie de la roche (c'est-à-dire de sa structure et de sa composition minéralogique), de la nature des grains, de la texture, de la porosité. On voit ainsi apparaître selon le cas un changement de composition (présence de sels solubles) et/ou un changement de porosité (augmentation de la porosité et/ou recristallisation, changement de la taille des pores). Des essais de type mécanique (micro-dureté, vitesse du son) permettent de visualiser la profondeur de la zone atteinte.

Ces analyses peuvent être effectuées par les laboratoires spécialisés dans l'étude des matériaux de construction: Laboratoire d'études des matériaux (LEM), Laboratoire d'études et de recherche des matériaux (LERM), Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), Centre d'étude du bâtiment et des travaux publics (CEBTP), Laboratoire de recherche des monuments historiques (LRMH), etc.

1.1.3 Fissures

Microfissure • Ouverture de largeur inférieure à 0,2 mm concernant généralement toute l'épaisseur de l'enduit.

Faïençage • Réseau de fissures en mailles, de largeur généralement inférieure à 0,2 mm, et ne concernant que la couche superficielle de l'enduit. Le faïençage ne peut donc mettre en péril la stabilité du bâtiment; il pose avant tout un problème esthétique.

Fissure • Ouverture de largeur comprise entre 0,2 et 2 mm, concernant l'enduit et éventuellement les éléments de structure. À terme, leur évolution peut poser des problèmes de pénétration d'humidité à l'intérieur des maçonneries; si les fissures traversent la totalité de l'épaisseur du mur, la stabilité de la structure est mise en péril. On distingue deux grands types de fissure en fonction de leur emplacement: les fissures localisées aux points singuliers du mur (jonction avec plancher, allège, chaînage, etc.) et les fissures réparties sur l'ensemble de la façade.

Lézarde (ou crevasse) • Ouverture de largeur supérieure à 2 mm et concernant la totalité de l'épaisseur du mur. Les lézardes induisent des risques importants de pénétration d'eau au travers de la maçonnerie; surtout, elles sont le signe de problèmes structurels majeurs pouvant menacer à court terme la stabilité de la structure. Le diagnostic et le traitement doivent être réalisés très rapidement.

N°	TYPE DE FISSURE	CAUSES
1	Petites fissures « moustaches », verticales ou obliques, partant des angles de l'ouverture d'une baie.	Dilatation des appuis des baies ou résistance mécanique trop faible de la maçonnerie d'angle.
2	Fissures horizontales situées au droit des planchers.	Déformation ou rotation du plancher sur le chaînage périphérique, voire chaînage horizontal trop faible.
3	Fissures verticales à la jonction de deux corps de bâtiments continus mais indépendants (construction voisine, agrandissement, etc.).	Absence de joint de dilatation.
4	Faïençage superficiel de l'enduit en maille fine.	Séchage superficiel trop rapide (dessiccation) ou excès de talochage.
5	Fissures en hachures obliques situées près d'un plancher ou d'une poutre en béton armé.	Dilatation thermique du béton.
6	Fissures verticales situées aux angles de la construction.	Chaînage vertical absent ou trop faible.
7	Fissures ou lézardes obliques dans les parois.	Instabilité du terrain ou des fondations entraînant des mouvements importants de la construction.
8	Microfissures aussi bien horizontales que verticales.	Maçonnerie composée d'éléments divers ayant des comportements hygrothermiques différents.

N°	TYPE DE FISSURE	CAUSES
9	Fissures ou lézardes en escalier.	Instabilité du terrain ou des fondations entraînant des mouvements importants de la construction.
10	Microfissuration dite « de retrait » en mailles larges.	Mauvais dosage de l'enduit ou excès d'eau de gâchage, mauvaise adhérence de l'enduit ou épaisseur trop importante de celui-ci.
11	Microfissures des joints de maçonnerie.	Utilisation de blocs non stabilisés ou montage défectueux de la maçonnerie.



© Weber et Broutin

1.2 CAUSES DES PATHOLOGIES

1.2.1 Contexte architectural et environnemental

1.2.1.1 Configuration architecturale

La configuration architecturale est un élément important de compréhension de l'encrassement et de la dégradation des façades : une façade verticale et lisse a peu de points retenant les salissures, à l'inverse d'une façade ouvragée. Les particules portées par le vent (micro-organismes végétaux ou minéraux, particules de poussières, de suies ou de carbone) se déposent ainsi plus facilement sur les éléments en saillie, sculptures ou moulures par exemple. La poussière s'accumule également dans les zones protégées du vent.

L'architecture de la façade influe également sur le ruissellement de l'eau de pluie, qui permet d'entraîner les salissures poussiéreuses sèches. Les parties basses des bâtiments sont ainsi souvent plus encrassées que les parties hautes car le ruissellement y est moins efficace, divers obstacles (corniche, bandeau, appuis, larmier, etc.) venant couper la trajectoire de l'eau. Lorsque le ruissellement est mal canalisé, ce phénomène de nettoyage naturel induit des concentrations de salissure au droit des ouvrages les plus moulurés d'une façade ; les zones à l'abri du ruissellement voient salissures et poussières s'accumuler.

Le ruissellement d'eau sur les façades n'est plus aujourd'hui seulement un facteur de nettoyage : l'eau est parfois chargée de résidus ou des particules nocives (voir *Contexte environnemental*). Une solution pour atténuer les effets du ruissellement consiste à remettre en état ou à installer des dispositifs facilitant le drainage (gouttières, larmiers, appuis, etc.).



© G. Vallière

Les zones les plus claires sont soumises au ruissellement d'eau.

1.2.1.2 Contexte environnemental

Les pathologies développées par les façades sont directement liées aux intempéries et à la pollution. Les risques varient en fonction des régions et de l'exposition du bâtiment.

1.2.1.2.1 Conditions climatiques

La première cause de dégradation de la pierre ou de la brique est le gel. En se solifiant, l'eau qui s'est infiltrée dans le matériau augmente de volume, ce qui induit des risques de desquamation, d'écaillage ou d'éclatement. La sensibilité au gel est plus importante lorsque le calcin a disparu car la pierre est alors plus poreuse.

D'autres facteurs climatiques doivent être pris en compte. Le vent, chargé de particules ou non, peut induire des phénomènes d'abrasion et d'alvéolisation. Son effet est particulièrement sensible sur les pierres tendres. L'exposition au soleil (risques de désagrégation saccharroïde) ou aux embruns marins (risques d'efflorescences) peut également entraîner le développement de pathologies.



© SMIBR

Salissures vertes et desquamation de la pierre dans une zone de gel et de brouillard fréquents (Abbaye de Saint-Antoine – Isère).

1.2.1.2.2 Pollution

Les façades situées en milieu urbain, particulièrement exposées à la pollution des gaz d'échappement et des rejets industriels, développent souvent des salissures et des encroûtements noirs.

Les pluies acides, qui contiennent des acides à base de soufre ou d'azote, entraînent des phénomènes de dissolution des matériaux.

Les zones rurales ne sont pas épargnées par la pollution : l'utilisation d'engrais et de pesticides dans les cultures et les rejets de phosphates dans les zones d'élevages induisent ainsi des risques d'efflorescences. Les pluies acides, en pro-



© G. Vallière

Dégradations causées par la pollution urbaine.

venance des centres urbains et industriels, peuvent être dirigées par le vent vers les zones rurales. Les campagnes à l'est de Paris sont ainsi beaucoup plus polluées que celles situées à l'ouest car les vents dominants de la région parisienne soufflent d'Est en Ouest.

1.2.2 Pathologies des différents matériaux

1.2.2.1 Les pierres

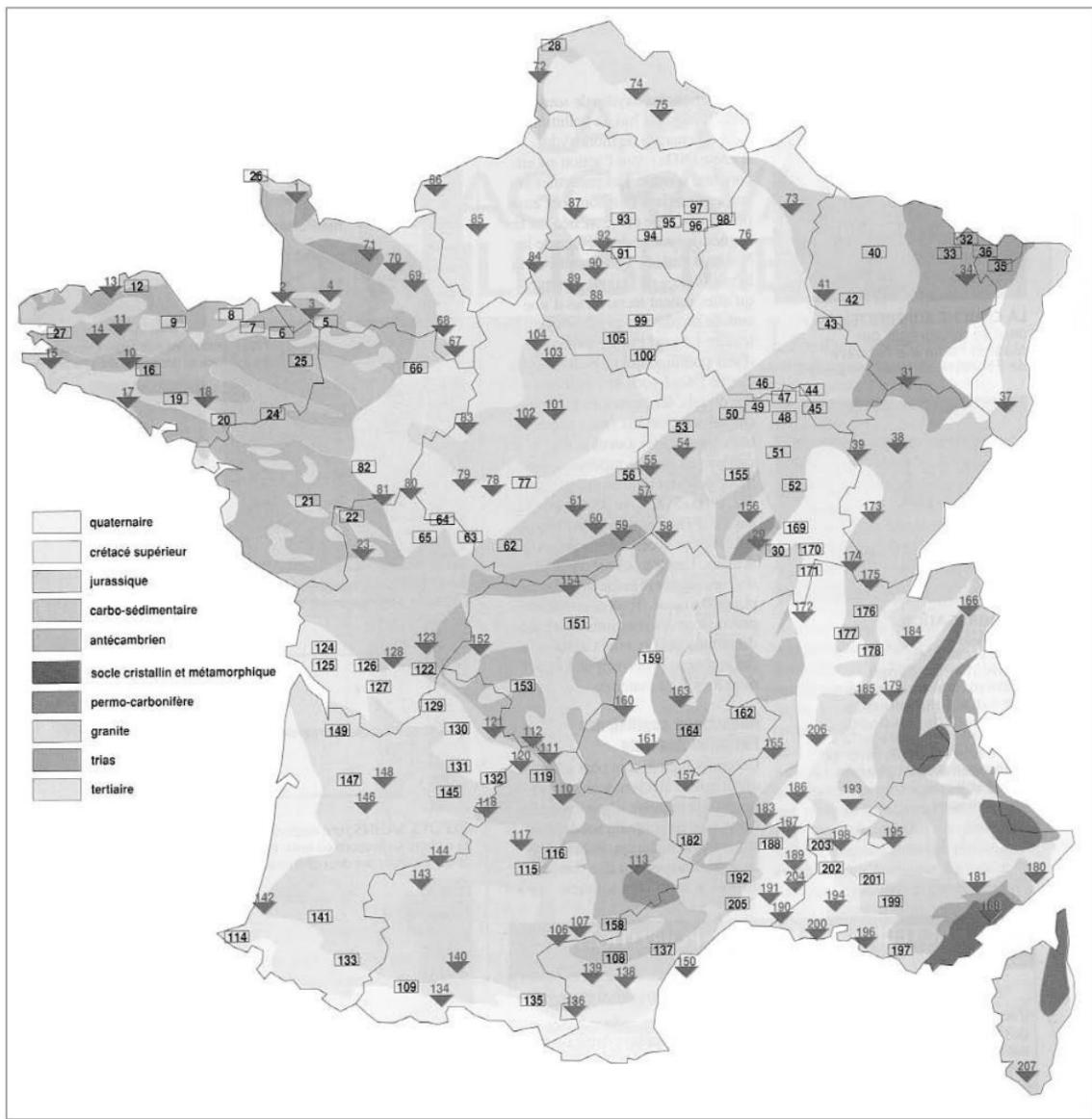


Immeuble néoclassique construit en 1872 (Paris).

1.2.2.1.1 Les différents types de pierre

Connaître le type de pierre composant une façade permet de mieux en comprendre les pathologies.

- **Les pierres calcaires**, principalement composées de carbonate de calcium, peuvent être d'origine organique (calcaires à foraminifères comme la craie, calcaires coquilliers) ou chimique (calcite, calcaire oolithique, pisolithique ou lithographique). Elles représentent 20 % des roches sédimentaires, qui couvrent plus de 70 % des surfaces exposées, ce qui explique qu'elles fournissent l'essentiel de la pierre de taille et de la pierre à bâtir. Les roches calcaires sont inégalement résistantes et perméables. Particulièrement sensibles aux encrassements et aux encroûtements, elles sont soumises à toutes les pathologies de la pierre. Une eau riche en gaz carbonique peut les attaquer par dissolution.
- **Les marbres** sont des roches métamorphiques : d'origine volcanique ou sédimentaire, ils ont subi une transformation physique ou chimique par augmentation des températures et des pressions. Ils sont composés de calcite. Les marbres sont caractérisés par leur densité élevée (environ 2 700 kg/m³) et leur résistance à la rupture sous charge. Leurs coloris très divers, leurs qualités esthétiques et dans certains cas leur rareté en ont fait un matériau noble.
- **Les pierres volcaniques** (trachytes, basaltes) peuvent être extrusives, c'est-à-dire issues d'un magma qui s'est refroidi au contact de l'air, ou intrusives, c'est-à-dire ayant refroidi avant d'accéder à l'air libre, au contact d'une couche rocheuse. En France, on les trouve principalement en Auvergne.
- **Les granites**, à structure grenue, constitués de quartz, feldspath et mica, font partie de la famille des roches volcaniques. Relativement peu denses, ils se déclinent en différentes variétés : rose (feldspath rose), gris (feldspath blanc, mica blanc, mica noir), porphyroïde (orthose), etc. Les granites sont employés en particulier pour les encadrements, les soubassements ou les harpages.
- **Les gneiss**, comme les marbres, sont des pierres métamorphiques. Ils sont d'origine soit sédimentaire (grès), et dits alors « paragneiss », soit magmatique (granites, syénites, rhyolites), et dits « orthogneiss ». Les gneiss présentent un aspect feuilletté, avec une alternance de cristaux clairs (quartz et feldspath) et noirâtres (micas, amphibole, hornblende). Les gneiss sont peu utilisés dans les constructions françaises.
- **Les grès** sont des roches détritiques, c'est-à-dire formées à partir de débris de roches préexistantes. Constitués de sable et de liant à base de silice ou de calcaire, ils sont poreux et souvent lités. Il existe différentes variétés de grès : pur à liant siliceux, ferrugineux à liant siliceux, quartzeux à liant calcaire, etc. Les grès sont utilisés comme pierre de construction, en particulier dans l'est de la France (Grès des Vosges par exemple). Ils fournissent la plupart des pavés de voirie.
- **Les schistes** sont des roches métamorphiques issues de sédiments argileux. Ils sont le plus souvent utilisés pour constituer des dallages, des appuis de fenêtres ; les lauzes utilisées pour les couvertures sont également en schiste. Ces roches sont sensibles aux cycles de gel/dégel et aux pluies acides, qui induisent des phénomènes de délitage ou de dissolution.



| Les carrières de pierre utilisées en construction.

© G. Vallière

Région Ouest

- Granites
 - 1 Fermanville
 - 2 Carolles
 - 3 Saint-Pois
 - 4 Vire
 - 5 Louvigné-du-Désert
 - 6 Coglès et Saint-James
 - 7 Lhanhélin
 - 8 Brusvily, Le Hingle, Languédiash et Mégrit
 - 9 Plaintel
 - 10 Plelauff et Tréfargat
 - 11 Guerlesquin
 - 12 Ploumanach et Pleumeur-Boudou
 - 13 île Grande
 - 14 Brenilis
 - 15 Locronan
 - 16 Pontivy
 - 17 Calan
 - 18 Saint-Servan-sur-Oust
 - 19 Plumelec
 - 20 Peaule
 - 21 Saint-Macaire-en-Auge
 - 22 Les Cerqueux
 - 23 L'Absie
 - Grès, granites, schistes
 - 24 Guéméné-Penfao
 - 25 Landavran
 - 26 Omonville
 - Kersantite (roches volcaniques)
 - 27 Logona-Daoulas, Hôpital-Camfrout

Région Nord et Nord-Est

- Marbres
 - 28 Boulonnais
 - 29 Saint-Léger du bois
 - Grès
 - 30 Saint-Emiland
 - 31 Darney
 - 32 Petersbach, Volksberg et Waldhambach
 - 33 Bust et Lohr
 - 34 Neuviller
 - 35 Lichtenberg et Rothbach
 - 36 Adamswiller
 - 37 Rouffach
 - Marbres, calcaires massifs
 - 38 Besançon
 - 39 Dôle
 - 40 Roncourt
 - 41 Lérouville
 - 42 Euvilles
 - 43 Savonnières et Brauvilliers
 - 44 Montmoyen
 - 45 Beaunotte
 - 46 Etrochey
 - 47 Coulmier et Chameisson
 - 48 Nod, Bremur-Vauvois et Magny
 - 49 Ravières et Cry
 - 50 Massangis, Bierry-les-Belles-Fontaines (Anstrude)
 - 51 Poullenay
 - 52 Comblanchien

Région Sud-Ouest

- 53 Charentenay
- 54 Courson
- 55 Donzy
- 56 Suilly et Garchy
- 57 La Charité et Narcy
- 58 Nevers et Pontd'Ours
- 59 Apremont
- 60 Charly
- 61 Bourges
- 62 Saint-Aigny
- 63 Chauvigny et Tercé
- 64 Lavoux
- 65 Migné-les-Lourdines et Chasseneuil
- 66 Bernay, Ruillé-en-Campagne et Domfront-en-Campagne
- 67 Bellême
- 68 Mortagne
- 69 Fleury-sur-Orne
- 70 Caen
- 71 Amblie
- 72 Marquise
- 73 Dom-le-Mesnil
- Argiles, craies, tuffeaux
- 74 Lille
- 75 Hordain
- 76 Reims
- 77 Villentrois
- 78 Bourré
- 79 Tours (Ecorcheveau)
- 80 Chinon
- 81 Saint-Cyr-en-Bourg et Turquant
- 82 Louerre
- 83 Courmenon
- 84 Vernon
- 85 Caumont
- 86 Fécamp
- 87 Sainte-Marie-le-Nud (une carrière vient d'être réouverte à Sossais)
- Meulière, Calcaire biodétritique, grès
- 88 Paris et environs
- 89 Conflans
- 90 Villiers-Adam et Méry-sur-Oise
- 91 Saint-Maximin
- 92 St-Leu
- 93 Saint-Vast-les-Mello
- 94 Bonneuil-en-Valois
- 95 Saint-Pierre-Aigle
- 96 Septmonts
- 97 Vassens
- 98 Courville
- 99 Maincy
- 100 Souppes et Château-Landon
- 101 Orléans
- 102 Beaugency (Vernon)
- 103 Prasville
- 104 Berchères
- 105 grès de Fontainebleau à Videlles
- Granite
- 106 Castres

Région Centre

- 107 La Crouzette
- Grès paléozoïque
- 108 Caunes-Minervois
- 109 Campan
- Grès du Trias
- 110 Figeac
- 111 Meyssac
- 112 Brive
- 113 St-Affrique
- 114 La Rhune
- Calcaires jurassiques
- 115 Salles
- 116 Monesties
- 117 Bruniquel
- 118 Crayssac
- 119 Carennac
- 120 Nespouls
- 121 Ajat
- 122 Vilhonneur
- 123 Saint-Germain-du-Montbron
- Calcaires blancs
- 124 Thénac
- 125 Pons
- 126 Saint-Même
- 127 Sireuil
- 128 Nersac
- 129 Saint-Vivien
- 130 Chancelade (en activité) et région de Brantôme
- 131 Mauzens-Miremont
- 132 Le Buisson
- 133 Arudy
- 134 Saint-Béat
- 135 Loubières
- 136 Alet
- Grès, calcaires, molasses
- 137 Béziers
- 138 Ferrals
- 139 Villegailhenc
- 140 Aurignac
- 141 Bidache
- 142 Bayonne
- 143 La Romieu
- 144 Moirax
- 145 Montferrand
- 146 Saint-Macaire
- 147 Frontenac
- 148 Saint-Émilion
- 149 Bourg et région de Blaye
- Roches volcaniques
- 150 Agde

Région Sud-Est

- Grès
 - 162 Blavozy
 - 163 Brioude
 - 164 Langeac
- Marbres
 - 165 Eclassen
 - 166 Combloux (sans compter diverses carrières en Corse)
 - Marbres
 - 167 Guillestre
 - Grès
 - 168 Fréjus
 - Calcaires jurassiques
 - 169 Buzy
 - 170 Farges-les-Mâcon
 - 171 La Salle, Saint-Martin-Belle-Roche et Clesse
 - 172 Ville/Jarnioux, Limonest Lucenay Anse
 - 173 Crançot et Révigny
 - 174 Loisia
 - 175 Grand-Corent-Romanèche, Seyssel
 - 176 Hauteville
 - 177 Anoisin, Montalieu
 - 178 Nattages (Rocheret)
 - 179 Grenoble
 - 180 La Turbie
 - 181 Fayence
 - 182 Barre-de-Cévennes
 - 183 Lussas, Labeaume, Ruems, Saint-Paul-le-Jeune
 - Calcaires crétacés
 - 184 Grésy-Aix
 - 185 Sassenage
 - 186 Chomerac et Crua
 - 187 Bourg-Saint-Andéol
 - 188 Brouzet
 - 189 Tavel
 - 190 Nîmes
 - 191 Barutel
 - 192 Bois-des-Lens (Moulezan)
 - 193 Vaison-la-Romaine
 - 194 Lançon-Provence
 - 195 Banon
 - 196 Cassis
 - 197 Tournis, Toulon
 - Grès, calcaires tertiaires
 - 198 Mont-Ventoux Crillon
 - 199 Rognes
 - 200 La Couronne
 - 201 Oppède, Saint-Pantaléon, Menerbes, Lacoste
 - 202 Les Baux, Fontvieille, et Saint-Rémy-de-Provence
 - 203 Vers, Villeneuve-lès-Avignon
 - 204 Beaucaire
 - 205 Villevieille et Beaulieu
 - 206 Châteauneuf-sur-Isère
 - 207 Bonifacio

ROCHES	ALTÉRABILITÉ				MANIFESTATIONS								CAUSES
	Porosité	Altérabilité	Solubilité	Stabilité	Débit en plaque ¹	Décohésion granulaire ²	Décohésion saccharoïde ³	Croûte noire	Déchaussement	Désagrégation sableuse ⁴	Desquamation	Dissolution ⁵	
Granite Basalte	-	-	-	+	+/-	+/-	-	-	+/-	-	+/-	-	Remontées capillaires Alternance thermique Pollution atmosphérique
Gneiss Marbres vrais (calcaire marbrier)	-	-	-	+	+/-	-	+/-	-	+/-	-	-	-	Gel Alternance thermique Mécanique Pollution atmosphérique
Grès Calcaire massif Calcaire biodétritique Craie-Tuffeau	+/- +/-	+/- +/-	- +	+/- +/-	+	++	-	+	+/-	++	+	+	Gel (grès à meulière) Sels (grès vosgiens) Pollution atmosphérique Remontées capillaires
Albâtre	-	-	+++		-	-	-	-	-	-	-	+++	Remontées capillaires, pluies, humidité

1. Altération particulière qui se caractérise par une découpe ou un cisaillage du matériau sur différentes épaisseurs. La pierre se découpe en feuilles en raison de la dilatation différentielle, de la gélivité.
 2. Ouverture entre les cristaux provoquée par des chocs thermiques répétés que subit le matériau (action du soleil et du gel).
 3. Séparation des grains des minéraux et décohésion d'une certaine partie de ces derniers due aux phénomènes liés à la gélivité, la porosité et la cristallisation de la pierre.
 4. Séparation des grains des minéraux d'une roche sous l'effet d'actions mécaniques (dilatation différentielle, gélivité, variation de teneur en eau, cristallisation des sels) ou par hydrolyse de certains minéraux qui provoque la décohésion de la roche.
 5. Phénomène physico-chimique qui prend en charge un minéral solide par les eaux de ruissellement ou d'infiltration sous forme d'une solution.

© G. Vallière

1.2.2.1.2 Les sels

Efflorescences, dissolution, désagrégation : autant d'altérations qui sont plus ou moins directement liées à la présence d'eau et de sels solubles dans la pierre. Ces sels, dits « expansifs », prennent du volume lorsqu'ils sont hydratés, ce qui entraîne des dégradations du support.

Les sels peuvent avoir diverses provenances. Le calcium est parfois présent dans la roche, dans certains grès par exemple ; il peut aussi provenir du mortier (chaux ou ciment). Le soufre peut apparaître suite à l'altération de pyrite par l'eau. Une activité bactérienne peut capter le soufre organique au niveau du sol et l'oxyder sous forme de sulfate à la surface des pierres après un transport dans les murs du bâtiment par capillarité. En atmosphère urbaine, l'eau de pluie est enrichie en soufre par la pollution.

Plusieurs mécanismes entraînent la migration des sels et leur variation de volume :

- la mise en solution des sels solubles, généralement par l'eau de pluie ;
- le transport de ces solutions par capillarité à travers la roche, et ce d'autant plus loin que les pores sont fins ;

- la cristallisation de ces sels à la faveur d'une atmosphère moins humide ;
- l'hydratation de certains sels.

Ces deux derniers phénomènes induisent une expansion des sels, qui peut se traduire par une désagrégation de la pierre ou des ouvertures de fissures. L'altération évolue dans le temps et dans l'espace par alternance de périodes de solubilisation, de transport et de cristallisation de ces sels. Le vent, qui entraîne de brusques variations de température et d'hygrométrie, peut accélérer le processus, plus particulièrement l'alvéolisation du support. À l'intérieur des bâtiments, l'alternance humidité-séchage peut être le fait d'un habitat occasionnel. Le sel le plus fréquemment rencontré dans ces altérations est le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). On trouve aussi l'epsomite ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), la mirabilite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) et des sels doubles ou triples tels que le syngénite ($\text{Ca}, \text{K}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ou la polyhalite ($\text{K}_2\text{MgCa}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

1.2.2.1.3 Le calcin

Le calcin est une croûte protectrice qui se forme à la surface des pierres calcaires. Il apparaît par carbonatation de la surface sous l'action de l'air et des intempéries. Essentiellement composé de carbonate de calcium, le calcin est plus dur, plus dense et moins poreux que la pierre sur laquelle il se forme. Il lui donne une patine qui ne doit pas être confondue avec un encroûtement de salissure. Le calcin est essentiel à la protection des pierres calcaires et les procédés de restauration ou de nettoyage doivent le préserver au maximum.

Le phénomène de formation du calcin n'est fâcheux que dans le cas de pierres très poreuses : l'eau entrée par une face chemine jusqu'à l'autre face de la pierre et se trouve bloquée par la couche de calcin. La poussée de l'eau ainsi enfermée risque de provoquer un délaminage superficiel (c'est-à-dire une désagrégation en lamelles de la pierre) ou une desquamation.

1.2.2.2 Les bétons

1.2.2.2.1 La composition du béton

Le béton est un matériau d'apparition relativement récente puisque le ciment n'a été inventé qu'en 1817, par le Français Louis Vicat. Il est un mélange de plusieurs composants, principalement du ciment, de l'eau et des granulats (sables et graviers jusqu'à 25 mm de diamètre). Des adjuvants sont parfois ajoutés, qui permettent d'améliorer la mise en œuvre du béton (auto-plaçant, plastifiant, fluidifiant), ses caractéristiques de résistance mécanique ou sa tenue dans des environnements agressifs (environnement marin, cycle gel/dégel, etc.).

On ne trouve que rarement du béton en masse, sans ajout d'armatures en acier ou de fibres. En effet, si ce matériau est caractérisé par une bonne résistance mécanique à la compression, sa résistance à la flexion est très faible. L'acier a les caractéristiques inverses et son association avec le béton permet d'obtenir de très bons résultats en termes de résistance aux diverses pressions.

Les pathologies du béton sont liées à l'assemblage et à la nature de ses différents composants.

- **Ciment** • Fissurations ou éclatements peuvent être liés à un mauvais dosage en ciment du béton. Ce dosage, toujours délicat à réaliser, dépend de différents critères : le type de béton, la destination de l'ouvrage, la résistance requise, les granulats utilisés, etc. La norme XP P 18-305, « Béton prêt à l'emploi », indique les dosages à respecter. D'une façon générale, on considère que la résistance mécanique du béton est proportionnelle au dosage en ciment ; celui-ci est le plus souvent compris entre 150 et 400 kg par m³ de béton.
- **Eau** • La résistance et la durabilité du béton sont diminuées par un excès d'eau. L'eau doit en outre être propre ; l'utilisation d'eau de mer est à proscrire, surtout pour le béton armé.
- **Granulats** • Pour assurer une durabilité suffisante au béton, les granulats utilisés doivent être de qualité et satisfaire à deux exigences primordiales : leur propreté doit être constante (il s'agit de limiter la teneur en fines argileuses), et leur granulométrie – la taille des différents grains formant le granulat – doit permettre d'obtenir une bonne homogénéité et une bonne compacité du béton.



© G. Vallière

Salissures sur un bâtiment en béton.

1.2.2.2.2 Les principaux agents agressifs du béton

Éclatements et fissurations du béton sont causés par :

- les eaux douces et les eaux de pluie acides;
- les eaux de pluie ou de ruissellement chargées en sulfates, menant à la formation de sels gonflants de type gypse, ettringite, thaumasite, etc.;
- les embruns, dans lesquels l'action des chlorures tempère celle des sulfates avec la formation de chloroaluminates;
- les réactions alcali-granulats (c'est-à-dire entre le liant ciment et les granulats) qui conduisent à la formation de sels expansifs silico-alcalins ou silico-calco-alcalins;
- la corrosion des armatures, liée à la carbonatation des hydrates calciques ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) par le CO_2 atmosphérique ou à la diffusion de certaines espèces ioniques, Cl^- par exemple (voir *La rouille des aciers*, ci-dessous);
- le cycle gel/dégel, qui engendre des circulations d'eau et des pressions hydrauliques dans le réseau capillaire du béton.

1.2.2.2.3 La rouille des aciers

La rouille des aciers est liée à l'évolution du béton. Dans un béton récent, les pores sont occupés par de l'hydroxyde de calcium, de formule chimique $\text{Ca}(\text{OH})_2$, provenant du ciment. L'hydroxyde de calcium a un effet très bénéfique car il est à l'origine de la formation sur les armatures d'une couche protectrice empêchant la formation de rouille : c'est le phénomène de passivation des aciers.

Avec le temps, le dioxyde de carbone (CO_2) contenu naturellement dans l'air pénètre jusque dans la masse et y réagit avec l'hydroxyde de calcium. La réaction chimique qui se développe alors peut se résumer par la formule suivante : $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$. Elle précipite l'hydroxyde sous forme de sel insoluble, ce qui entraîne la « dépassivation » du béton et la diminution du pH : c'est là le phénomène de carbonatation du béton, qui fait disparaître la couche protectrice des aciers. Indépendamment de la carbonatation, les ions chlore (provenant de l'air marin par exemple) peuvent pénétrer à l'intérieur du béton. Après plusieurs phases intermédiaires, les ions fers et l'oxygène se combinent pour former des oxydes complexes : la rouille. L'éclatement de la couche de béton enrobant les aciers constitue le premier symptôme de corrosion.

1.2.2.3 Les briques

Les briques développent les mêmes pathologies que la pierre (désagrégation, pulvérulence, desquamation, efflorescences, pathologies des joints, etc.) mais également des pathologies spécifiques, liées au fait qu'elles sont fabriquées et mises en place par l'homme.

1.2.2.3.1 Les différents types de brique

Fabriquées à partir de terre cuite, les briques sont un matériau dont on trouve dans le bassin méditerranéen des vestiges datant de plus de six mille ans. En France, on distingue deux types principaux de briques anciennes: les briques « du Nord », particulièrement présentes dans le nord de la France et en Belgique, et les briques « de Toulouse », utilisées dans le Sud-Ouest – mais, d'une région à l'autre, la nature des briques utilisées varie. La production actuelle, entièrement industrialisée, permet de réaliser des briques de qualité régulière.

Les briques apparentes des façades peuvent être des briques de parement. Il s'agit alors soit de plaques de terre cuite collées sur le mur comme un carrelage, soit de briques pleines. Elles peuvent éventuellement être colorées.

Souvent mises en œuvre dans les régions dépourvues de carrières de pierre, les briques ont de nombreuses qualités intrinsèques : stabilité dimensionnelle, durabilité, grande résistance au feu, etc. Leur défaut principal est leur porosité, qui laisse pénétrer l'eau et induit des problèmes d'humidité: on considère qu'un mur en brique peut devenir humide sur environ 10 à 20 cm d'épaisseur. Les briques anciennes, de moins bonne qualité, peuvent ainsi s'effriter sous l'effet du gel. Elles peuvent être protégées par un enduit respirant (mortier de chaux faiblement hydraulique ou de chaux aérienne), qui favorise les échanges gazeux de l'intérieur du mur en briques vers l'extérieur – par contre les enduits à base de ciment doivent être proscrits: ils formeraient une barrière étanche qui emprisonnerait l'eau dans le mur et participerait à la dégradation de la maçonnerie.



| Façade en briques (après traitement) de l'ancienne chocolaterie Menier (Noisiel – Seine-et-Marne).

1.2.2.3.2 L'appareillage des murs de brique

Le mur de brique est appareillé : les briques doivent se chevaucher sur au moins un quart de leur longueur et être posées à joints croisés. La boutisse est la brique de liaison qui se pose perpendiculairement à la longueur du mur, tandis que la panneuse est disposée dans la longueur du mur. On considère en général que les murs porteurs doivent avoir une épaisseur d'au moins 22 cm, et que cette épaisseur doit être au moins égale au quinzième de la hauteur entre deux planchers. Ces appareillages doivent être respectés lors du montage ou de la rénovation du mur car ils assurent son homogénéité et favorisent la répartition des charges (poids de la structure et efforts du vent).

1.2.3 Problèmes liés à l'humidité

L'humidité est un facteur déclenchant ou aggravant de la plupart des pathologies décrites dans ce livre. Trois types d'humidité doivent être pris en compte lors d'une rénovation de façade : l'humidité ascensionnelle, en provenance du sol, les infiltrations d'eau de pluie à travers les murs et l'humidité d'origine accidentelle.

1.2.3.1 Humidité ascensionnelle (remontées capillaires)

1.2.3.1.1 Origines

Les murs construits avec des matériaux capillaires, c'est-à-dire ayant une masse volumique inférieure à 1900 kg/m^3 , peuvent être soumis à un phénomène de remontées capillaires (la masse volumique moyenne d'un calcaire tendre est de 1650 kg/m^3 , celle d'une brique creuse de 650 kg/m^3 , celle du béton armé de 2500 kg/m^3). L'humidité ascensionnelle se manifeste lorsque les fondations ou la base des murs d'un bâtiment se trouvent au contact de l'eau. C'est le cas :

- des murs fondés dans la nappe phréatique ;
- des murs fondés au-dessus de la nappe phréatique mais dans un sol lui-même capillaire ;
- des murs fondés dans un sol ayant subi des modifications environnementales (par exemple un arrêt de pompage dans un parking souterrain ou un métro voisin) entraînant une remontée de la nappe phréatique ;
- des murs subissant une altération accidentelle des réseaux d'eau, par exemple rupture d'une canalisation enterrée ou défauts d'étanchéité d'un regard de collecte d'eaux pluviales ou d'eaux usées.

1.2.3.1.2 Manifestations

Un mur soumis à des remontées capillaires présente un taux d'humidité constant sur toute son épaisseur. L'humidité est à son maximum à la base du mur, et elle décroît au fur et à mesure que l'on s'élève.

Une variation de la hauteur d'imprégnation du mur suivant les périodes indique que le niveau de la nappe d'eau souterraine alimentant cette humidité varie également. Compte tenu de la lenteur des phénomènes d'absorption et d'évaporation, il peut exister un décalage temporel important entre les deux phénomènes. La source d'humidité est le plus souvent accidentelle lorsqu'un mur présente des traces d'humidité ascensionnelle alors qu'il était parfaitement sec depuis sa construction.

1.2.3.2 Les infiltrations d'eau de pluie

1.2.3.2.1 Origines

Si une faible épaisseur de mur est évidemment facteur d'infiltrations, il est assez rare que les murs porteurs anciens présentent ce défaut. D'autres déficiences peuvent toutefois favoriser la pénétration de la pluie :

- les fissures, qui peuvent être plus ou moins profondes (voir *Differentes pathologies*, p. 5);
- les défauts de liaisons entre les divers matériaux de la construction, qui se rencontrent le plus souvent entre les ossatures en bois et la maçonnerie de remplissage, ou entre les chaînages verticaux et horizontaux des maçonneries et le reste des murs;
- la dégradation du mortier des joints, qui peut résulter soit d'une porosité excessive due à une mauvaise composition du mortier, soit d'un détachement de la partie superficielle du garnissage du joint;
- les défectuosités diverses des enduits (mauvaise adhérence au support, fissuration ou même disparition de l'enduit, etc.). Dans certains cas, par souci esthétique, les enduits ont été supprimés. C'est là une erreur car ils empêchent les pénétrations d'eau dans la façade tout en permettant l'évacuation de la vapeur d'eau de l'intérieur du bâtiment vers l'extérieur;
- les défauts d'étanchéité entre les menuiseries et le gros œuvre, qui apparaissent souvent aux angles des tableaux des fenêtres;
- les défauts d'étanchéité des menuiseries, notamment entre les dormants et les ouvrants.

1.2.3.2.2 Manifestations

Les causes très variées des infiltrations directes d'eau de pluie expliquent qu'elles puissent apparaître à n'importe quel niveau du bâtiment, le plus souvent sous forme de taches brunes. Ces manifestations sont intermittentes car liées aux précipitations atmosphériques. Dans la plupart des cas, le taux d'humidité décroît entre l'extérieur et l'intérieur de la maçonnerie.

1.2.3.3 Humidité d'origine accidentelle

1.2.3.3.1 Origines

Dans un bâtiment, les réceptacles des eaux de ruissellement d'eau de pluie et les ouvrages destinés à la circulation des eaux peuvent devenir le point de départ d'une humidité accidentelle.

Sont particulièrement à risque :

- les toitures en pente mal entretenues;
- les toitures-terrasses fissurées ou dont l'étanchéité n'est pas parfaite;
- les chéneaux, les gouttières et les descentes d'eau diverses bouchés ou mal raccordés entre eux;
- les diverses canalisations encastrées dans la maçonnerie (alimentation en eau, évacuation des eaux usées, etc.).

1.2.3.3.2 Manifestations

Les manifestations de l'humidité sont le plus souvent situées à proximité immédiate du point d'infiltration, ce qui facilite le diagnostic. Toutefois, lorsque l'infiltration n'a pas un fort débit, l'humidité peut migrer longtemps dans la maçonnerie avant de devenir apparente.

1.2.3.4 Conséquences de l'humidité

L'humidité peut entraîner :

- une variation dimensionnelle des matériaux, dont le volume augmente lorsque le taux d'humidité croît et diminue lorsque le taux d'humidité décroît. Ces variations induisent éclatements et fissurations du matériau lui-même ou des éléments alentours;
- une diminution de la résistance mécanique. Une compression exercée sur un matériau humide entraîne une évacuation de l'eau. Ce phénomène induit une pression qui s'ajoute à la contrainte exercée sur le matériau. La résistance mécanique des matériaux à la compression diminue donc avec l'humidité;
- une augmentation de la conductivité thermique. Lorsqu'ils sont secs les matériaux de construction, et a fortiori les matériaux isolants fortement poreux, emprisonnent l'air dans leurs pores. Lorsqu'ils sont humides cet air se transforme en eau, dont la conductivité thermique est 25 fois supérieure à celle de l'air. La qualité de l'isolation du bâtiment baisse alors de manière très sensible;
- une dégradation de certains matériaux : pierres (granit, grès, molasse, etc.), terre crue, etc. (voir partie *Causes des pathologies*, p. 14);
- une sensibilisation au gel;
- des efflorescences et des crypto-efflorescences (voir partie *Differentes pathologies*, p. 9);
- un phénomène de corrosion des armatures (voir partie *Differentes pathologies*, p. 9);
- une prolifération végétale (mousses, lichens, moisissures). L'apparition de salissures vertes constitue un symptôme fiable de présence d'eau. Elles retiennent l'humidité et risquent d'entraîner la détérioration des matériaux sur lesquels elles poussent. (voir partie *Differentes pathologies*, p. 7).

Partie 2

FICHES TRAITEMENT



© G. Vallière

2.1 Restauration des joints

Les joints constituent un des éléments clés de la façade car ils permettent de renforcer la structure du bâtiment (ils lient différents éléments de maçonnerie entre eux) et d'assurer son étanchéité. Ils jouent en outre un rôle esthétique puisqu'ils soulignent les lignes architecturales et les appareillages de pierre ou de brique.

Dans cette partie sont données toutes les indications permettant de restaurer les différents types de joints sur briques, pierres de taille ou maçonneries de moellons. Sont également abordés les joints souples à base de mastic utilisés dans les constructions contemporaines.

Joints rigides (pierres ou moellons)	p. 32
Joints rigides (briques)	p. 35
Joints rigides (pierre de taille)	p. 38
Joints souples	p. 41

Joint rigides (pièces ou moellons)

Pierre : lacune du mortier, pathologies joints

Description du procédé

Ce traitement consiste à supprimer les joints rigides endommagés de façades en pierre ou en moellon pour les remplacer par de nouveaux joints aux mortiers.

Intérêt du procédé

Les pathologies des joints sont courantes et bien identifiées : fissures, désagrégation, éclatement, dissolution. Dans le cadre de façades moins bien appareillées que les façades en pierre de taille, les joints assurent la solidité de l'édifice en liant un ensemble de pierres plus ou moins taillées et arrangées ensemble. Une désagrégation de ces joints implique des risques de pénétration d'eau aux travers des maçonneries et de fragilisation des murs.

Choix du mortier

Les mortiers utilisés sont des mortiers de ciment, des mortiers de chaux ou des mortiers ciment et chaux, hydrofugés ou non, préparés sur le chantier ou prêts à l'emploi. Le mortier choisi doit être adapté :

- aux caractéristiques de résistance de la pierre du support (on préfèrera des joints plus souples à base de chaux aérienne pour les pierres tendres et plus rigides à base de chaux hydraulique pour les pierres dures) ;
- au degré d'imperméabilité de la façade à obtenir (mortier hydrofugé ou non). On préfèrera les mortiers de ciment pour favoriser l'imperméabilité à l'eau, et des chaux hydrauliques ou aériennes pour favoriser la perméabilité à la vapeur ;
- à la destination des maçonneries : les dosages en liant sont plus élevés pour les maçonneries porteuses (murs des étages inférieurs des collectifs par exemple) que pour les maçonneries faiblement chargées (maisons individuelles) ou les maçonneries de remplissage.

Les mortiers utilisés doivent offrir une bonne accroche mécanique sur le support (surdosser légèrement en liant de la première couche) et une finition « autonettoyante » (la couche de finition doit être lisse et faiblement dosée).

Choix et dosages en liant par rapport à l'agrégat de base (le sable)

DOSAGE DU LIANT (en kg)	MORTIER DE CHAUX HYDRAULIQUE	MORTIERS BÂTARDS	
		CIMENT	CHAUX
En poids par m ³ de sable sec	250 à 350	150 à 275	100 à 200
En volume pour 2 à 3 volumes de sable sec	1	1/2	1/2

(Extrait du DTU 20-1)

MODE OPÉRATOIRE

- Dégarnir les joints de la maçonnerie sur 3 à 4 cm de profondeur et éliminer les pierres altérées.
- Brosser les joints évidés à la brosse métallique pour éliminer les résidus pulvérulents. Le sablage ou l'hydrosablage permettent de nettoyer les pierres (voir fiches *Sablage à sec* et *Sablage hydropneumatique*) mais demandent beaucoup de précautions car, sans joints, les risques de pénétration d'eau au travers des maçonneries sont importants.
- Appliquer éventuellement un primaire d'accrochage au rouleau ou à la brosse : il permet la bonne prise du mortier sur la pierre support, en particulier en cas de contact avec des pierres dures (types calcaires marbrier par exemple), ou de présence de sels dans les maçonneries. Sinon mouiller la pierre et laisser ressuyer.
- Application manuelle* : garnir les joints avec une truelle langue de chat. Le mortier du joint doit être serré au fur et à mesure du montage, avant qu'il n'ait fait sa prise. Pour les joints profonds il est nécessaire d'appliquer le mortier en plusieurs couches (appelées couches de dégrossi), dont la surface est laissée rugueuse pour favoriser l'adhérence de la suivante.
Application mécanique : garnir les joints avec la lance spéciale. Attention, tous les mortiers ne sont pas compatibles avec une application à la machine : se reporter aux notices des produits. Resserrer le mortier manuellement.
- Après quelques heures de séchage, brosser les joints. Ensuite, s'il n'y a pas de risques d'éraflures du support, nettoyer les pierres ou moellons à la brosse métallique.

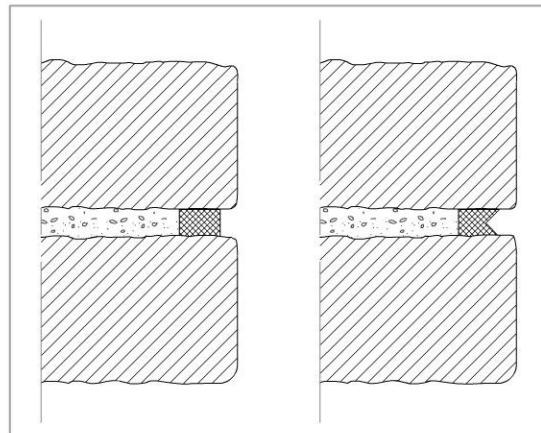


| Application du mortier à la machine.

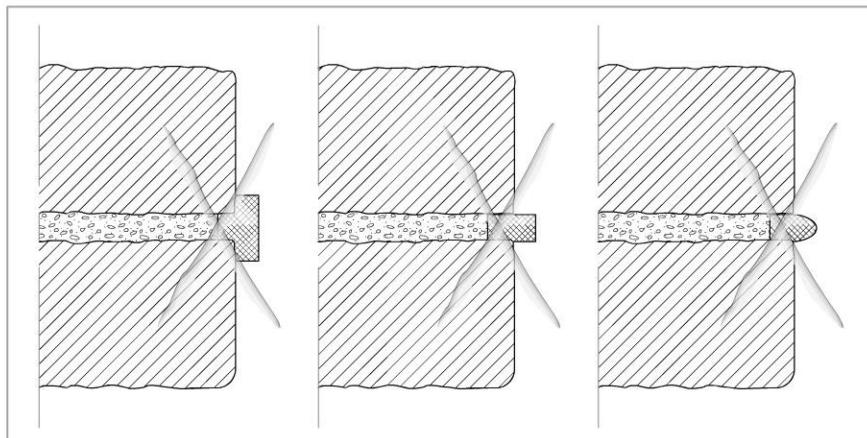
© Weber et Broutin

OBSERVATIONS ET CONSEILS

- L'emploi de ciments auxquels ont été ajoutés du laitier ou des cendres volantes augmente les risques de taches sur les pierres. Une erreur fréquente est de trop doser le mortier en ciment: il risque alors d'altérer les pierres tendres voisines. On préférera les mortiers bâtards ou à la chaux.
- Les joints horizontaux et verticaux doivent être exécutés de façon à ce qu'il n'y ait pas de discontinuité entre leur mortier. On évite ainsi les risques de fissuration au droit des raccords.
- Par temps sec et chaud, il faut protéger le mortier de la dessiccation en employant des procédés adaptés au chantier et à la sécheresse: arrosages légers et fréquents, paillassons ou bâches maintenus humides, etc.
- Quels que soient le type du mur et la nature de la maçonnerie, le profil des joints des maçonneries extérieures apparentes ne doit pas s'opposer à l'écoulement des eaux de ruissellement.



Joint conseillés.



Joint à éviter (saillants).

Joint rigides (briques)

Brique : pathologies joints

Description du procédé

Cette méthode consiste à supprimer les joints rigides endommagés des façades en brique pour les remplacer par de nouveaux joints au mortier.

Intérêt du procédé

Dès les premières dégradations des joints (éclatement, désagrégation, pulvéritance, disparition), il est important de faire un diagnostic et de planifier une intervention rapide car les joints permettent la cohésion des différents matériaux de l'ouvrage. Ils assurent en outre l'étanchéité de la façade et favorisent des échanges gazeux entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment.

Choix du mortier

Les mortiers utilisés pour le rejoignement devront être choisis en fonction :

- de la résistance des briques et de l'adhérence sur celles-ci ;
- du degré d'imperméabilité de la façade (mortier hydrofugé ou non) ;
- de l'esthétique (mortier colorisé ou non).

Le phénomène de fissuration ou de désagrégation des joints survient principalement lorsque le mortier n'est pas suffisamment serré au fur et à mesure du montage ou que le mortier du joint est insuffisamment dosé. Le tableau suivant indique le dosage à réaliser :

Dosage en kg de liant par m³ de sable sec

	CIMENT (kg)	CIMENT + CHAUX (kg)
Dosage par m ³ de sable sec 0/2	500 à 600	400 + 200

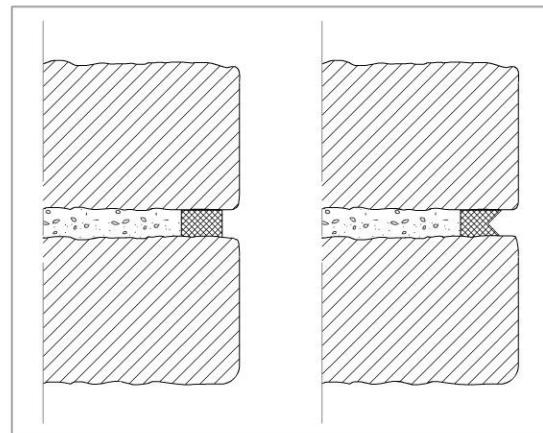
MODE OPÉRATOIRE

1. Dégarnir les joints de la maçonnerie sur 1 à 3 cm de profondeur à l'aide d'un décintroir ou d'un outil fin et pointu tel qu'un burin. Utiliser une petite disqueuse dans le cas de joints durs, en ciment par exemple. Se protéger des projections en portant des lunettes de protection.

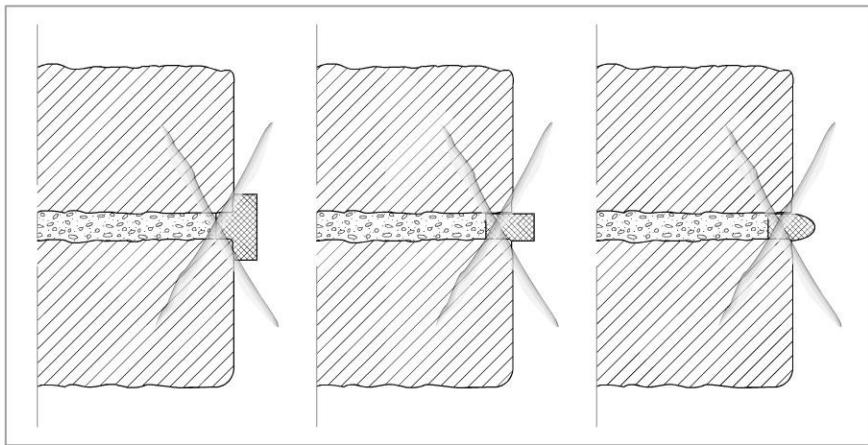
2. Brosse les joints ouverts pour éliminer les parties pulvérulentes. Nettoyer les briques pour assurer une bonne adhérence des joints sur le support. Un sablage ou un hydrosablage permettent de nettoyer les briques (voir fiche *Sablage hydropneumatique*). Attention toutefois : ces procédés doivent être mis en œuvre avec d'extrêmes précautions, seulement dans le cas où aucune autre méthode de nettoyage du support ne serait valable. En effet, la qualité des briques est très variable selon la température et le temps de cuisson, et les risques de désagrégation liés à des méthodes de nettoyage brutales, de type projection à haute pression, sont importants.
3. Mouiller les joints à refus la veille de l'application. Gâcher le mortier assez serré pour assurer un bon remplissage et un bon maintien des joints. Procéder systématiquement à une légère réhumidification des matériaux poreux avant l'application du mortier, en particulier par temps chaud.
4. Garnir les joints à l'aide d'un fer à joints en serrant le mortier. Celui-ci doit être mis en œuvre à moitié sec. La profondeur du joint doit être inférieure ou égale aux 2/3 de son épaisseur. Lisser au fur et à mesure. Pour une finition brossée, utiliser une brosse dure (éviter les brosses métalliques qui risquent de laisser des éraflures sur les briques).
5. Laisser sécher. En cas de débordement, laver soigneusement les briques avant séchage du mortier pour éviter l'apparition de taches ou d'incrustations de mortier. Pour cela, utiliser une dilution d'acide chlorhydrique (maximum 7 % d'acide) puis rincer à l'eau avec une brosse poils nylon.

OBSERVATIONS ET CONSEILS

- Un trop fort dosage en ciment des mortiers pourrait altérer les briques voisines (risque de corrosion).
- Quels que soient le type du mur et la nature de la maçonnerie, le profil des joints des maçonneries extérieures apparentes doit permettre l'écoulement des eaux de ruissellement.
- Par temps sec et chaud, on doit protéger de la dessiccation le mortier mis en place dans le joint en employant des procédés adaptés : arrosages légers et fréquents, paillassons ou bâches maintenus humides, etc.



Joint conseillés.



Joints à éviter
(saillants).

- Si les briques sont poreuses, il faudra après le séchage complet des joints procéder à une imperméabilisation globale de la façade par pulvérisation de produits hydrofuges: on évite ainsi les risques de pénétration d'eau aux travers des maçonneries (effet de mèche des matériaux poreux). Il est important de choisir un hydrofuge adapté à la nature des joints et des briques de parement car certains produits d'imperméabilisation peuvent être incompatibles avec l'un ou l'autre des éléments de façade.

Joint rigides (pierres de taille)

Pierre : lacune du mortier, pathologies joints

Description du procédé

Ce traitement a pour but de reconstituer à neuf les joints dégradés. Il s'agit de composer un mortier compatible avec le support et de retrouver l'esprit d'origine de la façade (ligne architecturale, dessin des joints).



© G. Vallière

| Façade avec joints refaits à neuf.

Intérêt du procédé

Les pathologies des joints sont courantes et bien identifiées : fissures, désagrégation, éclatement, dissolution. La restauration des joints des murs en pierre apparente est une opération à ne pas négliger car les joints permettent d'absorber le mouvement de la façade tout en constituant une fermeture vis-à-vis de l'extérieur.

Une désagrégation de ces joints induit donc des risques de pénétration d'eau au travers des maçonneries et de fragilisation des murs.

Choix du mortier

Les mortiers utilisés sont des mortiers de ciment, des mortiers de chaux ou des mortiers ciment et chaux, hydrofugés, préparés sur le chantier ou prêts à l'emploi. Le mortier choisi doit être adapté :

- aux caractéristiques de résistance de la pierre du support (on préférera des joints plus souples à base de chaux aérienne pour les pierres tendres et plus rigides à base de chaux hydraulique pour les pierres dures) ;
- au degré d'imperméabilité de la façade à obtenir (mortier hydrofugé ou non). On préférera des chaux fortement hydrauliques ou des mortiers de ciment pour favoriser l'imperméabilité à l'eau, et des chaux faiblement hydrauliques ou aériennes pour favoriser la perméabilité à la vapeur ;
- à la destination des maçonneries : les dosages en liant sont plus élevés pour les maçonneries porteuses (murs des étages inférieurs des collectifs par exemple) que pour les maçonneries faiblement chargées (maisons individuelles) ou les maçonneries de remplissage.

Il faut en outre faire en sorte que les mortiers utilisés offrent une bonne accroche mécanique sur le support (il faut pour cela surdosier en liant de la première couche) et une finition autonettoyante (la couche de finition doit être lisse et faiblement dosée).

MODE OPÉRATOIRE

Pour éliminer les joints défectueux, l'opérateur peut les dégarnir à la sciotte ou les tronçonner à la rainureuse.

1. *Dégarnir les joints à la sciotte* : évider tous les joints défectueux sur au moins 2 cm de profondeur. Brosser pour éliminer les parties pulvérulentes éventuelles et dépoussiérer le joint ouvert.

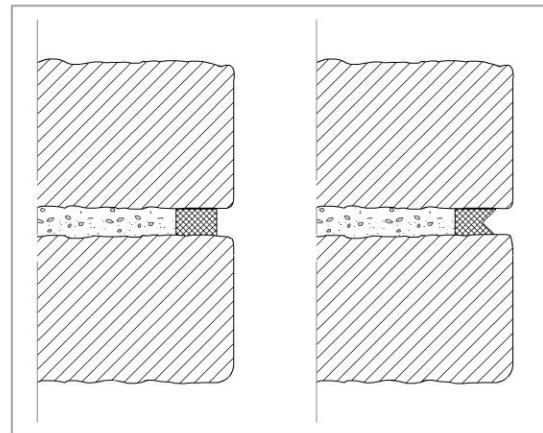
Tronçonner les joints à la rainureuse : une découpe des joints à la rainureuse permet de recréer des joints parfaits, sans bavure. Prendre appui sur une règle fixée au mur par des ventouses pour éviter de laisser les traces des guides à la découpe. Vider à l'aide d'une spatule ou d'un couteau spécial dont la forme a été modifiée pour que la lame puisse pénétrer dans la fente créée par la rainureuse.

2. Pour les joints à la chaux il est parfois nécessaire d'appliquer un primaire d'accrochage (voir notices des fabricants). Pour les joints en plâtre et chaux, humidifier le fond de joint. Appliquer le mortier et le serrer à la truelle. Essuyer les bavures du mortier de remplissage avant la prise à l'aide d'une éponge humidifiée.

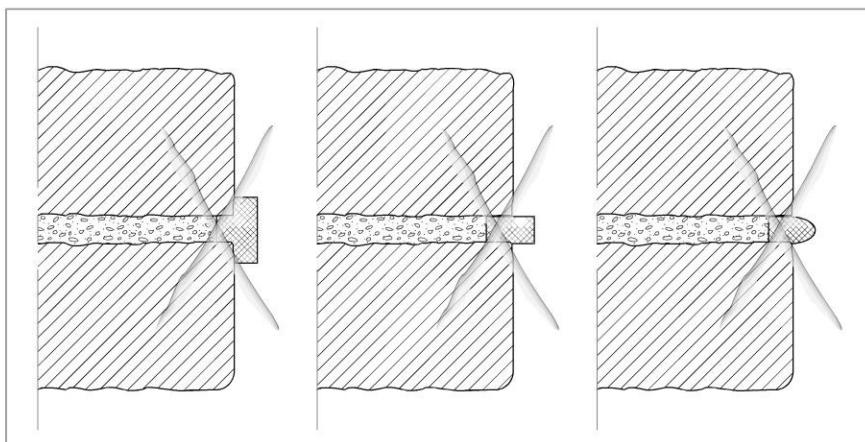
3. Après le début du durcissement, surfacer éventuellement les joints remplis à l'aide d'un rabotin, d'un chemin de fer ou d'un riflard.

OBSERVATIONS ET CONSEILS

- Les joints horizontaux et verticaux doivent être exécutés de façon à ce qu'il n'y ait pas de discontinuité entre eux. On évite ainsi les risques de fissuration au droit des raccords.
- Par temps sec et chaud, il faut protéger le mortier de la dessiccation en employant des procédés adaptés au chantier et à la sécheresse : arrosages légers et fréquents, paillassons ou bâches maintenus humides, etc.
- Pour la pierre de taille, l'épaisseur des lits de mortier de pose ou des joints est comprise entre 0,5 à 2 cm d'épaisseur.
- Quels que soient le type du mur et la nature de la maçonnerie, le profil des joints des maçonneries extérieures apparentes ne doit pas s'opposer à l'écoulement des eaux de ruissellement.



Joint conseillés.



Joint à éviter (saillants).

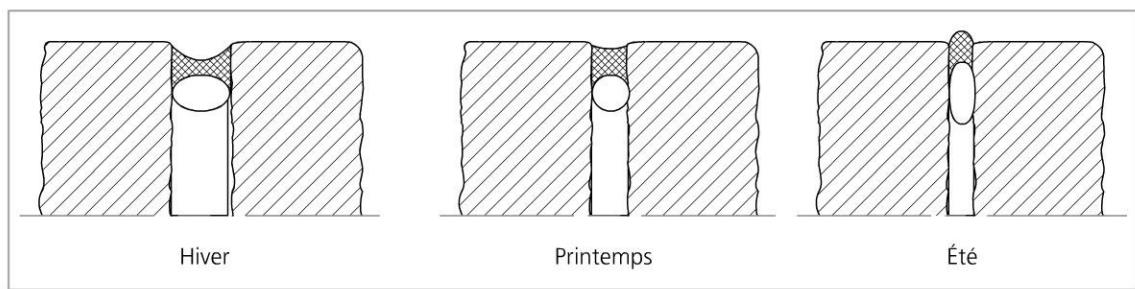
- Dans un souci de préservation du travail architectural initial, il est préférable de respecter le calepinage d'origine des pierres de taille.

Joint souple

*Béton : pathologies joints • Brique : pathologies joints
• Pierre : pathologies joints*

Description du procédé

Cette méthode consiste à supprimer les joints souples endommagés pour les remplacer par de nouveaux joints, constitués de mastics spécifiques.



| Variation de principe de la forme du joint selon les saisons.

Intérêt du procédé

Dans la plupart des cas, les joints endommagés n'avaient pas de protection rapportée (baguette aluminium, peinture, etc.) et étaient donc soumis aux intempéries et aux ultra violettes (UV) du rayonnement solaire. Ils ont alors durci, se sont desséchés, craquelés, et dans certains cas ont complètement disparu. D'autrefois ils étaient absents dès l'origine de la construction. Quoi qu'il en soit la réalisation de joints souples est une opération importante: c'est eux qui absorbent les dilatations du bâtiment, causées le plus souvent des écarts de températures. Leur malfaçon, leur absence ou leur dégradation peuvent entraîner d'importantes fissurations.

Choix des mastics

Deux grands types de mastics existent: les mastics plastiques et les mastics élastomères. Ils peuvent reprendre partiellement ou totalement leurs dimensions après suppression des forces principales de la déformation (c'est le phénomène de reprise élastique). Leurs amplitudes de déformations sont différentes.

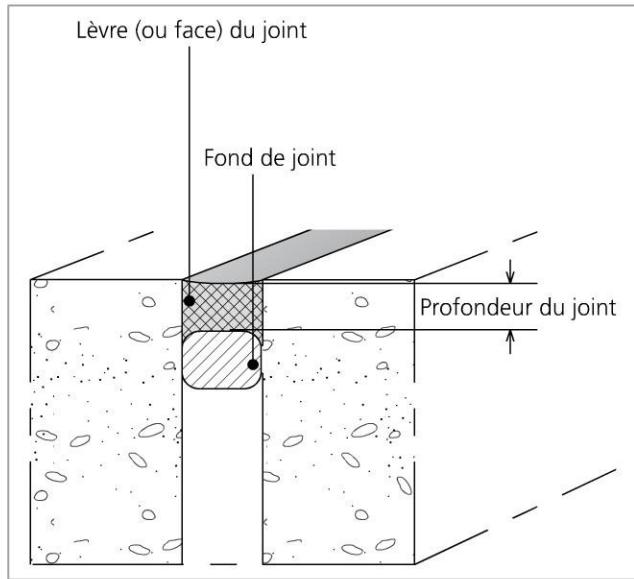
Pourcentages d'amplitude des différents joints

	MASTIC ÉLASTOMÈRE		MASTIC PLASTIQUE	
	1 ^{re} catégorie	2 ^e catégorie	1 ^{re} catégorie	2 ^e catégorie
Amplitude	± 25 %	± 12,5 %	± 12,5 %	± 7,5 %

Le Syndicat français des joints et façades (SFJF) délivre un « label SFJF » qui permet d'attester de la qualité des mastics.

MODE OPÉRATOIRE

1. Mesurer la distance entre les lèvres du joint. Remettre éventuelle aux dimensions par tronçonnage (voir tableaux p. 43-44).
2. Reconstituer les supports et les parties peu ou mal adhérentes au support (voir fiche *Réparation ponctuelle des façades en béton* ou *Substitution par pierre artificielle des façades en pierre de taille*). Dans le cas de réparation à l'aide de mortier, le temps d'attente est fonction des matériaux de reconstitution utilisés et de la saison ; en moyenne un délai de huit jours à trois semaines est observé. Brosser et enlever toutes les souillures et les poussières.
3. Appliquer éventuellement un primaire d'accrochage pour permettre la bonne adhérence des lèvres du joint sur le support. Cette application étant susceptible de réagir sur le fond de joint, elle doit être faite avant la mise en place de celui-ci.
4. Mettre en place le fond de joint. Utiliser du produit alvéolaire de polyéthylène, de polyester ou de polyuréthane à cellules apparentes ou vertes sans peau



| Coupe de principe d'un joint souple.

de surface, ou du polystyrène expansé, ou encore du produit alvéolaire imprégné de caoutchouc synthétique : on évite ainsi l'adhérence du mastic sur ses trois faces (adhérence sur deux faces uniquement, le joint doit rester « libre » dans les autres directions).

5. Mettre en place le mastic. Cette opération doit être réalisée dans une plage stricte de température, donnée par les fabricants de produits, qui ne doit jamais être inférieure à 5 °C ou supérieure à 40 °C. Si la largeur du joint dépasse 15 mm, le calfeutrement de celui-ci est réalisé en plusieurs passes, à l'aide d'un « pistolet à piston ». Les deux premières passes doivent s'appuyer sur les lèvres du joint. La troisième passe constitue le centre (ou cœur) du joint.

OBSERVATIONS ET CONSEILS

- Il est déconseillé de peindre les joints : un revêtement de type peinture, plastique épais ou imperméabilisant, n'a pas le même taux de travail que le joint.
- Le tableau suivant fait état des normes de dimensionnement des joints telles qu'elles sont définies par le DTU 44.1 (NF P 85-210-1).

Classes et dimensionnement des mastics
Cas des joints à surfaces parallèles
entre éléments de façade en maçonnerie
 (préfabrication lourde et/ou maçonnerie traditionnelle)

JOINT				MASTIC	
Type de joint	Pourcentage de mouvement maximal D_j %	Largeur initiale L_0 mm		Classe minimale des mastics utilisables	Profondeur de calfeutrement p
		min	max		
Un étage	≤ 25	8	40	25 E	
Deux étages	≤ 25	8	40	25 E	$p = \frac{L_0}{2} \text{ avec un minimum de } 8 \text{ mm}$
	≤ 12,5	8	40	12,5 E ou 12,5 P	

Classes et dimensionnement des mastics
Cas des joints à surfaces parallèles entre éléments de façades légères

JOINT				MASTIC À EXTRUDER	
Type de joint	Pourcentage de mouvement maximal Dj %	Largeur initiale Lo mm		Classe minimale des mastics utilisables	Profondeur de calfeutrement p
		min	max		
Un étage	≤ 25	5	30	25 E	
Deux étages	≤ 25	5	30	25 E	$p = \frac{Lo}{2}$ avec un minimum de 5 mm
	≤ 12,5	5	30	12,5 E ou 12,5 P	
	≤ 7,5	5	30	7,5 P	
Joint horizontal à deux étages	≤ 7,5	5*		Mastic en cordon préformé – Section minimale 80 mm ² (\varnothing nominal minimal 9,5 selon NF P 30-30) – Écrasement minimal 30 % de l'épaisseur initiale du produit.	

* Il s'agit de la largeur après écrasement (épaisseur minimale du produit).

Classes et dimensionnement des mastics
Cas des joints à surfaces parallèles entre gros œuvre et menuiseries extérieures

JOINT		MASTIC	
Largeur initiale Lo mm		Classe des mastics utilisables	Profondeur de calfeutrement
min	max		
5	20	25 E ou 12,5 E	$p = \frac{Lo}{2}$ avec un minimum de 5 mm
		12,5 P	$p = \frac{Lo}{2}$ avec un minimum de 8 mm
10	20	7,5 P	$p = 10$ mm



© Weber et Broutin

2.2 Réparation

Dans le cas de pathologies ayant entraîné une dégradation physique du support (détérioration de la pierre, usure chimique ou mécanique du support par le vent ou les pluies acides, etc.), les différents types de nettoyage ne sont plus adaptés. Cette partie présente des procédés permettant de réparer un support endommagé. Sont décrites les possibilités de consolidation d'épiderme fragile (voir fiches *Consolidation par imprégnation* ou *Biominéralisation*), de substitution des éléments trop dégradés par de nouveaux éléments (*Substitution de pierre identique*) ou de réparation par ragréage ponctuel des éléments détériorés (voir fiches *Substitution par pierre artificielle* ou *Ragréage béton*).

Biominéralisation	p. 46
Consolidation par imprégnation	p. 49
Électro-osmose phorèse	p. 51
Réparation ponctuelle	p. 54
Ragréage superficiel	p. 57
Approche de diverses méthodes de traitement de la corrosion des fers à béton	p. 60
Substitution de pierre identique	p. 73
Substitution de pierre artificielle	p. 83

Biominéralisation

Béton : microfissuration • **Pierre :** désagrégation saccharoïde, désagrégation sableuse, pulvérulences

Description du procédé

La biominéralisation est une technique récente de traitement de la pierre qui utilise des bactéries calcifiantes (premiers essais en 1993). Celles-ci ont la particularité de produire un maillage protecteur de carbonate de calcium sur leur membrane. En pénétrant dans les pores et les interstices de la pierre, ce maillage de calcaire constitue de manière durable le voile de calcite et aide ainsi à la génération du calcin.



| Application du produit.

© J-F. Loubière, entreprise Calcite biococept

Intérêt du procédé

La biominéralisation permet d'améliorer certaines propriétés physiques de la roche (porosité, résistance mécanique, dureté surfacique, etc.) sans modifier son aspect macroscopique, sa rugosité moyenne et sa couleur. Ce procédé est particuliè-

ment bien adapté à la consolidation d'épidermes fragilisés par les pathologies de la pierre. Il est également utile pour protéger la pierre après un nettoyage trop agressif ou une retaillle sur place la rendant sensible aux agressions climatiques. La biominéralisation peut ainsi être utilisée aussi bien en traitement préventif, pour augmenter l'imperméabilité du support, qu'en traitement curatif, pour améliorer sa cohésion.

Moyens de mise en œuvre

Ce procédé récent a été développé par la société Calcite bioconcept, aujourd'hui détentrice du brevet, en collaboration avec le laboratoire de recherches des Monuments historiques et le laboratoire de microbiogéologie de l'université de Nantes. Il fait l'objet d'un savoir-faire spécifique que seule l'entreprise Calcite bioconcept possède à ce jour.

MODE OPÉRATOIRE

1. La biominéralisation ne peut être mise en œuvre que sur des pierres saines : procéder à un nettoyage complet des parements, en prenant soin d'utiliser un procédé non agressif (voir fiches *Gommage* ou *Hydrogommage*) pour éviter de fragiliser encore plus l'épiderme de la pierre endommagée. Si nécessaire, effectuer des réparations (voir fiches *Retaille* et *Ponçage*) et remplacer les pierres trop altérées (voir fiche *Substitution par incrustation de pierre identique*).
2. Appliquer la solution contenant des bactéries calcifiantes par pulvérisation à basse pression, à l'aide de pulvérisateurs ordinaires. La concentration en bactéries est de 2 à 5 grammes par litre – elle est fonction de la nature de la pierre et de son état d'altération.
3. Alimenter la souche bactérienne pendant trois jours par pulvérisation d'un liquide nutritif qui permet aux bactéries de se développer et de générer du calcaire sur leur enveloppe corporelle. La consommation totale en pierre de Paris est d'environ 1,5 l/m² pour 4 à 5 passes.
4. Une fois la nourriture épuisée, les bactéries meurent, laissant un épiderme de calcaire durci dans les micro-porosités de la pierre.

OBSERVATIONS ET CONSEILS

- La biominéralisation a l'avantage d'être écologique (bactéries non dangereuses pour l'homme ou pour l'environnement, recréation d'un calcin naturel protecteur) et économique (coût équivalent à un traitement minéralisateur chimique, soit environ 23 euros/m²).

- Les traitements d'imperméabilisation par voies d'hydrofuges à composants chimiques sont aujourd'hui plus utilisés que la biominéralisation du fait de leur grande diffusion auprès de tous les fournisseurs de matériaux pour le bâtiment, du prix des produits, et de leur facilité de mise en œuvre. Ces traitements ne nécessitent pas de qualifications particulières en matière de ravalement et d'entretien de façade. Cependant l'efficacité des produits hydrofuges décroît rapidement dans le temps, et il est nécessaire de répéter l'application de ces produits tous les deux à trois ans. La biominéralisation apporte quant à elle une solution plus durable de reconstruction de l'épiderme de la pierre et de son calcin protecteur.
- Les perspectives de la biominéralisation en matière de soin et d'entretien de la pierre sont prometteuses, même si pour le moment cette nouvelle technologie est surtout réservée aux édifices suivis et contrôlés par les Bâtiments de France ou les Monuments historiques (bâtiments classés, inscrits, protégés). Son utilisation semble pourtant en train de se développer, et sur des surfaces en pierre de grande envergure : la façade des nouvelles galeries Lafayette maison (boulevard Haussmann à Paris), la cathédrale Notre-Dame de Paris et l'ensemble des façades entourant l'hôtel Intercontinental place de l'Opéra à Paris ont par exemple été rénovés grâce à ce procédé.

Consolidation par imprégnation

Brique : désagrégation sableuse, desquamation

- *Pierre : desquamation, désagrégation sableuse, désagrégation saccharoïde, pulvérulences*

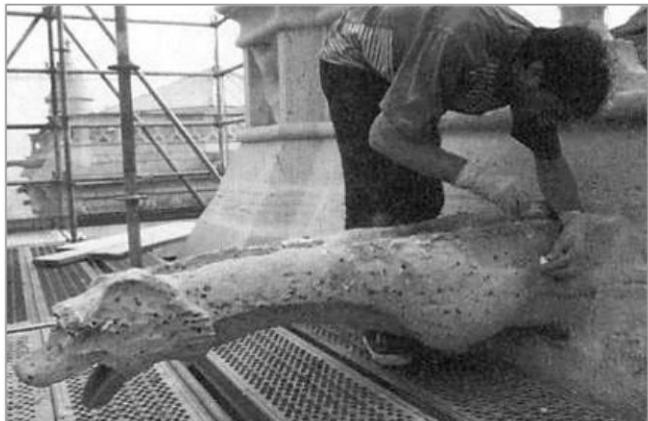
Description du procédé

Ce traitement permet de retrouver la porosité et la dureté originelle de matériaux minéraux poreux par imprégnation d'agents consolidants.

Lorsque l'état sanitaire du matériau le justifie, il peut être nécessaire de procéder à une opération préalable de pré-consolidation. Elle porte sur les zones fragilisées par les altérations et consiste en une

imprégnation du matériau par des consolidants appliqués par pulvérisation, injection ou immersion de la pierre. Cette pré-consolidation doit être exécutée avant toute opération de relevé, de dépoussiérage et de nettoyage (surtout lorsque la méthode de nettoyage est une méthode abrasive) : on préserve ainsi le plus possible les éléments architecturaux de la façade.

Après la pré-consolidation et le nettoyage, on peut passer à la consolidation proprement dite : il s'agit d'appliquer des produits consolidants qui reconstituent l'homogénéité de la pierre en favorisant la minéralisation ou la cristallisation des zones dégradées. Ils peuvent être appliqués à la brosse ou par vaporisation, sous vide ou non. Ces applications traditionnelles sont de plus en plus remplacées par des méthodes favorisant une meilleure imprégnation de la pierre (mise en œuvre de compresses d'argile ou de papier absorbant par exemple).



| *Imprégnation d'une gargouille.*

Intérêt du procédé

La consolidation par imprégnation est une solution plus respectueuse de la façade que la retaillé sur site (voir fiche *Retaillé*), mais elle est aussi bien plus chère à mettre en œuvre. Elle est surtout utilisée pour des façades ayant une valeur patrimoniale, sur lesquelles on veut sauvegarder le plus possible les éléments anciens.

Choix des produits de consolidation

Les consolidants peuvent être de nature organique (méthyl-acrylate ou éthyl-acrylate) ou inorganique (silicate d'éthyle, silanes ou siloxane). Différents produits ont été agréés par le Laboratoire de recherche des Monuments historiques (LRMH) tels que le Teveka Consolidant® (nom commercial de l'ester éthyle de l'acide silique) ou le Wacker OH®. Seuls des essais pratiqués sur le support altéré permettent de choisir lequel utiliser.

MODE OPÉRATOIRE

1. Effectuer les étapes préalables de pré-consolidation et de nettoyage de la surface à traiter.
2. Faire pénétrer en profondeur le consolidant dans les parties altérées. L'imprégnation se fait en général par capillarité après application au pinceau, au pistolet, par vaporisation ou par immersion sous vide. Créer un caisson étanche, par exemple avec un bâchage hermétique, permet une meilleure efficacité du traitement. Les consolidants peuvent également être injectés dans les fissures à l'aide d'un dispositif d'injection composé d'une aiguille hypodermique reliée à un système de réservoir sous pression hydrostatique (coulis de gravité ou « goutte à goutte ») que l'on suspend quelques dizaines de centimètres au-dessus de l'objet à traiter. L'imprégnation se poursuit jusqu'à ce que le produit ne puisse plus pénétrer dans la pierre.
3. Pour obtenir une coloration équivalente à celle de pierre en œuvre, réaliser le solivage des lèvres des parties écaillées à l'aide d'un coulis de chaux teintée avec de la poudre de pierre.
4. Réduire les éventuelles fissures par micro-injection de résines époxydiques fluides ou à faible viscosité. Cette opération de remplissage de la fissure peut être précédée par une consolidation des bords de la fissure (voir fiches *Traitements des fissures par colmatage* et *Traitements des fissures par injection*).



Injection à l'aide d'une seringue hypodermique.

OBSERVATIONS ET CONSEILS

Le silicate d'éthyle est un des produits les plus utilisés pour ce type de traitement. Il s'infiltre dans les pores de la pierre pour renforcer sa structure par polymérisation : les molécules s'agrègent en molécules plus importantes. Cette polymérisation se fait spontanément avec de la lumière, à température ambiante et en présence d'oxygène.

Électro-osmose phorèse

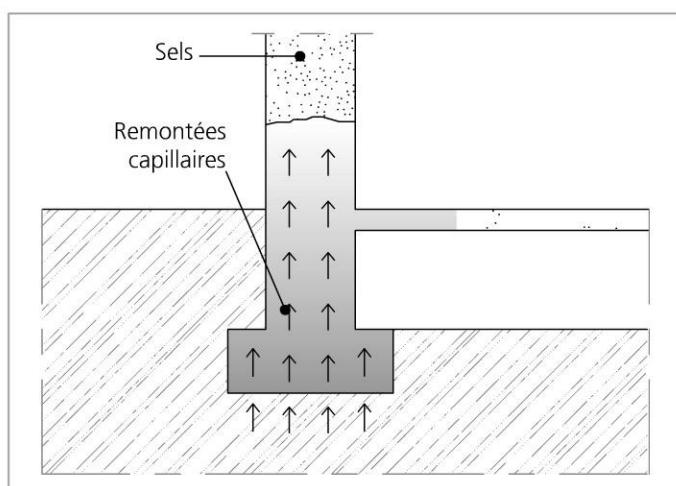
**Béton : humidité • Brique : humidité, remontées capillaires
• Pierre : humidité, remontées capillaires**

Description du procédé

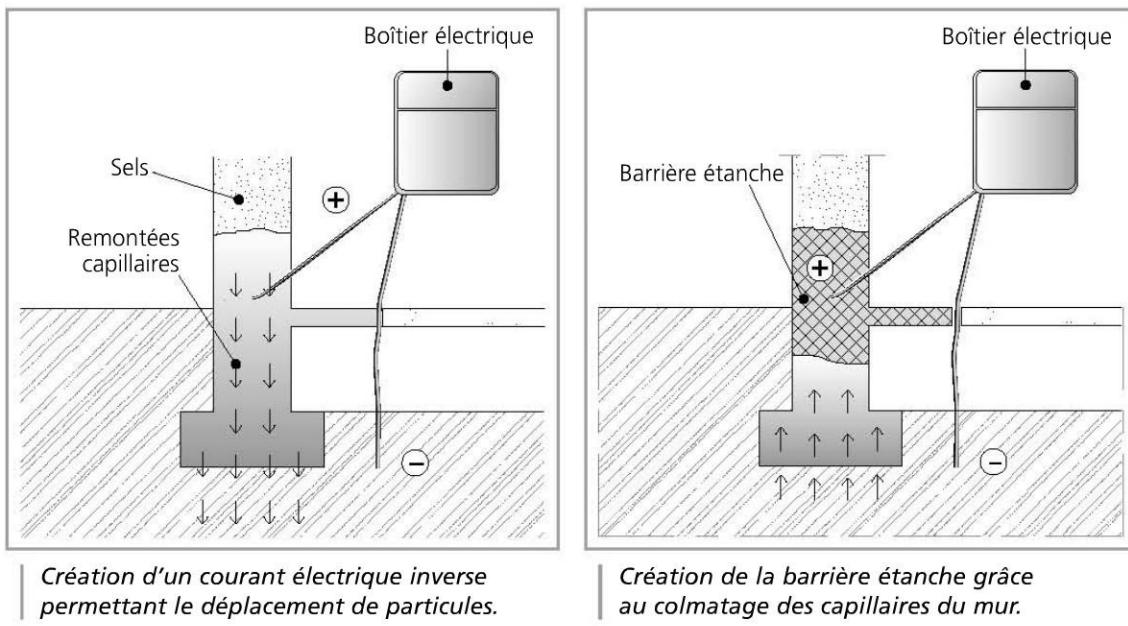
L'électro-osmose phorèse associe l'électro-osmose et l'électro-phorèse. L'électro-phorèse est le déplacement des particules ionisées en suspension dans un liquide entre deux électrodes, et l'électro-osmose est le processus permettant la création du déplacement d'un fluide à travers une paroi poreuse.

Ce procédé permet d'empêcher les remontées capillaires en jouant sur la différence de potentiel électrique entre le sol et le mur humide. En effet, dans le cas de remontées capillaires, l'ensemble sol-mur fonctionne comme une pile dont le sol serait l'anode (pôle +), et le mur, la cathode (pôle -). L'eau chargée de sels (nitrate, sulfate, etc.) subit l'influence de ce champ électrique et se déplace du pôle positif vers le pôle négatif.

L'électro-osmose phorèse consiste à faire passer un courant faible entre des électrodes implantées dans le mur (+) et une prise de terre (-) : on crée ainsi une différence de potentiel entre le (+) et le (-) qui entraîne l'eau et les particules métalliques en suspension vers le sol. Un produit colmatant injecté autour de l'anode disposée dans le mur est dans le même temps entraîné par le courant qui circule entre l'anode et la cathode. Il vient boucher les capillaires du mur, créant ainsi une barrière étanche qui vient bloquer les remontées capillaires.



État naturel du mur avant traitement.



Intérêt du procédé

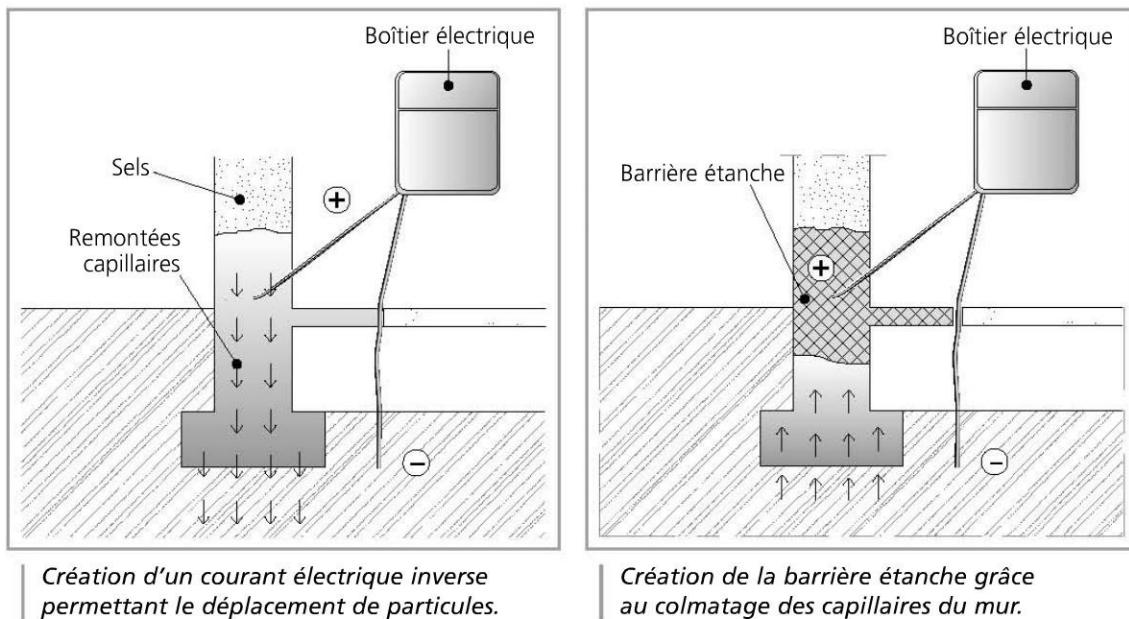
L'électro-osmose phorèse permet de lutter contre les remontées humides par capillarité dans les murs.

Moyens de mise en œuvre

L'équipement est constitué d'électrodes et d'un boîtier fournissant un courant électrique basse tension. Il est possible d'utiliser des électrodes en carbone afin d'éviter les risques d'électrolyse (c'est-à-dire de décomposition chimique de l'électrode par le passage du courant) et d'associer au mortier de scellement des électrodes une poudre de cuivre permettant de favoriser la diffusion du courant et du carbone au cours de la phorèse.

MODE OPÉRATOIRE

1. Sur la face intérieure du mur, percer des forages espacés au plus de 50 cm et disposés en quinconce selon deux lignes à environ 10 et 50 cm du sol. Le diamètre des forages est fonction de celui des électrodes (le plus souvent entre 10 et 15 mm). La profondeur de ceux-ci est fonction de l'épaisseur du mur, on prendra soin de ne jamais s'approcher à moins de 5 cm de la face opposée.
2. Créer deux saignées horizontales permettant de relier les forages.



Intérêt du procédé

L'électro-osmose phorèse permet de lutter contre les remontées humides par capillarité dans les murs.

Moyens de mise en œuvre

L'équipement est constitué d'électrodes et d'un boîtier fournissant un courant électrique basse tension. Il est possible d'utiliser des électrodes en carbone afin d'éviter les risques d'électrolyse (c'est-à-dire de décomposition chimique de l'électrode par le passage du courant) et d'associer au mortier de scellement des électrodes une poudre de cuivre permettant de favoriser la diffusion du courant et du carbone au cours de la phorèse.

MODE OPÉRATOIRE

1. Sur la face intérieure du mur, percer des forages espacés au plus de 50 cm et disposés en quinconce selon deux lignes à environ 10 et 50 cm du sol. Le diamètre des forages est fonction de celui des électrodes (le plus souvent entre 10 et 15 mm). La profondeur de ceux-ci est fonction de l'épaisseur du mur, on prendra soin de ne jamais s'approcher à moins de 5 cm de la face opposée.
2. Créer deux saignées horizontales permettant de relier les forages.

3. Enduire les électrodes d'un mortier spécial qui améliore leur tenue dans le forage et la qualité du contact avec le matériau du mur. Introduire les électrodes dans chacun des forages.
4. Relier les électrodes enfichées dans le mur par une tresse de cuivre. Disposer la tresse dans les saignées préalablement ouvertes. Reboucher les saignées pour protéger et maintenir en place la tresse. Utiliser un mortier ou un enduit hydrofuge afin d'éviter de trop importants écarts d'humidité entre l'enduit neuf et les maçonneries anciennes du mur. Attention de ne pas endommager les tresses de cuivre.
5. Relier la tresse selon la ligne à 10 cm du sol et celle selon la ligne à 50 cm du sol à un boîtier électrique fournissant un courant à basse tension aux électrodes, qui permet de faire circuler un flux électrique.

OBSERVATIONS ET CONSEILS

- Le soin apporté aux travaux a une très grande importance pour la pérennité de la façade et de l'installation. Il est donc indispensable que les entreprises procèdent à des vérifications techniques précises: vérification du bon état des câbles et des électrodes, mesure du passage du courant, observations visuelles et au microscope de l'évolution du support, etc.
- Il est difficile d'apprécier la durée d'efficacité des installations car diverses difficultés peuvent apparaître avec le temps: corrosion de la cathode dans le sol, polarisation des électrodes, etc. Or, si le système électrique ne fonctionne plus, le produit permettant de boucher les capillaires est à nouveau dispersé, laissant libre cours aux remontées capillaires. Un autre inconvénient du procédé est que les champs magnétiques terrestres peuvent venir en perturber le bon fonctionnement.
- Il existe un procédé proche de l'électro-osmose phorèse: la méthode Dry-tech®, exploitée et commercialisée par la société Adema. Ce procédé a la particularité non pas d'inverser la polarité du mur mais de le dépolarisier: le mur devient alors insensible aux champs magnétiques responsables de l'humidité ascensionnelle.

Réparation ponctuelle

Béton : éclatement

Description du procédé

La réparation ponctuelle consiste à éliminer soigneusement les parties endommagées du béton, puis à reconstituer l'élément enlevé par un rapiéçage à l'aide de mortier.



| Passivation des aciers.



| Serrage du mortier à la truelle.

© Weber et Broutin

Intérêt de procédé

Cette solution est adaptée à de petites zones dégradées ne dépassant pas quelques centimètres carrés : petites épaufures ou petites zones d'éclatement ponctuel non généralisées à toute la façade.

Choix du mortier

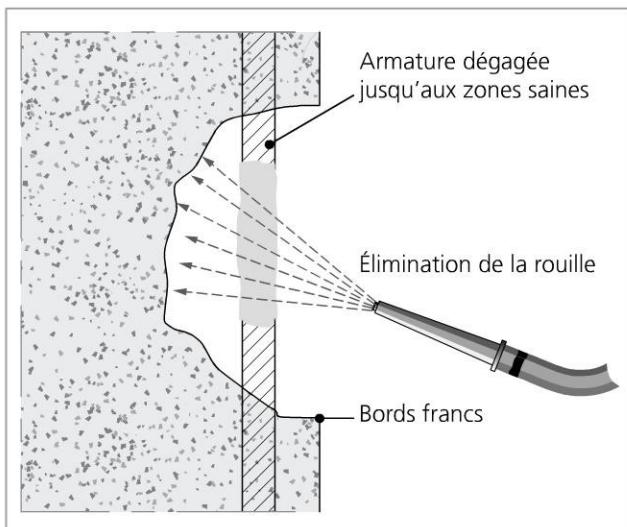
Des produits prêts à l'emploi performants peuvent être achetés chez de nombreux marchands de matériaux et de chimie du bâtiment. Les mortiers utilisés sont soit à base de ciment, adjuvanté ou non, soit à base de résine (époxydique, polyuréthane ou polyester), choisie en fonction du savoir-faire de chaque entreprise et de l'environnement de la façade. Pour des sites exposés (face à la mer par exemple, ou soumis au gel), préférer les mortiers résineux.

D'une manière générale, le mortier choisi doit avoir les caractéristiques suivantes :

- imperméabilité à l'eau et aux agents agressifs;
- module d'élasticité équivalent à celui du béton support;
- adhérence supérieure ou égale à la cohésion superficielle des bétons;
- résistances mécaniques supérieures ou égales à celles du béton support;
- dilatation thermique équivalente à celle du béton support.

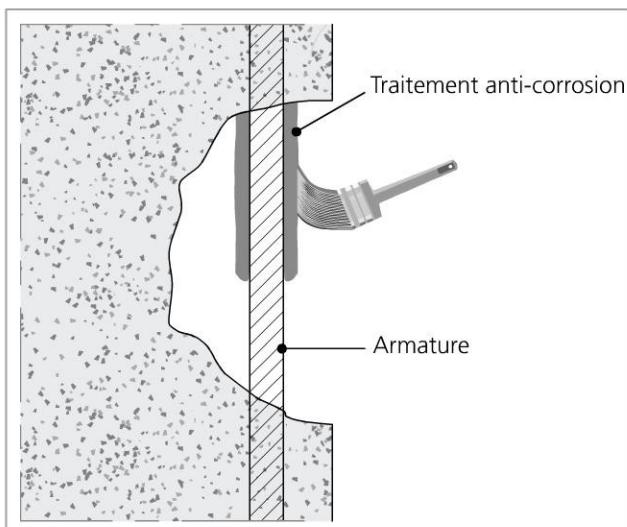
MODE OPÉRATOIRE

- 1.** Éliminer les parties dégradées et décaper le support afin d'éliminer les poussières, les salissures, les huiles de décoffrage : il s'agit d'obtenir un béton propre, sain et débarrassé des parties non adhérentes. Dégager les aciers jusqu'à retrouver un béton sain et non fissuré, et des aciers exempts de rouille non adhérente ou pulvérulente.
- 2.** Dérouiller les aciers sur toute leur périphérie par des moyens mécaniques ou manuels (brosse métallique, sablage, etc.).



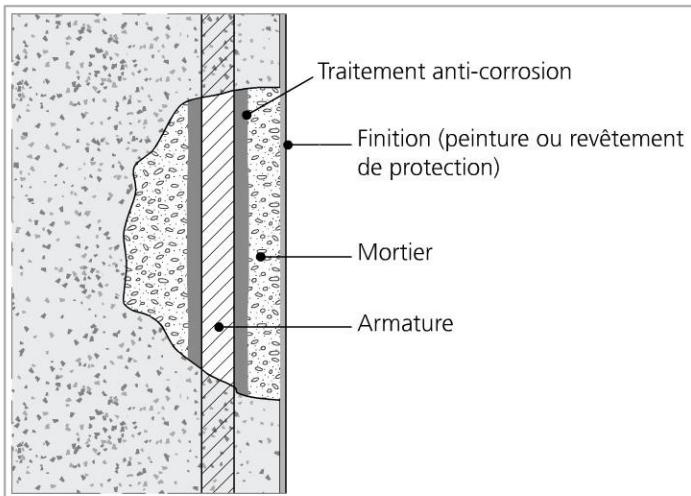
| Préparation du support.

- 3.** Couper les zones repiquées, c'est-à-dire les zones éliminées préalablement, de façon à obtenir des angles vifs. Ils permettront un bon ancrage du mortier.
- 4.** Appliquer sur les aciers une ou plusieurs couches de traitement anticorrosion à l'aide d'une brosse ou d'un pinceau. En règle générale le nombre de couche dépend de l'épaisseur d'enrobage des aciers. Se référer aux notices des fabricants pour le temps de séchage.



| Passivation des aciers.

5. Humidifier le support à refus, mais éviter qu'il soit ruisselant lors de l'application.
6. Appliquer le mortier à la taloche ou la truelle, de façon traditionnelle.
7. Dès que le mortier commence à tirer, effectuer la finition à l'aide d'une taloche plastique, d'une éponge ou d'une plaque de polystyrène.



| État fini après réparation.

OBSERVATIONS ET CONSEILS

- Il est important de protéger les réparations du vent et du soleil (bâches coupe vent, humidification régulière du support, toile de jute humidifiée posée contre le support, etc.) pour préserver la cure du mortier en minimisant le phénomène de retrait. On évite ainsi une fissuration prématuée de la réparation.
- Lorsque le diagnostic préalable a mis en évidence que les épaisseurs de recouvrement des aciers sont inférieures aux règles de l'art (en moyenne 2,5 cm au minimum), il est nécessaire de procéder à un surfaçage général des zones concernées par l'application de produits spéciaux (imperméabilisant, durcisseur, etc.). Ce traitement évitera de voir apparaître rapidement après les travaux d'autres zones éclatées par la corrosion d'aciers mal enrobés dans le béton et qui ne s'étaient pas encore manifestés.
- Les premiers signes de corrosion des armatures du béton sont souvent annonciateurs d'un problème plus global, concernant l'ensemble de l'ouvrage, et les réparations effectuées ne pourront empêcher l'apparition de zones dégradées contigües. De nouveaux procédés, de nature électrochimique, visent à régénérer l'ensemble d'un ouvrage en arrêtant le processus de corrosion. Il s'agit d'établir une connexion électrique entre les armatures du béton et une électrode fixée en surface du béton. Dans le cas de carbonatation du béton, le traitement va permettre d'alcaliser la façade, donc de la ramener à son état d'origine; dans le cas de contamination par les chlorures, le traitement identique permet d'attirer les ions chlores vers l'extérieur.

Ragréage superficiel

Béton: éclatement, épaufure

Description du procédé

Le traitement consiste à éliminer soigneusement les parties endommagées du béton puis à reconstituer l'élément enlevé par un rapiéçage à l'aide de mortier.



© Weber et Broutin

| État du support avant la passivation des aciers.

Intérêt du procédé

Cette méthode de ragréage permet de traiter les phénomènes d'éclatement du béton. La composition du mortier implique une mise au point préalable importante, ce qui explique que cette méthode ne peut être utilisée que pour des façades présentant des éclatements de manière globale et systématique.

Pour de petites zones ponctuelles, se reporter à la fiche *Réparation ponctuelle (béton)*.

Choix du mortier

Le mortier choisi pour l'exécution des râgragés doit être le plus proche possible du matériau d'origine. Il doit en outre posséder les caractéristiques suivantes :

- sa perméabilité à l'air et à l'eau doit être faible;
- son adhérence au support, surtout s'il est poreux et dégradé, doit être la meilleure possible ;
- son module élastique (coefficients de proportionnalité entre une contrainte appliquée et la déformation induite) doit être faible, ces travaux étant exécutés manuellement avec des mortiers surdosés.

Composition des mortiers pour râgrage superficiel

	POLYMIÈRE THERMO- DURCISSABLE	POLYMIÈRE THERMO- PLASTIQUE	LIANT HYDRAULIQUE TRADITIONNEL	LIANT HYDRAULIQUE SPÉCIAL	POLYMIÈRE THERMO- DURCISSABLE + LHT	POLYMIÈRE THERMO- PLASTIQUE LHT
Épaisseur < 2 cm						
			<i>Couche d'accrochage liants epoxy</i>			<i>Gobetis d'accrochage</i>
Forme d'utilisation	Liants	-	+	-	-	+
	Mortier	+	+	+	+	+
Nature et état du support	Sollicité	+	-	-	-	+
	Non sollicité	+	+	+	+	+
	Sec	+	-	+	+	+
	Humide	+	+	+	+	+
Épaisseur > 2 cm						
			<i>Couche d'accrochage liants epoxy</i>			<i>Gobetis d'accrochage</i>
Forme d'utilisation	Liants	-	-	-	-	+
	Mortier	+	-	+	+	+
Nature et état du support	Béton	+	-	+	+	+
	Sollicité	+	-	-	-	+
	Non sollicité	+	-	+	+	+
	Sec	+	-	+	+	+
	Humide	+	-	+	+	+

LHT : Liants hydrauliques traditionnels

Mise en service à 20 °C après 24 heures

(Source: Guide Véritas: réhabilitation et maintenance, Éditions Le Moniteur)

MODE OPÉRATOIRE

1. Éliminer les parties dégradées et décaper le support afin d'obtenir un béton propre (élimination des poussières, salissures, huiles de décoffrage), sain et débarrassé des parties non adhérentes. S'il y a présence d'acières, dégager les tiges jusqu'à retrouver un béton sain et non fissuré, et des aciers exempts de rouille non adhérente ou pulvérulente.
2. Couper les zones repiquées de façon à obtenir des angles vifs: ils permettront un bon ancrage du mortier. Éviter que les surfaces décapées soient obliques par rapport à la direction des contraintes principales.
3. Mettre en œuvre des couches d'accrochage en prenant soin qu'elles soient de même nature que le liant utilisé pour le mortier de r agréage : on obtient ainsi une meilleure compatibilité entre les matériaux (pour les liants hydrauliques utiliser des badigeons résineux). Appliquer le mortier à la taloche ou à la truelle de façon traditionnelle ; travailler le plus rapidement possible, surtout par température élevée. Exécuter le remplissage en plusieurs fois.
4. Ces réparations peuvent être utilement coffrées et maintenues par serre-joints. Le décoffrage se fera par glissement et non par traction directe pour éviter l'arrachage des zones réparées. Dans certains cas la réparation peut être effectuée sous charge, à l'aide de presses hydrauliques ou de poids, ce qui assure un bon remplissage durant la mise en œuvre.
5. Dès que le mortier commence à tirer, effectuer la finition à l'aide d'une taloche plastique, éponge ou polystyrène.

OBSERVATIONS ET CONSEILS

- Pour préserver la cure du mortier, il est important de protéger la zone traitée du vent et du soleil. On minimise ainsi au maximum le phénomène de retrait, qui provoquerait une fissuration prématurée de la réparation.

Approche de diverses méthodes de traitement de la corrosion des fers à béton

Béton : éclatement, épaufrure

avec le concours de Carl Redon, Directeur technique de la société Renofors

TRAVAIL DE PURGE ET PASSIVATION DES ACIERS PRÉALABLE AU RAGRÉAGE DES BÉTONS

Dans un béton armé, la corrosion d'un acier est un phénomène électrochimique qui implique des circulations de courants de corrosion entre les différents points métalliques des éléments de la structure. Ces notions de corrosion dans le béton sont expliquées dans le document intitulé *Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion**, émis conjointement par l'Association française de génie civil (AFGC) et le Centre français de l'anticorrosion (CEFRACOR). Certains points d'une armature sont qualifiés de cathodiques et d'autres, où les produits de corrosion se développent, sont dits anodiques. Ils peuvent se trouver le long d'une même barre, suivant qu'elle sera localement plus ou moins enrobée dans le béton.

S'il n'y a que quelques éclats sur un parement béton, on se contente de purger le béton jusque derrière les aciers, comme les règles de l'art l'imposent, et on pratique des ragréages très ponctuels. On se reportera à la page 40/107 du document *Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion* dont voici un extrait :

« Pour traiter les armatures corrodées, il convient de les dégager par burinage, repiquage ou bouchardage, jet d'eau ou sablage. Le dégarnissage doit être effectué jusqu'à ce qu'un acier sain apparaisse et la longueur de cet acier doit être dégagée sur toute sa périphérie, selon la norme NF P 95.101 (un dégagement d'un minimum de 2 cm derrière l'armature, est conseillé). »

Les bords des zones purgées sont ensuite découpés ou piochés perpendiculairement au parement. Le béton avoisinant les bords découpés, à l'intérieur des parcelles purgées, est dégagé sur la profondeur de la découpe. Cette pratique permettra par la suite de venir placer une épaisseur de mortier de réparation suffisamment importante en bordure des ragréages pour qu'elle soit solide.

* www.concretecorrosion.net/docs/Rehabilitation-du-beton-arme.pdf

Le fait de découper, ou piocher le béton, perpendiculairement à sa surface permet également de créer une surface de friction entre ancien béton et nouveau mortier, qui s'oppose au déchassement de la réparation. Ne pas procéder ainsi reviendrait à laisser « mourir à zéro » l'épaisseur des réparations sur leur bord. Le manque de matière qui en résulterait conduirait à l'effritement du mortier de réparation sur sa périphérie.

Lors d'une réparation traditionnelle, il est d'usage d'appliquer un produit dit « de passivation » sur l'acier lui-même avant d'appliquer le mortier de râgrage. Bien entendu les aciers corrodés dans des proportions trop importantes doivent être remplacés et le béton ouvert de part et d'autre pour assurer une longueur de recouvrement avec l'acier sain supérieure à 50 diamètres comme le BAEL, ou désormais l'Eurocode 2, le stipulent. Cette manière de travailler est communément appelée la pratique des patchs de râgrage.

CONSÉQUENCES DU PHÉNOMÈNE D'ANODES INDUITES

Mais cette pratique du patch est-elle forcément la plus appropriée dès lors que les éclats sont assez généralisés sur le parement ? Si l'on garde en mémoire que la corrosion est accompagnée par des circulations de courant entre des zones anodiques et cathodiques d'une même armature, comme autant de micro-piles à la chaîne, on peut craindre le phénomène dit d'anode induite (voir schéma page suivante). De quoi s'agit-il ? Lorsqu'une zone initialement anodique, où les produits de corrosion (par exemple de la rouille en feuillets) auront fait éclater le béton, est purgée puis réparée avec un mortier neuf, son pH redevient naturellement très élevé, avec une forte basicité ($\text{pH} > 13$). L'acier s'y trouve alors passivé et passe dans un état cathodique. Par différence, les bétons relativement sains avoisinant la réparation, mais dont le pH aura naturellement baissé au cours du temps, deviennent moins cathodiques que la zone réparée. Ils prennent par différence un caractère anodique, où la rouille va pouvoir se développer à quelques centimètres de la zone réparée.

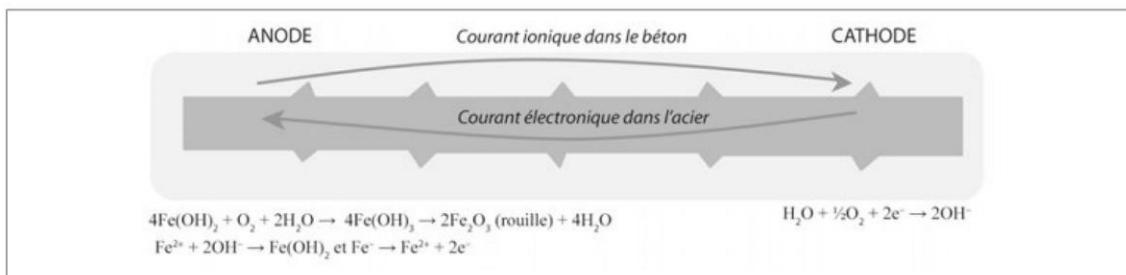
Il est alors fréquent que, moins de dix ans après les réparations, des éclats se produisent autour de la zone réparée. Cet effet d'anode induite sera d'autant plus probable que les aciers auront été faiblement enrobés par le béton originel dont le pH aurait chuté à des valeurs inférieures à 10, et/ou que le béton aurait été pollué par des ions chlorures.

ORIGINES LES PLUS FRÉQUENTES DE LA CORROSION DES ARMATURES DU BÉTON

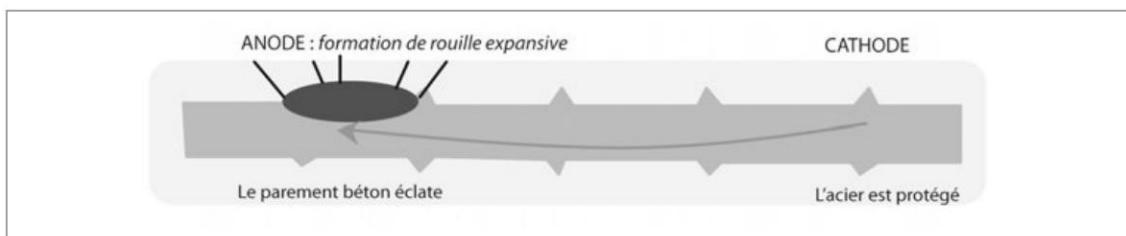
La corrosion des armatures du béton a deux origines majeures :

- le phénomène de carbonatation du béton ;
- la présence d'ions chlorures (apportés par l'air marin, les sels de dé verglaçage, ou par l'usage d'un accélérateur de prise chloré lors du coulage du béton).

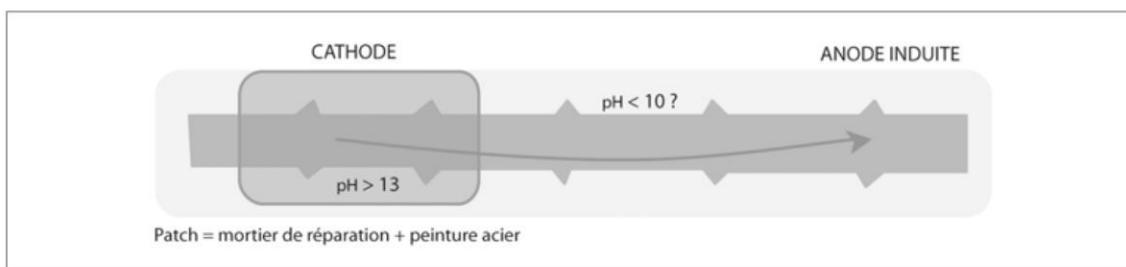
Principe de formation des anodes induites autour des patchs de réparation traditionnels



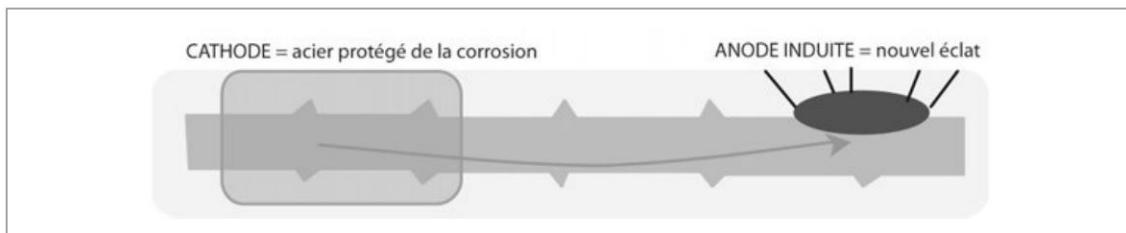
| *Étape d'initiation.*



| *La rouille fait éclater le béton.*



| *Mise en œuvre du mortier de réparation.*



| *En moins de 10 ans, les anodes induites font éclater le béton autour du patch.*

Carbonatation

Une baisse de pH du béton est souvent observée au cours du temps. Elle résulte principalement de l'action du gaz carbonique de l'air (phénomène de carbonatation) qui se dissout dans l'eau contenue dans le béton. À terme, cette réaction consomme les groupements OH⁻ (groupements KOH et NaOH présents dans l'eau des capillaires, puis la portlandite Ca(OH)₂), responsables des valeurs de pH élevées au jeune âge du béton.

D'un béton au jeune âge qui a un pH de l'ordre de 13, on passe à un béton dit « carbonaté » lorsque son pH devient inférieur à 9-9,5, donc de basicité bien inférieure. Le phénomène de carbonatation est fréquent sous nos latitudes (il faut en effet que le béton soit dans un état de saturation partielle en eau pour que la carbonatation ait lieu, ce qui est le cas sous des climats tempérés avec plus de 60 % HR) et ses conséquences sont d'autant plus dramatiques sur la quantité de rouille expansive formée que les aciers sont peu profonds.

Si l'acier est atteint par le front de pénétration de la carbonatation (ligne en deçà de laquelle le pH est inférieur à 9-9,5), il n'est plus protégé de la corrosion par une basicité suffisante du béton (cf. diagrammes d'électrochimie de Pourbaix) et la corrosion de l'acier peut se développer. Des rouilles feuilletées à forte expansion volumique se forment, créent au cœur du béton une pression qui excède sa résistance à la traction interne et le font éclater.

Pour les aciers qui sont en zone carbonatée, mais où la rouille n'est pas encore assez développée, il serait opportun de traiter le béton préventivement pour empêcher la formation de nouvelle rouille.

Pollution par les ions chlorures

Les ions chlorures ont un encombrement stérique faible, ils sont donc très labiles dans un milieu capillaire toujours riche en eau, comme les bétons sous nos climats tempérés, et peuvent facilement pénétrer en profondeur.

Ce type de pollution ne peut jamais être écarté *a priori*, sans qu'on ait pris la précaution de le vérifier, en faisant un profil de teneur en chlorures libres et totaux, depuis le parement jusqu'à l'arrière des aciers. On parle de chlorures libres, car « en solution » dans l'eau du réseau capillaire du béton, et de chlorures liés, car chimiquement inclus dans le réseau cristallin de certains hydrates du ciment, comme par exemple les chloroaluminates. Cependant, rien n'indique qu'en cas d'appauvrissement de la teneur en chlorures libres dans le réseau capillaire, des chlorures liés ne puissent pas à leur tour passer en solution par un simple phénomène de rééquilibrage des concentrations.

La corrosion par les chlorures est bien connue et génère des produits de type FeCl₂. Ces produits de corrosion sont moins expansifs que ceux résultant d'une corrosion induite par la carbonatation. On parle de corrosion par piqûre de l'acier et/ou par dissolution de l'acier et transport des produits de corrosion dans le réseau capillaire voisin des aciers. On observe alors des colorations rougeâtres irisées, parfois

noires et vertes, des bétons autour de l'acier originel. On peut même ne détecter aucun éclat mais, en sondant le béton par découpe, observer des espaces vacants en lieu et place des armatures originelles.

Corrosion en deux temps induite par des phénomènes de fissuration

Trois phénomènes ont pour conséquence la formation de fissures plus ou moins ouvertes, allant de 1/10 à 1 mm de large, qui sont autant de chemins préférentiels vers les armatures, tant pour le CO₂ que pour les chlorures :

- la présence excessive de sulfates dans un béton, pouvant générer des réactions expansives en présence des aluminaux du ciment ;
- les phénomènes de retrait thermique, de retrait plastique au jeune âge et de retrait de dessiccation du parement par absence d'une cure contrôlée lors de la prise du béton ;
- les problèmes de retrait géné ou différentiel entre pièces de sections très différentes.

La fissuration constitue un facteur d'accélération des mécanismes de carbonation et de pollution par les chlorures.

DIAGNOSTIC DE LA PATHOLOGIE DE CORROSION DES ARMATURES

Lorsqu'on observe un nombre d'éclats important sur une façade, où nombre d'aciers sont sous-enrobés, il faut comprendre quelle est l'origine de la corrosion des armatures pour choisir le traitement le plus adapté pour l'endiguer. Le raisonnement est le même lors de la détection d'une maladie dont on doit connaître l'origine pour prescrire le bon remède. Ceci requiert un minimum de diagnostic.

Toutefois, comme dans le cas des patchs de ragréage que l'on pratiquerait si le béton présentait peu d'éclats, et quelle que soit la méthode de réparation envisagée, il faudra toujours purger les éclats avec autant d'application, surtout s'ils sont nombreux. Et de même, la purge du béton jusque derrière les aciers reste un préalable indispensable et incontournable (bien que très consommateur de temps) à la bonne accroche des mortiers de réparation qu'il faudra de toute manière mettre en œuvre à la place des épaufrures, à l'issue du traitement de la corrosion des armatures.

On explique ci-après l'utilité de conduire divers types d'analyses, d'en comprendre l'intérêt technique et de budgérer leur coût.

1. Établir des zones de cartographie des potentiels de corrosion (surtout utile en présence de chlorures – bord de mer, etc.) pour évaluer l'activité corrosive dans l'ouvrage sur des surfaces de l'ordre de 2 m² chacune au minimum (en précisant bien les conditions climatiques dans lesquelles les mesures sont faites).
2. Déetecter les armatures et leurs profondeurs d'enrobage (à l'aide d'un pachomètre, ferroscan ou radar) pour vérifier si les armatures sont en avant ou en arrière de la zone du béton carbonaté ou de la zone polluée par les chlorures.

3. Prélever des carottes pour analyses chimiques :

- mesurer la profondeur de carbonatation ;
- mesurer les teneurs en chlorures totaux et chlorures libres rapportées au poids de ciment (ceci implique une analyse de la nature du liant et de la teneur en ciment par mètre cube de béton – méthodes GranDuBé, titrage de la silice soluble, etc.) en établissant un profil de la teneur en Cl⁻ suivant la profondeur, depuis le parement jusqu'à 2 cm derrière l'acier le plus profond. Ceci doit permettre de savoir si la pollution par les chlorures doit être traitée (implique de vérifier si les chlorures sont supérieurs ou inférieurs à 0,4 % du poids de ciment pour un béton armé NF EN 206-1 – le critère serait différent pour un béton précontraint) ;
- étudier la minéralogie des granulats (sables, graviers) pour vérifier des risques potentiels d'alcali-réaction que certains traitements de la corrosion pourraient induire sur les granulats du béton (**pétrographie en lame mince – se rapporter aux spécifications du fascicule FD P18-542, critère de teneur en granulats potentiellement réactifs < 4 % des granulats**) ;
- compter éventuellement la présence de sites existants d'alcali-réaction par la méthode dite DARAG, pour confirmer si certains produits de traitement sont à proscrire ;
- déterminer la teneur en alcalins libérables (< 3 kg/m³ béton – fascicule *Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction* du LCPC, juin 1994) dans le cas où il serait envisagé de traiter la corrosion par apport de produits alcalins supplémentaires, susceptibles de générer une alcali-réaction différée ;
- mesurer la teneur en sulfates rapportée au poids de ciment pour :
 - comprendre si la seule pathologie de fissuration résulte de la corrosion des aciers ou si (observation couplée au microscope à balayage) on a des cristaux expansifs de type ettringite qui expliquent que les gonflements et fissurations sont dus à un excès de sulfates dans le béton (il faudra alors chercher si les sulfates viennent de l'eau de mer, du sol gypseux, etc.),
 - établir les profils en sulfates (lorsqu'il n'y a pas de gonflement) depuis le parement jusqu'à l'arrière des aciers (prélèvements en surface, 5 mm sous la surface, puis tous les centimètres), étude utile dans le cas du traitement de la corrosion par certains inhibiteurs qui risquent de réagir avec les sulfates pour former des efflorescences ou des cristaux expansifs tels que la thénardite ou la mirabilite ;
- évaluer la porosité/capillarité par des mesures directes de remontée capillaire ou de porosité AFREM, ou par des mesures indirectes de résistance à la compression ou encore par des mesures au scléromètre, afin d'évaluer la probabilité d'avoir une substance chimique qui migre plus ou moins profondément dans le béton.

Le nombre de prélèvements (carottages, etc.) dépend de la taille de l'ouvrage, des expositions diverses aux éléments climatiques, aux remontées capillaires, aux problèmes d'étanchéité ou de ruissellement. Il sera limité en étudiant la répétitivité des structures et de leurs expositions susmentionnées.

Il est recommandé que les prélèvements et analyses soient réalisés par un laboratoire compétent en matière de pathologie des bétons. Il est par ailleurs souhaitable que le laboratoire d'analyse travaille avec la maîtrise d'œuvre pour déterminer l'emplacement et le nombre de prélèvements à effectuer.

De la même manière, le diagnostic ne saurait être interprété par le seul laboratoire d'analyse, mais on peut bien entendu consulter son expertise en la matière. Analyse (application de protocoles d'essai normés en laboratoire) et diagnostic (travail de synthèse des observations et des résultats d'analyse) sont deux compétences complémentaires mais distinctes.

DIVERS TRAITEMENTS DE LA CORROSION SUR DE GRANDES SURFACES (NON PONCTUELS)

Traitements chimiques par inhibiteurs de corrosion

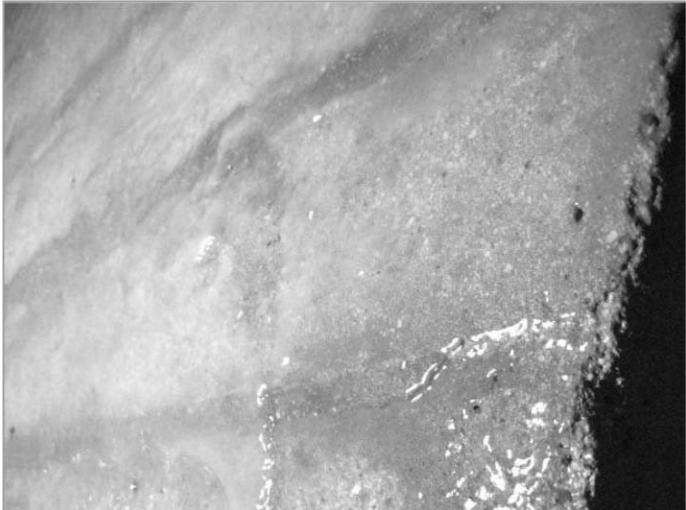
Les inhibiteurs de corrosion sont des produits en solution (le plus souvent aqueuse), appliqués en surface du parement. Ils migrent dans le béton principalement par absorption capillaire. Ils réagissent à la surface de l'acier pour stabiliser la couche d'oxyde et limiter la formation de nouveaux oxydes (rouilles expansives, etc.).

Les inhibiteurs dont le mécanisme est le mieux connu à ce jour sont sur des bases phosphates (le plus célèbre étant le MFP, ou monofluorophosphate de sodium). Un protocole d'essai, établi par les chercheurs du laboratoire central des Ponts et Chaussées, permet de quantifier leur profondeur de pénétration et leur teneur (protocole LPC n° 60). Il est primordial de quantifier cette pénétration par des tests de laboratoire, à partir des carottes prélevées sur l'ouvrage, pour s'assurer de l'efficacité du traitement.

Il semble que la pénétration de ces inhibiteurs puisse être améliorée par une application en voie gel sur la surface pour prolonger les durées d'absorption capillaire. Pour que ce traitement soit efficace, il convient au préalable de rendre accessible la porosité de surface du béton, soit par hydro-sablage (élimination des peintures, etc.) soit par nettoyage haute pression à l'eau chaude (dans le cas d'un béton sale non revêtu). Le choix de l'une ou l'autre méthode se fait à l'issue d'essais dits de convenance, en s'inspirant des recommandations publiées dans le fascicule intitulé *Le nettoyage des bétons anciens – Guide des techniques et aide à la décision*, émis par le Cercle des partenaires du patrimoine et le LRMH (Laboratoire de recherche des monuments historiques).

Le traitement s'effectue par pulvérisation de l'inhibiteur de corrosion sur la totalité de la surface du béton, une fois que les épaufures ont été enlevées et avant rebouchage des aciers mis à nu par un mortier de ragréage.

© travaux Renofors



*Inhibiteur de corrosion en voie gel
(Halles du Boulingrin Reims).*

D'une manière très imagée, on pourrait dire que l'inhibiteur de corrosion, agit à la manière d'une peinture de passivation sur les aciers mis à nu, mais en se substituant à ce type de peinture. De plus, l'inhibiteur de corrosion pénètre également les zones de béton non purgées et forme un film d'oxydes stables, base phosphates, qui protège l'acier de la corrosion.

Le fait que le traitement par l'inhibiteur de corrosion affecte autant les zones purgées que les zones non purgées permet de protéger les aciers en tout point de la structure. Ceci évite les effets de propagation de la corrosion autour des zones purgées, phénomène dit d'anode induite, que l'on observe couramment lorsqu'on se contente de traiter les aciers à l'aide d'un produit de passivation au seul endroit des réparations (voir p. 61).

En présence de taux de chlorures importants, il est délicat d'assurer que le traitement par inhibiteur soit suffisant. La pénétration de l'inhibiteur étant contrôlé par un mécanisme d'absorption capillaire, ce type de traitement est plus adapté à des bétons de porosité moyenne à élevée, là où les aciers sont relativement proches du parement.

Famille des traitements électrochimiques

Les traitements électrochimiques combinent apport et extraction de substances chimiques, sous l'action de la circulation de courants continus entre les armatures (cathodes = pôle négatif) et des anodes (= pôle positif) appliquées temporairement ou définitivement sur et/ou dans le béton.

Réalcalinisation

La réalcalinisation est un traitement efficace pour ré-augmenter le pH d'un béton à des valeurs supérieures à 10. C'est donc une méthode adaptée à un béton carbonaté. Les courants de traitement sont de l'ordre de 0,5 à 1 A/m² d'acier (surface à peindre des aciers) et appliqués pendant une quinzaine de jours (à adapter suivant le béton, son humidité, et les résultats des autocontrôles).

© travaux Renofores

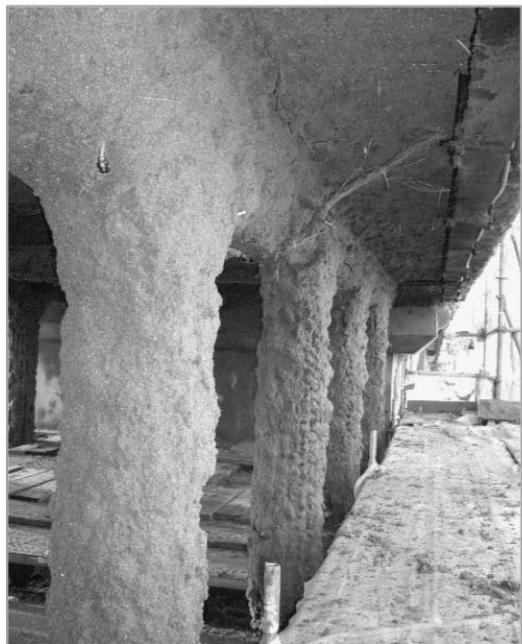


Illustration d'un traitement de réalcalinisation (Pont de Châtellerault).

© travaux Renofores



© travaux Renofores



On vérifie l'efficacité de la réalcalinisation à l'aide d'un test à la phénolphthaléine, qui est un indicateur pH coloré. On doit obtenir une zone annulaire violette de 1 cm de large (ou plus large que le diamètre de l'acier) autour de l'armature, pour assurer que le niveau de pH est assez basique pour endiguer la corrosion. Le texte de référence est la FD CEN/TS 14 038-1.

Le traitement consiste à appliquer une anode en acier sur le parement, dans un milieu électrolytique enrichi en alcalins (gel, pâte de cellulose, etc.) assurant le contact anode/béton. Sous l'effet du champ électrique, les alcalins migrent dans le béton vers les aciers (= la cathode). Au niveau de la cathode, il y a génération d'ions OH⁻ (base forte) par électrolyse. Ces deux réactions rehaussent le pH du béton autour des zones où circule le courant, donc autour des armatures. Au terme du traitement, le treillis anodique (acier) et l'électrolyte sont déposés sans que le parement ait été altéré.

Toutefois ce traitement peut générer des réactions alcali-granulat expansives si la minéralogie des granulats en question est sensible aux alcalins.

Déchloruration

La déchloruration est le corollaire de la réalcalinisation en ce sens que le système d'anode est identique (à l'exception de la nature du métal d'anode, ici le titane) et que les branchements anode/cathode et les intensités de courant sont les mêmes. Dans ce traitement, les ions chlorures (Cl⁻) sont captés par le pôle positif de l'anode et piégés dans le milieu électrolytique qui est ensuite déposé. La durée de traitement sous courant imposé avoisine 1 mois, voire plus suivant le degré de pollution.

© travaux Renofors

*Traitement de déchloruration
(Sculpture Le Signal, Le Havre).*

© travaux Renofors



Ce traitement engendre aussi une électrolyse autour des armatures du béton, mais n'apporte pas d'alcalins extérieurs, à la différence de la réalcalinisation. La génération d'ions OH⁻ rend ce traitement délicat à appliquer en présence de granulats alcali-réactifs, mais dans une moindre mesure que la réalcalinisation, précisément à cause de l'absence d'apport d'alcalins extérieurs. Le texte de référence est la FD CEN/TS 14 038-2.

Protection cathodique à courant imposé

De la même manière que la réalcalinisation ou la déchloruration, la protection cathodique à courant imposé associe cathode (les armatures) et anodes (grillage titane MMO « mixed metal oxyde coating » de surface noyée dans un enduit ou rubans de surface à base de titane MMO ou réseau d'anodes en titane MMO scellées dans des petits forages pratiqués de manière rapprochée dans le béton et reliées en chaînes par un fil conducteur).

Cependant les anodes sont installées à vie sur l'ouvrage. Ceci rend leur implantation délicate dans des ouvrages patrimoniaux à caractère historique, à moins qu'un enduit architectonique ne puisse les dissimuler. Les intensités de traitement sont bien plus faibles, de l'ordre de 1 à 10 mA/m² d'acier. Les durées de vie des anodes sont très longues (plus de 60 ans).

Le principe de ces systèmes, dont on contrôle bien les distributions de courant, est d'abaisser le potentiel de corrosion de l'acier en dessous de son potentiel de corrosion naturel pour que l'acier se trouve en zone dite « d'immunité », comme les dia-

© travaux Renofors



© travaux Renofors

Protection cathodique à courant imposé : câblage d'anodes Ti MMO discrètes et boîtier de contrôle, système CPI Danemark (Halles du Boulingrin, Reims).

grammes électrochimiques de Pourbaix le démontrent. À ces niveaux de potentiel en surface de l'acier, la corrosion est impossible. Plus simplement, la surface de l'acier est chargée négativement pour compenser la perte d'électrons liée à la corrosion (on parle de compensation d'une dissolution de l'acier).

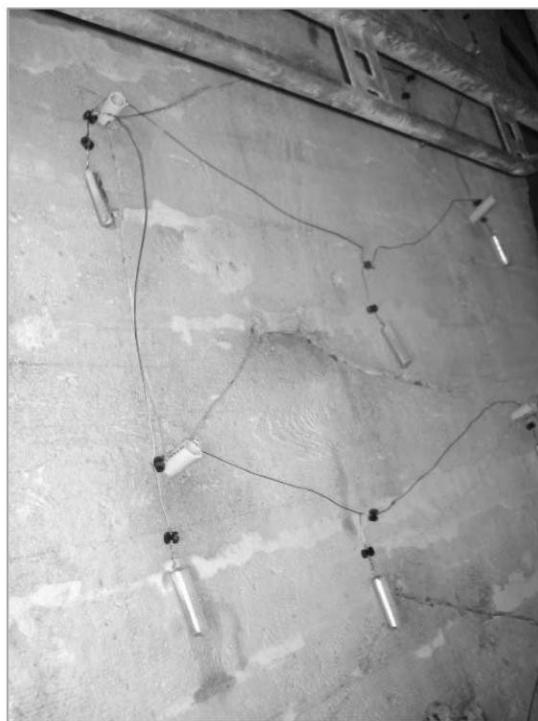
Excepté les inconvénients architectoniques mentionnés précédemment, ces traitements sont particulièrement adaptés aux bétons aériens en milieu chloruré ou aux bétons carbonatés en milieu humide. Le texte de référence est la NF EN 12 696.

Protection galvanique

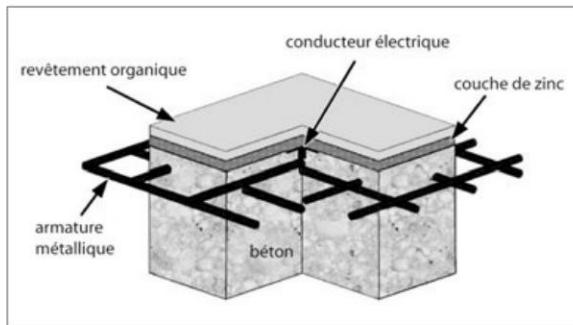
La protection galvanique est une technique prometteuse qui ne bénéficie cependant pas d'un retour d'expérience aussi long que les techniques décrites précédemment. Elle fonctionne sur le principe d'un métal, souvent l'aluminium, qui se sacrifie (corrode) en lieu et place des armatures. Le zinc (en anodes treillis, en anodes dans des forages ou directement projeté) est directement relié à l'acier par un conducteur métallique et se consomme par différence de potentiel électrochimique lorsque le béton est humide. De fait un béton sec n'offre pas une quantité d'électrolyte (l'eau) suffisante pour que la corrosion (activité chimique, mais aussi électrique) s'y développe. On parle de courants de l'ordre du milliampère par mètre carré d'acier, qui sont difficilement mesurables.

À la différence de la protection cathodique par courant imposé, de la déchloruration ou de la réalcalinisation, il n'y a pas d'apport de courant par un générateur extérieur. Cela rend le procédé difficilement pilotable, ce qui n'apporte pas pour autant de preuve scientifique suffisante pour certifier qu'il ne fonctionnerait pas, si d'aventure on ne parvenait pas à mesurer de courants en période sèche.

© travaux Renofors



| Anodes zinc discrètes lors de leur installation (Système CPT, Angleterre).



| Technique du zinc projeté (Système Grillo KKS, Allemagne).

© Grillo KKS

Les textes de référence à rapprocher des systèmes galvaniques sont la NF EN 12 696 et le guide du CEFRACOR *Anodes galvaniques pour le traitement de la corrosion des armatures des constructions en béton*, publié en 2012.

COMMENTAIRE D'ORDRE GÉNÉRAL SUR LE CHOIX DES MORTIERS DE RÉPARATION

Pour conclure il est donc essentiel de garder en mémoire que « corrosion des aciers » signifie « circulation de courants », avec des niveaux de potentiel souvent négatifs et de l'ordre de quelques centaines de millivolts.

Que penser alors de l'usage des liants hydrauliques modifiés contenant force résines et des barbotines d'accrochage au latex, qui constituent autant de barrières à la circulation de ces courants et par là même gênent l'homogénéisation des potentiels de corrosion dans une structure ? Car c'est bien cela que visent toutes ces méthodes de traitement, qu'elles soient chimiques ou électrochimiques : obtenir des cartographies de potentiels qui soient les plus « plates » possibles. Limiter les DDP (différences de potentiel), c'est réduire les courants de corrosion.

Pour ces raisons, si l'on veut éviter d'engendrer des anodes induites quand on répare un béton, on devra faire le choix d'un mortier de résistivité la plus voisine possible de celle du support ou, à tout le moins, préférer un liant purement hydraulique.

Substitution de pierre identique

Brique : alvéolisation, désagrégation sableuse, dissolution, desquamation, éclatement • **Pierre :** alvéolisation, nitrification, dissolution, désagrégation saccharoïde, désagrégation sableuse, délitage, desquamation, dissolution

Description du procédé

Ce traitement consiste à remplacer des éléments en pierre de taille par des éléments neufs de substitution lorsque les éléments anciens de pierre sont trop dégradés, fracturés ou endommagés pour être réparés. Cette méthode de substitution peut être réalisée par le dessus, dans le cadre de tête de mur ou de contreforts par exemple, ou par incrustement d'éléments contigus ou isolés. Ce dernier processus est également appelé « pose en tiroir ».



© SMBR

Pierre de linteau neuve positionnée, en attente des éléments supérieurs.

Intérêt du procédé

Le remplacement de la pierre altérée par une pierre saine s'impose lorsque les blocs de pierre sont en état de désagrégation très avancée. En effet, dans ce cas, la

consolidation (voir fiche *Substitution de pierre artificielle*) constitue rarement une solution durable.

Choix de la pierre

Il est indispensable de déterminer la nature des pierres des parties à restaurer et d'en trouver la provenance car les pierres choisies doivent être identiques ou compatibles avec celles d'origine. Une différence de porosité importante, par exemple, perturbera l'équilibre de l'ouvrage et accélérera l'altération des pierres. Il faut donc être attentif :

- à la couleur et à l'aspect ;
- aux caractéristiques mécaniques (résistances à la compression et à la flexion) ;
- à la masse volumique, à la densité, au coefficient de dilatation thermique et au module élastique.

MODE OPÉRATOIRE

Relevés et calepinage

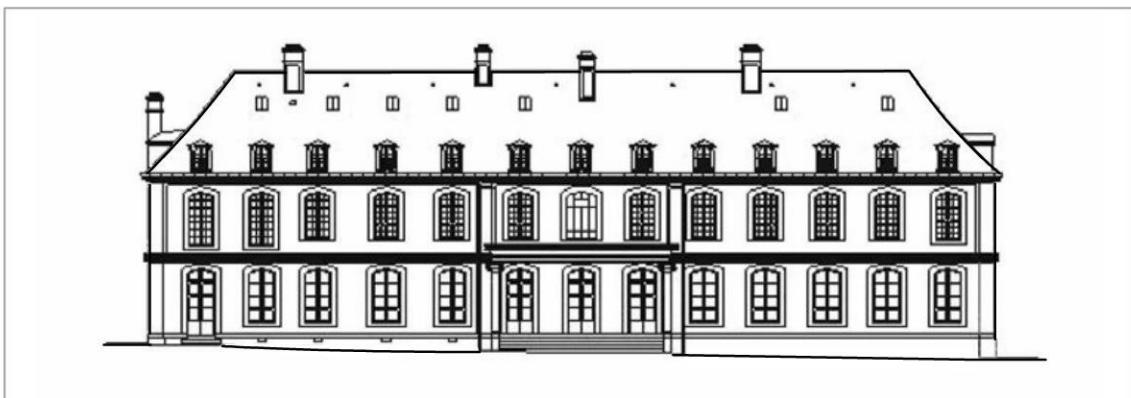
Préalablement à tous travaux, on réalise un état sanitaire des zones traitées et un calepin des pierres devant être remplacées.

Pour cela, il est possible de se servir de la photographie redressée des façades, qui permet de réaliser sur photo des attachements et des états sanitaires précis à forte résolution, ainsi que des relevés manuels au mètre à reporter sur plans (mais cela n'est possible qu'une fois les échafaudages en place). Pour cela, on utilise la photogrammétrie, une technique qui permet d'exécuter des mesures spatiales à partir de photos ou d'images numériques.

À l'issu de cette tâche de relevés, les fiches récapitulatives de chaque pierre neuve devant être fournie (longueur × largeur × hauteur), appelées « débits », sont lancées en carrière pour obtenir les « blocs capables » (blocs sciés à 6 faces, recevant la taille des pierres), devant être posés par la suite.

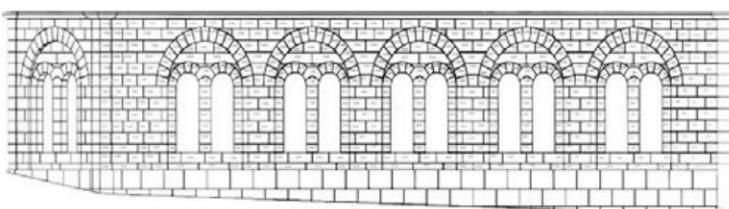
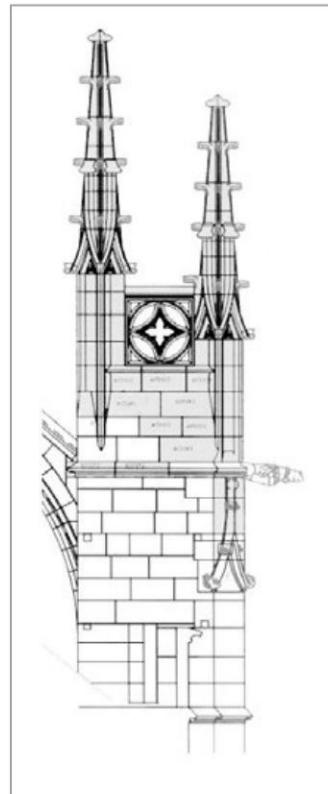
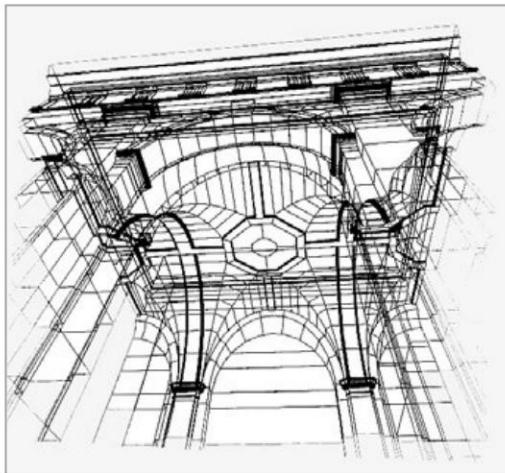
Appareillage

Afin de réaliser un travail précis et organisé, la plupart des entreprises qualifiées pour le travail de la pierre possèdent leur propre poste d'appareilleur. Celui-ci est chargé de la réalisation des épures à l'échelle 1 pour la réalisation des panneaux servant à la taille des pierres, d'après les plans (calepin d'appareil). Il façonne les panneaux et gabarits utilisés pour le tracé direct sur les blocs de pierre à tailler (sorte de gros papier calque). Il peut également préparer les commandes de blocs capables.



| Exemple de relevé de façade.

L'ensemble des plans calepinés, ainsi que les feuilles de débits qui leur sont associées, permet un suivi précis des pierres, du point de vue de leurs dimensions et de leurs quantités.



| Exemples de réalisation DAO/CAO.

Dépose en conservation/en démolition

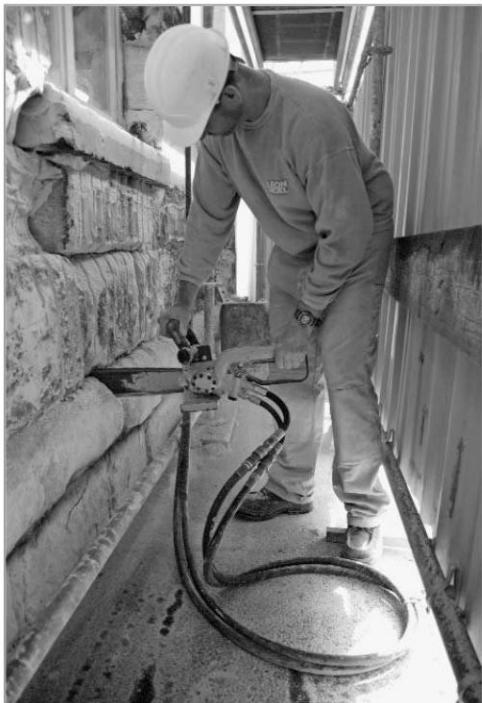
Il faut considérer que la conservation des existants est l'une des tâches les plus importantes et les plus difficiles, car ces éléments sont des traces du passé. Cette étape doit être réalisée avec le plus grand soin dans le but de favoriser leur réutilisation après un nettoyage. Pour cela, on s'appuie sur le savoir-faire des ouvriers qualifiés.

En ce qui concerne les pierres à déposer en démolition, il faut veiller particulièrement à protéger les ouvrages existants proches des pierres à remplacer, et à bien évacuer les gravats.

La dépose de pierres s'effectue selon les étapes suivantes :

- dépose manuelle des pierres les plus endommagées ;
- dépose mécanique des pierres les moins endommagées, à l'aide d'une tronçonneuse à chaîne diamant, ne provoquant aucune secousse ni vibration et permettant une sortie dite « en tiroir » des éléments, sans endommager les pierres périphériques conservées ;
- nettoyage et décrottage des lits et des joints ;
- protection des pierres ;
- stockage des pierres en conservation ;
- mise en place d'étais sur les parties conservées.

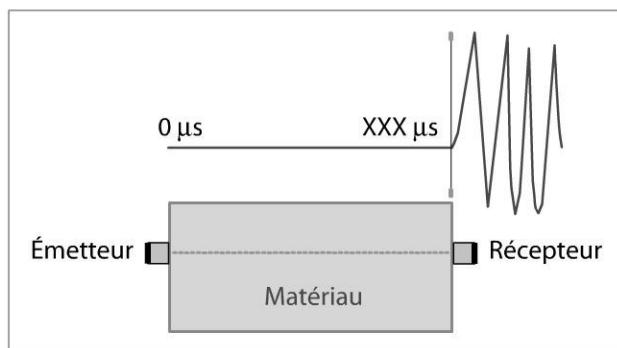
Les gravats sont enlevés au fur et à mesure de l'opération de refouillement.



Taille des parements

À réception, les blocs de pierre peuvent être contrôlés avec du matériel à l'ultrason type I (comme Controlab présenté ci-contre), afin de déceler d'éventuelles fissures invisibles à l'œil nu, des « poils » ou « fils », et de garantir la qualité de la pierre neuve fournie. On peut également « faire sonner » les blocs, à l'aide d'une petite masse par exemple, comme le pratiquent tous les tailleurs de pierre.

Un appareil à ultrasons peut aussi être employé de manière sporadique pour suivre l'évolution des pierres dans le temps. Son principe est simple : il émet des ondes ultrasoniques et mesure le temps de transit de celles-ci à travers la matière (voir figure ci-dessous).

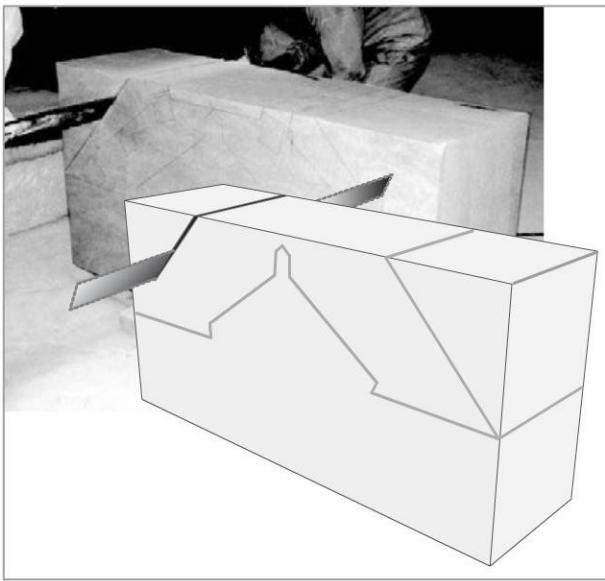


L'émetteur, posé sur une des faces de la pierre à tester, produit une impulsion. Après avoir franchi l'épaisseur de la pierre, cette impulsion est convertie en signal électrique par le récepteur, ce qui permet de mesurer le temps de propagation de l'onde, et ainsi d'en déduire sa vitesse de propagation à travers la pierre.

La taille des parements s'effectue ensuite de manière traditionnelle :

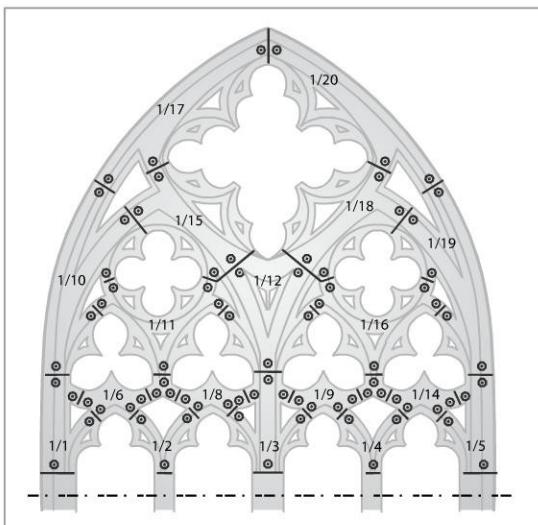
- taille d'approche mécanisée ;
- taille manuelle des parements à l'outil de tailleur de pierre.



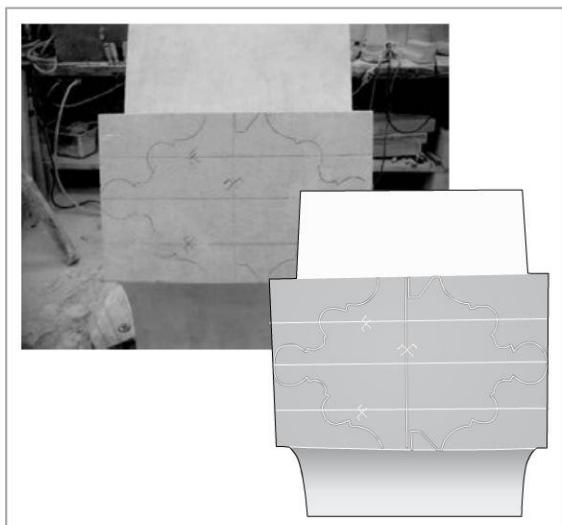


Les pierres ainsi formatées sont traitées selon l'importance de la taille de parement à effectuer et envoyées sur le site vers la loge de taille du chantier.
Après la pose des éléments neufs, il faut prévoir une finition de vieillissement des parements neufs pour une parfaite harmonisation avec les parements anciens conservés sur site.

Exemple : taille du réseau de fenestrage de la cathédrale d'Auxerre



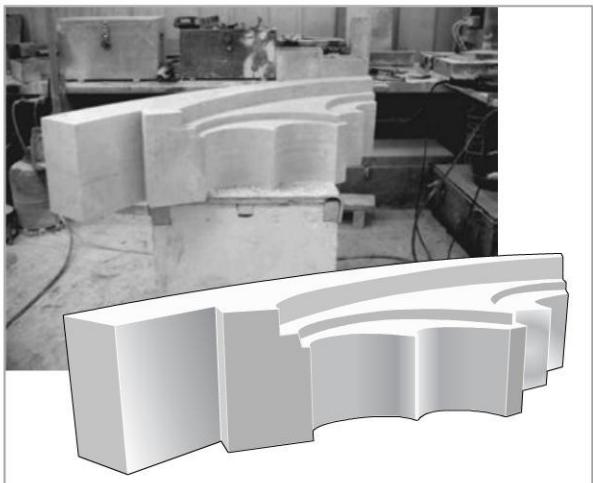
| Épure du réseau.



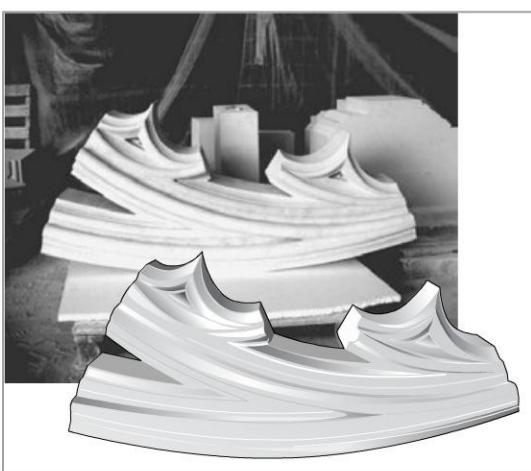
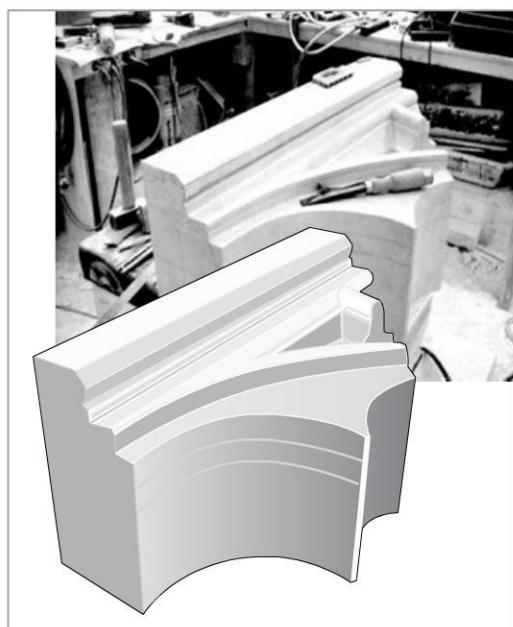
| Tracé du profil de moulure.



| *Taille des premiers parements.*



| *Épannelage.*



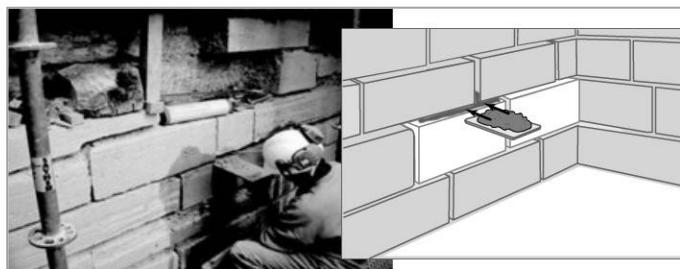
| *Élément terminé.*

Pose de la pierre

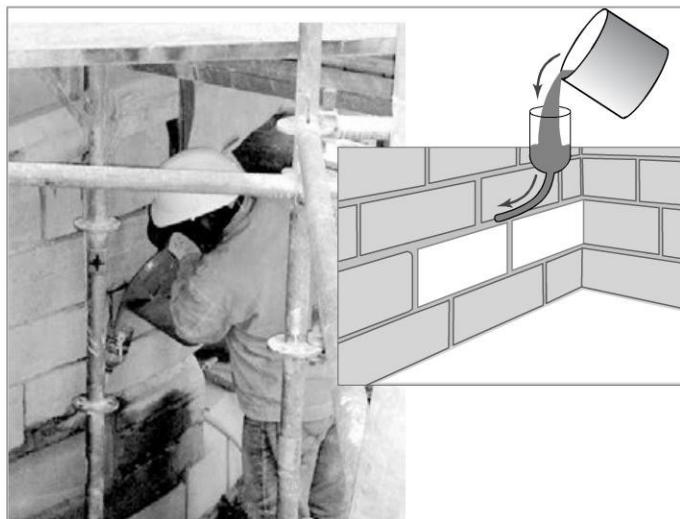
1. Levage et montage des pierres par la sapine de montage.
2. Ceinturage des éléments à poser à l'aide de sangles. Il est impératif de bien prendre toutes les précautions nécessaires afin d'éviter de casser les arêtes ou moulures.
3. Mise en place par incrustement des éléments sur cales, à leur emplacement au plus près des originaux.



4. Fichage et jointement des pierres au mortier de chaux.



5. Coulage à l'arrière de la pierre au moyen d'un coulis de mortier de chaux hydraulique naturelle et charge granulaire fine.

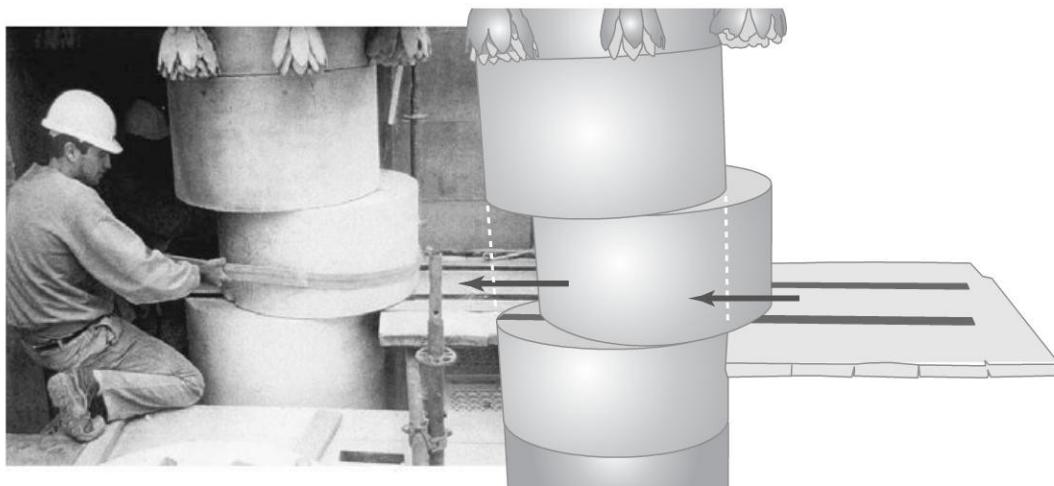


Remplacement de pierres lourdes

Suivant les cas, l'approche pour le remplacement des pierres lourdes est différente. Le remplacement de pierres en tiroir sur les bases des pinacles, les plates-bandes ou tout autre lieu nécessitant une pose en incrustement, suit une méthodologie particulière.

On procède aux aménagements suivants :

- adaptation de l'échafaudage pour créer des trémies et un platelage de roulement ;
- mise en place d'un platelage de recette en ossature métallique ;
- fixation du platelage sur l'ossature de l'étalement ou sur les renforts d'échafaudage ;
- création d'un platelage de roulement de la recette au lieu de pose ;
- glissement des pierres sur le platelage à l'aide de plaques Téflon ou de galets de roulement.



OBSERVATIONS ET CONSEILS

- Éviter l'application en plein soleil, sous la pluie ou sur support gelé (pierres froides), en cours de dégel ou avec risque de gel : les joints frais autour des pierres nouvellement posées pourraient être endommagés.
- Respecter le calepinage d'origine des pierres de taille.
- Pour positionner une pierre dans un mur, il est important de connaître le sens du lit de cette pierre (le lit de la pierre est son plan de stratification). Les lits sont particulièrement visibles pour les calcaires marins car la trace du dépôt des coquillages et des petits fossiles en indique le sens.

- Il est important de respecter les joints d'appareillage des pierres de taille. La rénovation des joints en plâtre et en chaux fait l'objet d'une fiche spéciale de réparation (voir fiche *Restauration des joints rigides (pierres de taille)*).
- Si le diagnostic préalable de la façade a montré que la qualité des pierres utilisées était insuffisante, il convient de choisir des pierres de couleur et de textures similaires mais dont les caractéristiques mécaniques et de durabilité sont meilleures.
- Dans certains cas de substitution, la présence de pierre neuve se distingue trop des pierres environnantes, et l'on applique en surface un traitement de coloration, ou « patine », pour donner un aspect commun à l'ensemble du parement. Une pierre est patinée avec des fonds de chéneaux, des terres, des ombres naturelles, des cendres de bois calcinées, voire de la bouse de vache ou de l'herbe : chaque professionnel a sa propre recette. Il est recommandé de proscrire toute patine avec des peintures à l'huile ou des acides, qui rendrait la pierre imperméable et empêcherait la formation du calcin. En règle générale, la patine est obtenue à partir d'un lait de chaux (1 volume de chaux pour 20 volumes d'eau) auquel sont ajoutés des pigments de coloration.

Substitution de pierre artificielle

Brique: alvéolisation, désagrégation sableuse, dissolution, éclatement, desquamation • **Pierre:** alvéolisation, nitrification, dissolution, désagrégation saccharoïde, désagrégation sableuse, desquamation, pulvérulences

Description du procédé

La substitution par pierre artificielle consiste à éliminer soigneusement les parties endommagées puis à reconstituer l'élément enlevé par un rapiéçage à l'aide de mortier. Pour qu'il n'y ait pas de contraste avec le reste de la façade, le mortier est souvent associé à des poudres de pierre. Le même principe peut être appliqué pour un mur de brique.

Intérêt du procédé

Ce procédé sert à traiter les pierres dont le degré d'altération n'implique que des reprises superficielles (jusqu'à 5 cm d'épaisseur) et ponctuelles. La consolidation et le « rapiéçage » des pierres anciennes permettent de préserver le plus possible les éléments originaux d'une façade et de minimiser les interventions plus brutales telles que les changements de blocs de pierre complets (voir fiche *Substitution de pierre identique*).



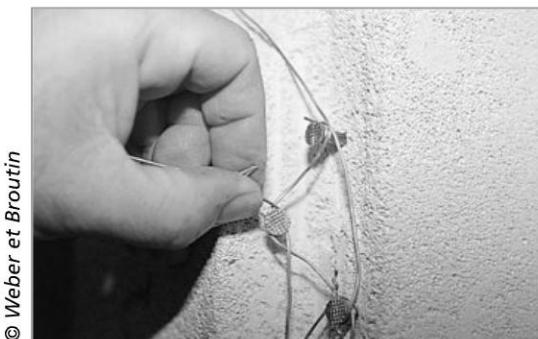
Baie restaurée.

Choix du mortier

Le mortier est le plus souvent fait à base de chaux, chargée ou non en ciment. Il doit être adapté à la couleur de la pierre (il est souvent possible d'ajuster la couleur en ajoutant des pigments minéraux), à sa granulométrie, sa dureté et sa porosité. Son coefficient de dilatation thermique doit être équivalent à celui de la pierre support. La composition de ce mortier est donc extrêmement délicate ; elle constitue le savoir-faire de quelques entreprises qualifiées dans la restauration des bâtis anciens et des monuments historiques.

MODE OPÉATOIRE

1. Éliminer les parties dégradées et décaper le support afin d'obtenir une pierre propre (élimination des poussières, salissure, etc.), saine et débarrassée des parties non adhérentes. Piquer les parties détériorées, friables ou sonnant creux sur une profondeur minimale de 3 cm.
2. Couper les zones repiquées de façon à obtenir des angles vifs qui permettront un bon ancrage du mortier. Brosse la pierre.
3. Appliquer éventuellement au rouleau ou à la brosse un primaire d'accrochage permettant la bonne prise du mortier sur la pierre support. Sinon mouiller la pierre et laisser ressuyer.
4. Pour les épaisseurs supérieures à 2 cm, percer des trous d'un diamètre légèrement inférieur à celui du clou en laiton.
5. Fixer des goujons en laiton espacés de 5 à 10 cm et les relier avec des fils en laiton, ou prévoir des armatures en laiton de plus fort diamètre.
6. Humidifier puis appliquer le mortier à la taloche ou la truelle de façon traditionnelle. Appliquer en une ou deux passes et dresser en surépaisseur.
7. Après durcissement, effectuer la finition selon l'aspect de la pierre, au chemin de fer, à la sciotte, au rabotin ou au gratton fin. Sculpter ou boucharder puis dépoussiérer et laver à l'eau.



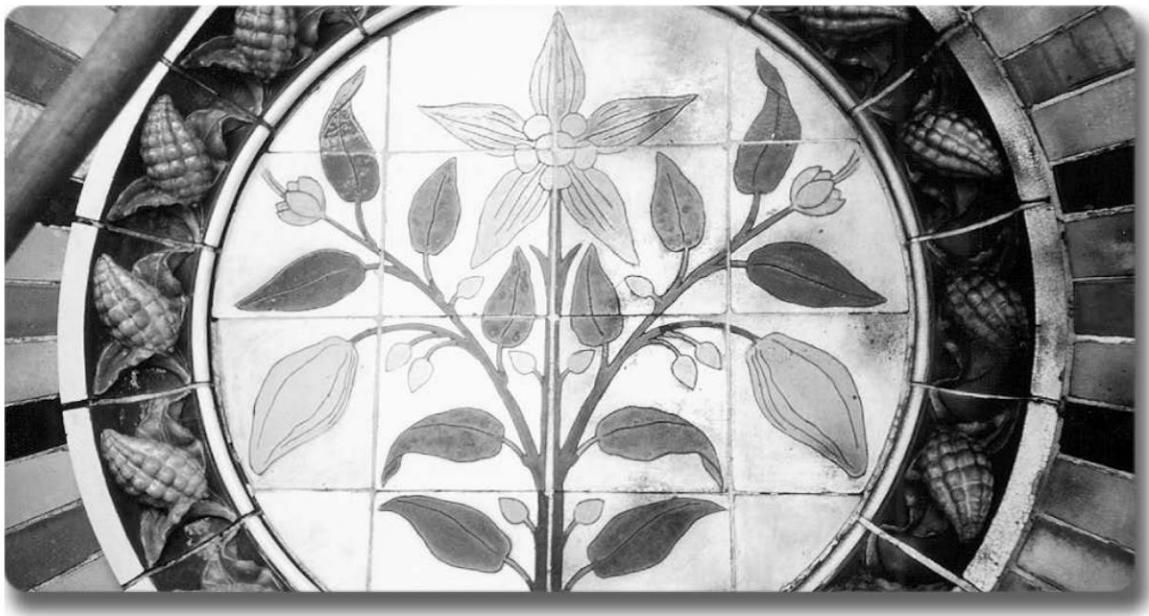
© Weber et Broutin

Mise en place
du fil de laiton.

OBSERVATIONS ET CONSEILS

- Éviter l'application en plein soleil, sous la pluie ou sur support gelé (pierres froides), en cours de dégel ou avec risque de gel, car le mortier frais de la réparation nécessite une cure dans un environnement climatique stable et non agressif.
- Dans un souci de préservation de l'aspect original de la façade, il est nécessaire de respecter le calepinage d'origine des pierres de taille et des joints d'appareillage des pierres de taille (voir fiche *Rénovation des joints sur pierre de taille*).

- Les mortiers de ragréage exposés aux intempéries changent tous légèrement de couleur. Des patines d'harmonisation (à base d'eau, de chaux aérienne en pâte, de pigments colorés tels que les cendres de pieds de vignes brûlés, terre d'ombre et autres pigments naturels) sont donc très souvent réalisées après les réparations par ragréage.
- Si la substitution à l'identique (voir fiche *Substitution de pierre identique*) n'est pas possible pour des raisons de coûts, il est toujours préférable d'utiliser un mortier imitant la pierre, avec patine d'harmonisation ou non, que de laisser les dégradations se poursuivre.
- Il est toujours difficile d'harmoniser l'aspect de la restauration avec celui du reste du mur. Le plus simple est parfois de pratiquer le ragréage sur une zone formant un tout, par exemple la face complète d'un élément, et d'appliquer des patines d'harmonisation pour confondre les éléments restaurés avec leur environnement.



© G. Vallière

2.3 Nettoyage par voie humide

Sont présentés dans cette partie l'ensemble des procédés de nettoyage utilisant des liquides – eau ou autre liquide au pouvoir nettoyant et décrassant (solvant, solution alcaline, etc.) – projetés avec ou sans pression sur le support à traiter. Ce type de nettoyage est à ce jour le plus utilisé pour le nettoyage des façades traditionnelles.

Compte tenu des dégâts qu'un important apport d'eau peut entraîner pour une façade – humidité dans les maçonneries, hydratation et gonflement des sels, etc. –, il est nécessaire d'évaluer les risques avant toute intervention. Le détail des méthodologies et des précautions à prendre lors de la mise en œuvre de ces procédés est décrit dans les différentes fiches.

Cataplasmes	p. 88
Électro-lessivage	p. 91
Ruisseaulement d'eau (ou nébulisation)	p. 95
Nettoyage haute pression	p. 98
Vapeur	p. 100
Procédés chimiques	p. 102

Cataplasmes

Béton : salissures noires • **Brique** : encroûtements noirs, salissures noires
• **Pierre** : encroûtements noirs, poussières, salissures noires

Description du procédé

Ce traitement consiste à appliquer sur les ouvrages des compresses humides pouvant être imbibées de solvant. Le cataplasme ainsi formé a pour fonction de ramollir les corps gras, suies et autres salissures incrustées sur la couche superficielle de la pierre. Au terme de l'opération, le cataplasme est retiré, laissant apparaître sur la façade une boue non adhésive que l'on élimine par simple brossage doux et rinçage à l'eau. Le temps d'application des compresses dépend de l'épaisseur de la couche d'encrassement, de la concentration des solvants dans la compresse et de la nature des parements.

Intérêt du procédé

Développé pour le nettoyage de statues, le nettoyage par cataplasme est maintenant appliqué au bâtiment dans son ensemble. Cette méthode est bien adaptée aux travaux de nettoyage de la crasse et des croûtes noires. Elle présente l'avantage de ne pas créer d'humidité en profondeur, déstructurer la matrice de la pierre ou faire migrer les sels en façade. Elle est en outre plus douce que les méthodes par abrasion, du type gommage ou hydrogommage (voir fiches *Gommage* et *Hydrogommage*). L'eau ne pénètre que superficiellement dans la pierre, ce qui entraîne moins de dissolutions et d'érosion en surface que les nettoyages à haute pression par exemple (voir fiche *Nettoyage haute pression*). Les cataplasmes sont particulièrement efficaces dans le cas :

- de plusieurs pierres de natures différentes assemblées (structures intrinsèques et/ou traitements de surface différents) ;
- d'altérations du support dues aux oxydes de soufre et à divers éléments métalliques, que ne peuvent révéler que des analyses en fluorescence X et en diffraction X ;
- de nettoyage à effectuer en intérieur, ce procédé évitant tout apport excessif d'humidité ;
- de joints très altérés ;
- de salissures à base de sulfates ;
- de pierres calcaires (y compris les tuffeaux), granit, béton, brique, grès, schiste, enduits et joints.

Choix des compresses

Les compresses sont à base de tissus végétaux ou minéraux (cellulose, pulpe de papier, laine de roche). Elles sont humides et peuvent être imbibées d'une solution chimique aqueuse (l'acide éthylène diamine tétra acétique et le carbonate d'ammonium sont utilisés dans la plupart des formules). Le plus simple est de se procurer ces produits auprès de fournisseurs et distributeurs en chimie du bâtiment.

MODE OPÉRATOIRE

Il est nécessaire de protéger l'opérateur contre les risques de projection des produits solvants contenus dans les compresses humides : gants latex à protection renforcée, masques anti-poussières de classe II, combinaison intégrale indéchirable et jetable (type Tyvek[®]) lors du flocage des fibres.

1. Procéder à un dépoussiérage généralisé des zones à traiter.
2. Appliquer la compresse humide contre la pierre encrassée par projection à environ 0,03 MPa de fibres de laine de roche humidifiées en sortie de buse. Il est également possible d'appliquer les compresses manuellement.
3. Pour assurer un bon transfert capillaire, imprégner en permanence la compresse d'eau pure à l'aide d'un pulvérisateur à main. Un réseau d'irrigation interne par tuyaux micro-poreux peut être mis en place pour maintenir un taux d'humidité constant; il est possible d'automatiser le système en installant un hygromètre dans la compresse.
4. L'action est effective sous quelques jours. Dès le troisième jour, ouvrir des fenêtres de contrôle (en enlevant une partie de la compresse) qui permettent de constater l'avancée du traitement.
5. À l'achèvement du temps d'imprégnation (en moyenne une dizaine de jours), retirer la compresse à l'aide d'un pinceau ou avec une spatule en plastique souple. Frotter alors les parements à l'éponge et les rincer légèrement à l'eau pure pour éliminer les salissures restantes et les résidus de compresse.
6. Éventuellement appliquer des compresses complémentaires en pulpe de papier additionnées d'eau distillée : elles permettent d'extraire les efflorescences salines provenant de l'application des compresses chimiques.

OBSERVATIONS ET CONSEILS

- Il est assez difficile de ne pas laisser de restes de compresse sur la pierre après le nettoyage. Toutefois les résidus sont progressivement éliminés si l'air ambiant est chaud et sec, et des brossages avec une brosse douce permettent d'accélérer le processus. Ces résidus n'ont qu'une incidence esthétique si la compresse est uniquement minérale. Tous les produits à base de cellulose

peuvent par contre être colonisés par des micro-organismes, ce qui risque d'induire un développement rapide de champignons, mousses et autres végétaux. Pour éviter ces complications, il est nécessaire de réaliser avant les travaux des essais *in situ* avec différents types de compresse. Un traitement biocide ou fongicide pourra éventuellement être pulvérisé, empêchant l'apparition de mousses ou de lichens.

- Les solvants à base d'acides et de bases pures ou diluées sont à proscrire pour le nettoyage des pierres car ils risquent d'induire une désagrégation de celles-ci, des colorations, et une apparition de sels résiduels. En tout état de cause, c'est l'étude préalable de la solubilité des sels contenus dans la façade, par prélèvement de fragments du support, qui peut déterminer le type de traitement à entreprendre pour éviter l'hydratation des sels.
- Des systèmes brevetés permettant l'irrigation continue et le contrôle des cataplasmes, mis au point par des sociétés de restauration de monuments historiques, ont fait l'objet de nombreuses conclusions favorables (en particulier par le Laboratoire de recherche des Monuments historiques). Par exemple, lors du nettoyage de la cathédrale de Rouen, des taux de gypse (sulfate de calcium hydraté) particulièrement important (30 %) ont été ramenés à 3 %.

Électro-lessivage

Brique: efflorescences, encroûtements noirs

- **Pierre:** efflorescences, salissures noires, encroûtements noirs

Description du procédé

L'électro-lessivage consiste à extraire les sels nuisibles contenus dans les façades en utilisant la différence de potentiel électrique entre deux électrodes disposées contre le support à nettoyer. Il s'agit d'appliquer le principe de l'électrolyse : l'eau contenue dans le mur va véhiculer le courant électrique. L'application se fait *in situ*, directement sur les éléments à traiter.

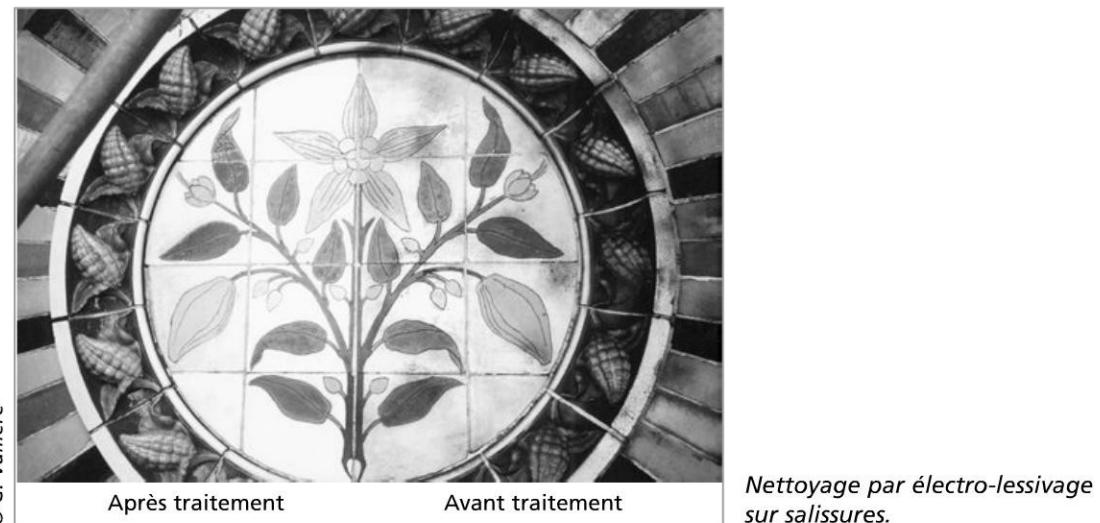
On distingue deux phases dans l'électro-lessivage :

- dans un premier temps, le module de distribution va fortement ioniser le matériau par émission en séquences d'impulsions électriques dont la fréquence est élevée (plusieurs dizaines par secondes). Les sels à extraire subissent ainsi une dissociation ionique (séparation d'une molécule en composants atomiques primaires avec leurs électrons libres), le matériau traité devenant alors conducteur ($\text{NaCl} \longrightarrow \text{Na}^+/\text{Cl}^-$). Chaque séquence est suivie d'une phase de repos de quelques minutes. En général trois séquences sont nécessaires pour ioniser le matériau de manière homogène. La tension envoyée lors de chaque impulsion est de 10 % supérieure à la tension d'amorçage du matériau ;
- dans une deuxième phase, les ions sont drainés sélectivement : les anions (Cl^-) vers l'anode, les cations (Na^+) vers la cathode.

Si le traitement se poursuit suffisamment longtemps (entre 24 et 72 heures), le matériau est libéré des sels solubles l'ayant contaminé. En fin d'opération de drainage, les anions et les cations ne circulent plus dans le matériau, qui n'est donc plus conducteur : le courant ne passe plus.

L'installation du système se prépare en tenant compte des paramètres suivants :

- nature des matériaux (céramiques, briques, pierres, etc.);
- résistance et résistivité du matériau;
- dimension et forme des électrodes;
- coefficient électrique et osmotique du matériau;
- nature et concentration des sels contenus;
- quantité de sels à extraire;
- poids et pH de l'eau contenue dans la structure.



Intérêt du procédé

Ce procédé est utilisé sur des matériaux et des structures soumis à l'action des sels, qu'ils soient d'origine interne (remontées capillaires) ou externe (vents salins par exemple). Dans certains cas les sels d'origine matricielle, qui composent la structure du matériau, sont également traités et éliminés. Le principal avantage de ce procédé est de permettre de drainer les sels non seulement en milieu poreux (pierres, briques, enduits, etc.) mais aussi sur des supports non absorbants comme l'émail : des résultats intéressants ont été mesurés sur des tessons et des pâtes céramiques lors de l'élimination de certains dépôts organiques.

Moyens de mise en œuvre

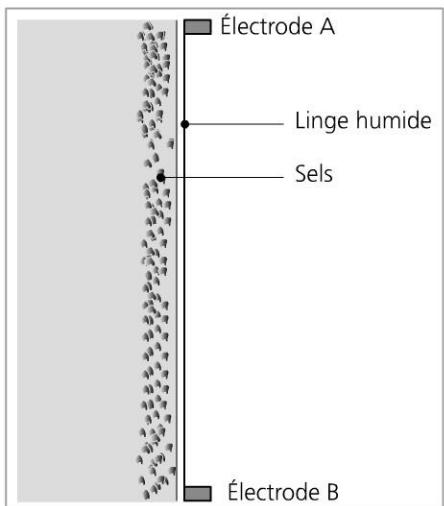
Ce procédé nécessite un personnel qualifié, capable d'assurer les réglages et la maintenance du système en place. Celui-ci effectue le réglage du pH, des tensions admises par le matériau (jusqu'à 400 Volts), de l'hygrométrie, et vérifie le poids des sels éliminés. L'hygrométrie du matériau doit absolument rester constante pour donner une mesure réaliste de l'extraction des sels; le technicien doit donc tenir compte de la vitesse d'évaporation, qui varie fortement tout au long d'une journée et des différences d'ensoleillement, de température et d'hygrométrie.

Le courant est fourni par un générateur de courant continu et est envoyé aux électrodes par un module de distribution indispensable à l'opération. Les électrodes peuvent être façonnées de manière à épouser les surfaces et volumes à traiter. Pour assurer un bon contact avec la surface, elles sont maintenues en pression par un boîtier porte développant des pressions de l'ordre de 0,2 à 0,5 MPa. L'ensemble du système est accroché à l'échafaudage par un système de blocage allant de plancher à plancher. De manière à ne pas provoquer de concentrations inopportunnes

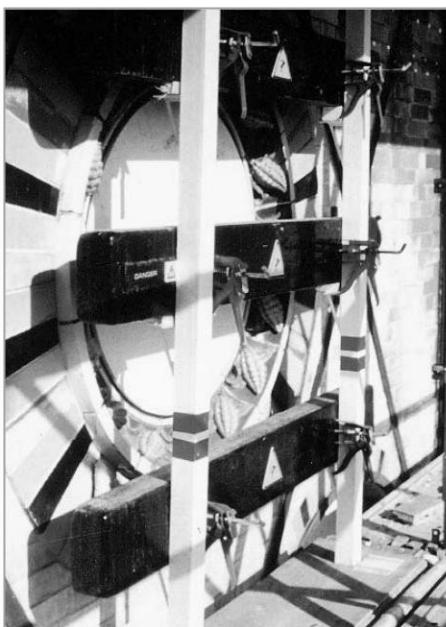
en bases ou en acide par stockage des anions et cations, les tampons électrodes peuvent être équipés de membranes semi-perméables sélectives (anions ou cations) permettant le stockage de ces derniers au-delà de l'interface tampon/surface du matériau.

MODE OPÉRATOIRE

1. Disposer deux électrodes entre lesquelles on tend un linge humidifié contre la paroi à nettoyer. Les électrodes peuvent être maintenues à l'aide d'un échafaudage.
2. Faire circuler un courant continu pouvant aller jusqu'à plusieurs centaines de volts: les sels viennent se fixer sous forme d'ions sur le linge.
3. Retirer le linge et déplacer le dispositif jusqu'à la surface à traiter suivante.



*Migration
des ions
vers le linge.*



Le médaillon central du bâtiment est en cours d'électro-lessivage.



Vue d'ensemble du dispositif.

**NETTOYAGE
PAR VOIE HUMIDE**

OBSERVATIONS ET CONSEILS

Ce procédé a fait l'objet d'une étude et d'un développement de pointe lors des travaux de restauration du moulin Saulnier à Noisiel (Seine-et-Marne). Durant les opérations d'électro-lessivage sous contrôle du Laboratoire de recherche des Monuments historiques, aucun effet secondaire néfaste n'a été noté. Cela semble dû en grande partie au fait que l'eau nécessaire à la migration des ions était déjà contenue dans la structure (il aurait été dangereux en effet d'accumuler un trop grand poids d'eau dans une structure à pans de fer). En revanche, il a été constaté une passivation (c'est-à-dire une modification de la surface du métal qui le rend moins sensible aux agents chimiques) importante du métal, par ailleurs peu corrodé, ce qui amène à penser que la présence d'un courant électrique permanent sur un édifice à structure métallique pourrait avoir un effet bénéfique sur sa conservation.

Ruisseaulement d'eau (ou nébulisation)

Pierre : encroûtements noirs, poussières, salissures noires

Description du procédé

Cette méthode consiste à alterner sur la façade ruisselements d'eau et brossages. L'eau, à laquelle peuvent être ajoutés des savons industriels qui en augmentent l'effet mouillant, ramollit les croûtes, les transforme en boues, et les entraîne dans son ruissellement. On tire donc parti de son pouvoir solvant. Le brossage permet un nettoyage complémentaire du support; il peut éventuellement être remplacé par un lavage à haute pression. Le temps d'arrosage dépend principalement de la nature du support et de son degré d'encrassement.



© G. Vallière

Dispositif de nébulisation.

Intérêt du procédé

Le ruissellement d'eau permet de faire disparaître les croûtes noires de sulfin. Ce procédé est très efficace pour éliminer les sels nocifs solubles dans l'eau.

Moyens de mise en œuvre

Les diffuseurs sont le plus souvent fabriqués par les entreprises elles-mêmes. Il est facile d'acheter dans des jardineries des tuyaux d'arrosage percés. Ces tuyaux sont ensuite accrochés à une barre reliée à un système de poulies, qui sert à faire monter ou descendre la rampe ainsi fabriquée. Les diffuseurs doivent être montés sur des rotules permettant d'orienter le brouillard d'eau. Les rotules reposent sur une rampe d'arrosage longue de plusieurs mètres et que l'on déplace de haut en bas sur la façade.

MODE OPÉRATOIRE

1. Minimiser tous les risques d'infiltration d'eau : procéder à une réfection des joints (voir fiches *Joints rigides* et *Joints souples*) et calfeutrer les fenêtres. Pour protéger les fenêtres, on peut poser un adhésif ou un joint souple sur le pourtour de la baie et un polyane maintenu par des tasseaux cloués sur l'huisserie. Cette méthode, peu fiable, est aujourd'hui remplacée par le positionnement d'un cadre modulable en hauteur et en largeur équipé d'un translucide plastifié, l'étanchéité étant assurée par la compression d'un joint souple sur la face extérieure du profilé.
2. Disposer les diffuseurs à environ 50 cm de la façade, tous les 50 à 80 cm.
3. Diminuer la pression de l'eau en sortie de robinet de 0,3 à 0,5 MPa (valeur souvent obtenue à la sortie d'un robinet) à moins de 0,1 MPa : une diffusion douce de l'eau permet d'imprégnier profondément le support. Si l'alimentation en eau de la rampe d'arrosage s'effectue depuis le niveau du sol, il est parfois nécessaire d'installer une pompe de relevage au sol afin de faire remonter l'eau à faible pression dans le tuyau d'alimentation.
4. Pulvériser l'eau pendant 1 à 2 heures.
5. Brosser la façade avec une brosse douce ou une brosse de chiendent. Recommencer ensuite les opérations de pulvérisation et de brossage (en général 2 ou 3 fois).

OBSERVATIONS ET CONSEILS

- On peut augmenter l'effet mouillant de l'eau en lui ajoutant des savons industriels neutres, avec ou sans permutation ionique, de type Teepol®, Techniclean®, etc. Lorsqu'on nettoie des pierres tendres ou fragiles, ou des pierres calcaires, il faut faire attention que les brosses utilisées ne soient pas trop agressives : proscrire totalement les brosses métalliques, qui risquent d'abîmer le support.

- S'il y a lieu de procéder à un rejoointoient des pierres ou des briques, il devra être exécuté au moins un mois et demi avant de commencer le lavage afin d'obtenir une cure définitive des mortiers de rejoointoient.
- Il peut être avantageux d'utiliser une eau dure pour augmenter le pouvoir dissolvant de l'eau et enlever ainsi plus facilement les sels solubles et les croûtes noires.
- Le ruisseaulement, bien que doux et efficace, présente certains inconvénients. La grande quantité d'eau projetée sur la façade risque ainsi de créer des problèmes de séchage très long et de gel en hiver. D'autre part ce procédé reste difficilement utilisable pour les bâtiments d'habitation car il peut induire des infiltrations d'eau.
- On observe parfois l'apparition de taches de rouille dues à l'oxydation des sels métalliques inclus dans la pierre, ou le développement de dépôts organiques, par exemple des mousses. Seule une étude préalable du support peut mettre en avant de tels risques. Il est possible d'associer le procédé à un traitement fongicide préalable.

Nettoyage haute pression

Béton: salissures grasses, salissures noires, résidus de peinture
• **Brique**: salissures noires • **Pierre**: poussière, salissures noires

Description du procédé

Ce traitement consiste à projeter de l'eau à haute pression sur la façade : la salissure est en même temps ramollie par l'eau et éliminée par la puissance du jet. Un mouillage préliminaire sans pression peut permettre une amorce de ramollissement des saletés, ce qui est particulièrement efficace pour traiter les croûtes noires.



© G. Vallière

| Nettoyage haute pression sur béton.

Intérêt du procédé

Le nettoyage haute pression est utilisé sur des matériaux durs et compacts, et permet de supprimer les salissures ou les taches. Il est bien adapté à l'entretien régulier de façades ayant subi un traitement hydrofuge de surface (qui permet d'améliorer l'imperméabilisation).

Moyens de mise en œuvre

La machine haute pression est équipée de diverses buses ayant des angles d'attaque plus ou moins grands, ce qui permet de modifier le type de jet. Les buses à angle d'attaque trop fermé (de 0 à 20°) sont à proscrire car le jet de sortie, trop puissant, pourrait endommager la façade. L'emploi de machines non professionnelles est déconseillé car elles ne sont pas d'une grande fiabilité.



© Kärcher

| Machine haute pression.



© G. Vallière

| Buse à 40°.

MODE OPÉRATOIRE

Protéger les zones ne devant pas être traitées (fenêtres, garde-corps, etc.), l'environnement (piétons, véhicules, etc.) et l'intervenant (combinaison, masque, gants, etc.). Voir fiche *Ruisseaulement*.

1. Avant de procéder au nettoyage à l'eau, répandre des produits chimiques sur la façade permet de ramollir les salissures. Ces produits sont à utiliser avec beaucoup de précautions (voir fiche *Procédés chimiques*) ; l'emploi d'un simple savon liquide (Teepol® par exemple) ou d'agent de nettoyage et de dégraissage (Techniclean® par exemple) suffit en général. Pulvériser ces produits, puis brosser. Rincer à haute pression 10 à 30 minutes après le brossage.
2. Pour le nettoyage haute pression, il est préférable de se déplacer sur l'échafaudage de haut en bas : on favorise ainsi le ruisseaulement et on évite de salir à nouveau les parties nettoyées. Maintenir la buse à environ 50 cm de la surface à nettoyer, régler la pression entre 5 et 15 MPa. Faire très attention à ne pas utiliser une pression trop forte, autrement le support risque de subir des dommages irréversibles.
3. Les salissures situées dans des endroits peu accessibles peuvent être éliminées par ponçage ou brossage ponctuel à la main (voir fiche *Ponçage*), ou éventuellement par gommage (voir fiches *Hydrogommage* et *Gommage*).

OBSERVATIONS ET CONSEILS

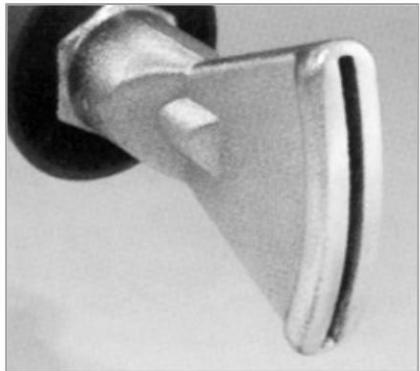
- On ne joue pas systématiquement sur la pression au niveau de la machine. C'est à l'intervenant d'apprécier la capacité de résistance du support et son degré de salissure. En fonction de ces paramètres, et après avoir réglé la pression moyenne à utiliser, il modifie la distance de la buse par rapport à la paroi. Par exemple, il éloigne la buse en passant sur une sculpture et l'approche pour éliminer des salissures plus tenaces.
- Outre la pression, les appareils permettent de régler la température. Il est souvent efficace d'utiliser de l'eau chaude sur des supports graisseux ; elle est toutefois à proscrire l'hiver pour éviter les chocs thermiques.
- Le nettoyage haute pression est proscrit pour les matériaux tendres et/ou altérés. Même pour le nettoyage de pierres dures, il faut être attentif à ne pas appliquer une trop forte pression, qui abîmerait la pierre.
- Comme pour tout procédé humide, il faut faire attention au gel, qui risque de faire s'effriter la pierre.

Vapeur

Béton : résidus de peinture • **Pierre :** encroûtements noirs

Description du procédé

Ce procédé consiste à projeter de la vapeur sous pression pour éliminer les salissures non incrustées dans la pierre. Le principe est identique à celui du nettoyage à eau haute pression (voir fiche *Nettoyage haute pression*) : il s'agit de ramollir la saleté par mouillage et de l'éliminer instantanément grâce à la pression du jet. Le nettoyage à la vapeur permet en outre de jouer sur des écarts de température du jet : la vapeur chaude dégraisse la façade, puis la condensation de la vapeur et le ruissellement d'eau froide entraînent les salissures.



© G. Vallière

| Lance avec buse à vapeur.

Intérêt du procédé

Le nettoyage par la vapeur est régulièrement utilisé pour le nettoyage de bâtiments industriels ou pour le dégraissage de garage mais, peut-être par méconnaissance du procédé, il est peu souvent prescrit pour le nettoyage de façades. Pourtant il est utile pour un entretien régulier et d'une grande efficacité pour le dégraissage. Il est en outre bien adapté aux surfaces irrégulières, n'élimine pas la patine de la pierre et permet de travailler rapidement (environ 1/2 heure par mètre carré, soit un rendement proche de celui des procédés par projection de matière). Ce traitement ne nécessite qu'un apport réduit en eau, ce qui est un avantage par rapport à d'autres traitements par voie humide, par exemple le nettoyage par nébulisation (voir fiche *Ruisseaulement d'eau*), avec lesquels il y a plus de risques de pénétration d'humidité dans les murs. Néanmoins la vapeur doit être employée sur des matériaux peu poreux car on ne peut jamais complètement écarter le risque d'infiltration.

Équipement nécessaire

Le matériel est composé d'un générateur de pression couplé à une chaudière (voir fiche *Haute pression*) et d'une buse actionnée manuellement. Il est nécessaire de consulter des entreprises spécialisées pour mettre en œuvre ce procédé.

MODE OPÉRATOIRE

1. Protéger les zones non traitées (voir fiche *Ruisseaulement d'eau*).
2. Projeter la vapeur: le jet est réglé à une pression de 0,5 à 1 MPa et à une température de 150 à 250 °C.
3. La salissure est évacuée par le ruissellement de l'eau qui résulte du refroidissement de la vapeur.

OBSERVATIONS ET CONSEILS

Le choc thermique induit par la vapeur peut engendrer une désagrégation ponctuelle de la pierre. De façon générale, les effets de la vapeur sont difficilement contrôlés: il est important de faire des tests préliminaires avant de mettre en œuvre ce traitement sur l'ensemble d'une façade.

Procédés chimiques

Béton : salissures grasses, salissures noires, résidus de peinture, salissures vertes

- **Brique :** salissures noires, salissures rouges, salissures vertes

- **Pierre :** encroûtements noirs, salissures noires, salissures vertes

Ces traitements permettent de ramollir ou de dissoudre les salissures par réaction chimique. Les produits employés sont corrosifs, donc dangereux pour l'applicateur et pouvant abîmer le support traité : des tests préalables et une extrême vigilance sont de rigueur.

Un bon moyen de comprendre les traitements chimiques est de regrouper les divers paramètres de l'intervention en quatre facteurs. Si l'efficacité d'un des facteurs diminue, il faut qu'elle soit compensée par celle d'un ou plusieurs des autres facteurs :

- temps d'action : durée d'application nécessaire du produit pour que la réaction souhaitée se produise ;
- température : plage de température permettant une réaction chimique optimale (paramètre peu maîtrisable car l'application se fait le plus souvent en extérieur) ;
- action chimique : choix du produit le mieux adapté en fonction de ses caractéristiques chimique et moléculaire ;
- action mécanique : traitements d'accompagnement de l'application des produits chimiques (brossage, rinçage à l'eau avec ou sans pression, etc.).

Le pH est une des caractéristiques importantes d'une solution chimique. Il indique si elle est acide, basique ou neutre : l'échelle des pH s'étend de pH 1 (acides forts) à pH 14 (bases caustiques). Connaître le pH d'une solution permet de mettre en œuvre des produits compatibles avec le support à nettoyer : il faut par exemple absolument éviter d'utiliser une solution acide sur du calcaire. Les différents degrés de pH s'appliquent uniquement aux solutions contenant de l'eau, et non aux solvants ou aux solides.



Traitements chimique sur encroûtements noirs.

© G. Vallière

Le pH permet de savoir si une solution est acide ou basique, mais n'indique pas le pourcentage d'acide ou de base. Il s'agit donc d'une donnée qualitative, et non quantitative.

AGENTS CHIMIQUES LES PLUS COMMUNÉMENT UTILISÉS

Les familles de produits décrites ici ne doivent pas être utilisées en même temps : il sera nécessaire, pour un même support, de choisir une base, un acide ou un tensioactif. Autrement des réactions parfois violentes peuvent se produire : échauffement du support (réaction exothermique), effervescence, voire explosion. Les risques sont très différents suivant les produits employés et il peut exister des incompatibilités à l'intérieur d'une même famille. Dans tous les cas il est impératif de se reporter à la fiche sécurité du produit, qui indique les risques encourus et les équipements de protection individuelle à utiliser.

Les tensio-actifs

Cet agent abaisse la tension superficielle (c'est-à-dire la force de la pellicule de surface) de l'eau ou du milieu dans lequel il est dissous. En résultent diverses caractéristiques pouvant être utilisées dans le cadre d'un nettoyage. Les tensio-actifs peuvent ainsi :

- être hydrophobes (ils ne se lient pas avec l'eau) mais lipophiles (ils se mélangent aux graisses). Ils sont alors utilisés pour nettoyer par exemple des salissures grasses;
- être hydrophiles (ils se lient avec l'eau). Ils permettent alors d'accélérer le ramolissement des encroûtements noirs;
- avoir un effet moussant, ce qui permet de soulever et de maintenir en suspension les impuretés à éliminer;
- avoir un effet « mouillant », ce qui favorise la répartition de l'eau sur des surfaces diverses. L'eau pénètre sous les éléments indésirables en les décollant. Les détergents, par exemple, sont des agents tensio-actifs qui provoquent la rupture des liaisons entre les saletés et les supports.

La gamme des tensio-actifs est très vaste (gamme de pH allant de 2 à 10). On y trouve tous les types de savons industriels, à pH neutre ou non, qui facilitent le « décrochage » des encrassements.

Les produits sont appliqués sur la façade par dispersion ou émulsion. On peut ajouter des tensio-actifs dans l'eau utilisée pour le nettoyage préalable de façade, ou pour nettoyer une façade faiblement encrassée, ou encore dans le cadre de procédés nécessitant une amélioration du pouvoir solvant de l'eau (pour le nettoyage à haute pression ou le ruissellement par exemple – voir fiches *Nettoyage haute pression* et *Ruissellement d'eau*).

Les acides (les sequestrants)

Les acides permettent principalement de dissoudre les encrassements et les graisses déposées par la pollution atmosphérique. Ils attaquent également le calcaire, on ne peut donc les utiliser que sur des matériaux non calcaires : bétons, granits, enduits minéraux, etc. En solution concentrée, les acides ont la plupart du temps des effets corrosifs sur les métaux, le bois, les tissus, la peau, etc. Ils sont neutralisés par les bases.

Les acides contiennent de l'hydrogène (H). Les plus communs sont l'acide chlorhydrique (HCl), l'acide sulfurique (SO_4H_2), l'acide phosphorique (H_3PO_4), l'acide acétique ($\text{CH}_3\text{-C}_2\text{OH}$) ou l'acide citrique ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$). Lorsqu'ils sont dilués dans de l'eau, celle-ci prend un goût aigre. Pour le nettoyage des façades, les produits acides sont souvent des complexes à base de différents acides, de type sulfurique ou phosphatique. L'acide fluorhydrique reste l'acide le plus souvent utilisé sur les pierres dures et les briques. D'une manière générale, l'emploi d'acide chlorhydrique, de détergents anioniques (sels sodiques) ou de sels de sodium et de potassium doit être évité sur les matériaux poreux et les joints, qui risquent d'être abîmés. Le bifluorure d'ammonium est considéré comme peu dangereux pour le nettoyage des calcaires et des grès blancs.

Pour éviter d'altérer le support, il est conseillé d'appliquer la solution au pulvérisateur ou à la brosse douce et de laisser des temps de réaction très courts (de 5 à 10 minutes).

Les bases (les alcalins)

Les bases permettent de désincruster, d'extraire et de dissoudre les encrassements provoqués par la pollution atmosphérique. Elles sont particulièrement utilisées sur les pierres calcaires.

Les bases sont des substances chimiques qui comprennent de l'hydroxyle (CH). En solution diluée, elles donnent l'impression d'être savonneuses ; les solutions concentrées peuvent provoquer des brûlures sur la peau. Les bases sont neutralisées par les acides. On regroupe divers produits sous le terme de base : hydroxyde de sodium (NaCH) appelé communément soude caustique, hydroxyde de potassium (KOH) appelé communément potasse caustique, alcali volatil, cristaux de soude, levures, etc.

Les produits alcalins doivent être mis en œuvre sous forme de gel ou de pâte mélangé à des substances absorbantes (amidon, farine, cellulose, etc.) ou à une matière thixotropique (carboxyméthyl-cellulose). Ces pâtes diminuent la pénétration des produits, ce qui permet une intervention ciblée ; par séchage, elles absorbent une partie des sels. Les produits alcalins ne devraient jamais être utilisés en solution car le produit est alors trop liquide et risque de couler le long de la façade, ce qui entraîne des coulures plus claires ou des différences de teinte.

Les pâtes alcalines s'appliquent sur un matériau sec. Il faut les éliminer mécaniquement le plus possible avant tout rinçage à l'eau. L'application de cette pâte, son élimination mécanique et le rinçage doivent toujours être effectués de bas en haut, autrement la concentration en acide en bas de la façade est trop importante.

Ces produits peuvent être d'une efficacité spectaculaire mais, mal employés, ils font courir des risques à la façade. Il est primordial de procéder à des rinçages soigneux et répétés, voire à la neutralisation de la façade par traitement chimique, pour éviter l'apparition d'efflorescences et de mousses. Si malgré tout ce phénomène se manifeste, il est nécessaire de retirer manuellement les efflorescences et les mousses à l'aide d'une balayette ou d'un aspirateur industriel : on évite ainsi de les diluer à nouveau sur la façade lors d'un nouveau rinçage. La neutralisation chimique est une opération dangereuse : la composition chimique du neutralisant qui peut créer des réactions spéciales avec certains sels.

Les solvants

Le terme solvant désigne d'une manière générale tout produit chimique qui a la propriété de dissoudre certaines substances. Les solvants chlorés servent de détartrants et de dégraissants ; les solvants organiques sont des hydrocarbures, c'est-à-dire des molécules formées d'atomes de carbone et d'hydrogène, qui servent d'adjuvants et de diluants. L'eau peut également être un solvant, mais on se sert généralement de ce terme pour désigner les produits industriels.

Dans le cadre du nettoyage de façade, les solvants sont le plus souvent utilisés pour dégraisser. Selon leurs propriétés – à voir sur les notices des fabricants –, ils peuvent servir de :

- dégraissants : nettoyage des métaux, des textiles, des briques et céramiques... ;
- adjuvants et diluants : peintures, vernis, encres, colles, pesticides ;
- décapants : élimination des peintures, vernis, colles ;
- purifiants : parfums, médicaments.

MODE OPÉRATOIRE

Quel que soit le degré de dangerosité des produits, ce type de procédé nécessite une main-d'œuvre qualifiée – et ce même pour des produits du commerce, vendus prêt à l'emploi. En effet il n'est pas rare d'observer des réactions secondaires du support, et il faut un réel savoir-faire pour les anticiper ou en limiter les effets. Dans tous les cas, l'utilisateur doit se reporter à la fiche sécurité du produit, qui indique tous les risques encourus et l'ensemble des équipements de protection individuelle à utiliser. Les protections peuvent aller de la simple paire de gants de protection à la combinaison intégrale avec capuche, gants scotchés aux avant-bras et bottes scotchées en partie haute.

Il est également important de protéger l'environnement et les éléments architecturaux fragiles ou sensibles (vitres, menuiseries, volets, garde-corps, etc.) des

risques d'infiltration d'eau ou de produits chimiques : on procède par plastification ou dépose d'éléments de protection. Les passants doivent être protégés des projections de solution chimique ou d'eau par des protections de type bâche sur échafaudage ou tunnel protégé sur les trottoirs.

1. Mouiller abondamment à l'eau froide la façade : on évite ainsi une pénétration trop importante du produit chimique dans les matériaux traités. Effectuer cette opération de bas en haut de façon à éviter la pénétration des eaux sales dans le matériau sec.
2. Appliquer le produit en travaillant du bas vers le haut de la façade, à la brosse ou au pulvériseur.
3. Après avoir laissé agir le produit pendant un temps déterminé par le fabricant (de quelques minutes à plusieurs heures), rincer abondamment la façade à l'eau froide. Il est possible de travailler avec ou sans pression, en fonction du degré d'enrassement : la pression permet d'ajouter une action mécanique à l'action chimique du produit. Le rinçage peut aussi être accompagné d'un brossage à l'eau, avec une brosse douce en Nylon par exemple (voir fiche *Nettoyage haute pression*).
4. À la fin du traitement, vérifier que le pH du support nettoyé est bien compris entre 6 et 8. On mesure ce pH à l'aide d'un instrument électronique, le pH-mètre, plongé dans un bac récupérant l'eau qu'on fait ruisseler sur la façade ; on peut aussi simplement appliquer un papier pH sur la façade directement, qui se colorera de différentes manières selon le pH de la façade. Ces papiers pH peuvent être achetés dans les drogueries ou en pharmacie.
5. Après le nettoyage par produit chimique à base d'acide ou de base, appliquer rapidement un neutralisant en procédant par pulvérisations successives. On évite ainsi les réactions chimiques et on prévient l'apparition d'efflorescences.



Mesure du pH.

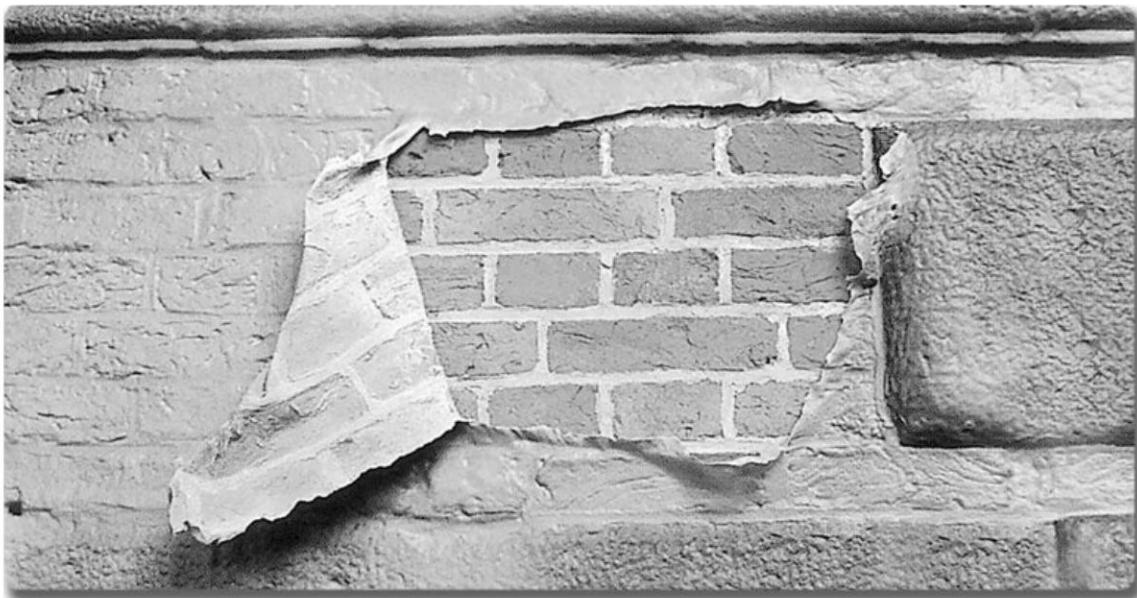
© G. Vallière

OBSERVATIONS ET CONSEILS

- Avant de se lancer dans un traitement chimique, il est important de se renseigner sur le domaine d'application des différents produits auprès des fabricants et des fournisseurs. Les produits chimiques susceptibles d'être utilisés

avec sûreté pour le nettoyage des façades en pierres ou en briques anciennes sont relativement peu nombreux. Si on reste prudent, plusieurs d'entre eux donnent d'excellents résultats : certains savons neutres liquides d'usage industriel (à base de tensio-actifs), certains sels sous forme de pâtes et de cataplasmes comme les bicarbonates et bifluorures (de sodium et de d'ammonium), ou les complexes sels-bi et tétrasodiques de l'acide éthylène diamine tétra acétique (EDTA).

- Les produits chimiques doivent être maniés avec beaucoup de précautions car ils peuvent engendrer des désordres irréversibles. Pour repérer les éventuels effets indésirables, il est impératif d'effectuer des essais sur de petites surfaces de la façade à traiter et d'attendre plusieurs semaines afin de déceler les éventuels effets à retardement.
- Les produits chimiques apportent des solutions efficaces à partir du moment où on fait le bon choix de produit, ce qui n'est pas toujours facile car la gamme est vaste, les écarts de prix importants (de 3 euros le litre de produits à une vingtaine d'euros), et le degré d'efficacité variable. Les domaines d'application décrits sur les notices ou les slogans marketing des industriels et distributeurs donnent des indications, mais le mieux est de se faire conseiller par un professionnel du ravalement de façades.



© Rewah

2.4 Nettoyage par voie sèche

Les procédés présentés dans cette partie ont l'intérêt de permettre un nettoyage sans apport d'eau ou projection de matière. Ils sont donc souvent utilisés sur des supports fragiles (voir fiche *Laser*), ou dans des environnements difficiles, intérieur de bâtiment par exemple; ils permettent également des interventions lourdes sur le support lorsque celui-ci doit être retaillé (voir fiches *Retaille* ou *Ponçage*). Il s'agit de méthodes traditionnelles (voir fiches *Ponçage* et *Retaille*) ou développées récemment (voir fiches *Peeling* ou *Laser*).

Laser
Peeling
Ponçage
Retaille

p. 110
p. 113
p. 116
p. 118

Laser

Brique : encroûtements noirs • **Pierre :** encroûtements noirs, salissures noires

Description du procédé

Le procédé consiste à projeter sur la surface à traiter un rayonnement lumineux laser qui élimine les salissures sans endommager le matériau support. En effet, sous l'action du rayonnement laser, la couche de salissures foncée吸吸收 l'énergie, se réchauffe instantanément et est vaporisée. Une fois la croûte noire disparue, la pierre blanche sous-jacente réfléchit le faisceau laser en n'absorbant que très peu d'énergie. Si les réglages adéquats ont été réalisés par l'opérateur, le matériau support n'est pas attaqué.

Le procédé de nettoyage par laser crée en fait une photoablation confinée : les photons du faisceau cassent les liaisons moléculaires des salissures (phénomène de « photodissociation »). Simultanément cet éclair provoque une micro-onde de choc qui éjecte les particules sous forme de poussières. Le faisceau laser utilisé varie en fonction de la nature pétrographique (c'est-à-dire de la composition minéralogique) du support et de sa capacité d'absorption du rayonnement.



© G. Vallière

| Un lasériste en action.

Intérêt du procédé

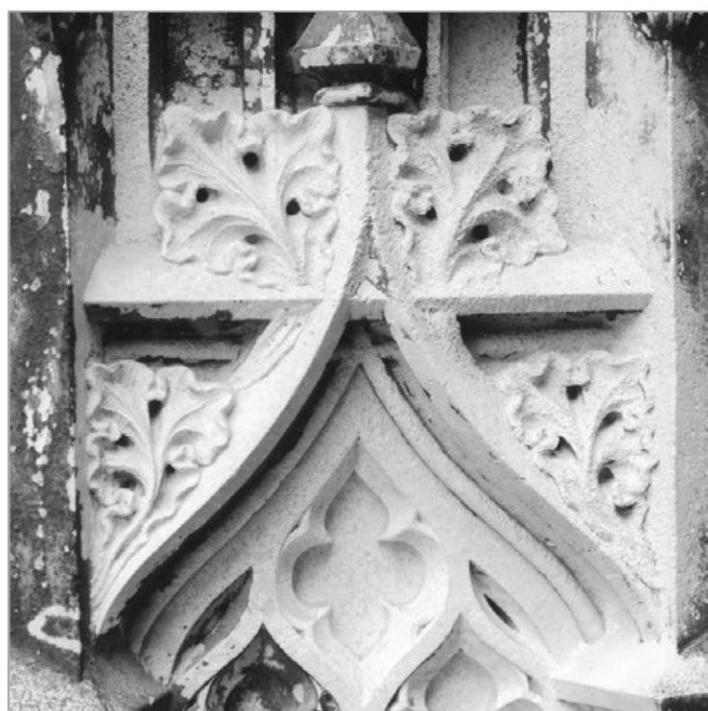
Le travail au laser est utilisé pour le nettoyage de salissures et de croûtes noires sur matériaux pierreux de tonalité claire. Cette technique est la seule à permettre de traiter complètement et directement le support, sans pré-consolidation des épidermes fragiles (voir fiche *Consolidation*) ou nettoyage préalable, et sans altération de l'épiderme.

Moyens de mise en œuvre

La source laser ainsi que son alimentation ont été réduites de manière à tenir dans un coffre surmonté d'un bras articulé. Le faisceau est pointé sur le support à nettoyer via un jeu de miroirs et une poignée très maniable. Un boîtier de contrôle associé à un système de focalisation permet de régler l'intensité lumineuse, la fréquence de tir lumineux et le diamètre du faisceau (1 à 20 mm).

MODE OPÉRATOIRE

Ce procédé doit être mis en œuvre avec beaucoup de précautions. À titre de comparaison, un éblouissement solaire correspond à un flux de 10 W/cm^2 et certains lasers peuvent émettre des flux de 1010 W/cm^2 . Le port de lunettes spécifiques de protection est obligatoire non seulement pour l'utilisateur de la machine, mais aussi pour toute personne se trouvant dans l'environnement proche de l'opérateur. Le lasériste ne doit porter aucun objet réfléchissant (bague, boucle d'oreille ou de ceinture, etc.). De manière générale, il est nécessaire de prendre le plus de précautions possible : isoler la zone de travail par des bâches noires, mettre en place des cellules de détection contrôlant l'accès de la zone, actionner un gyrophare de prévention lors de l'utilisation de la machine, etc.



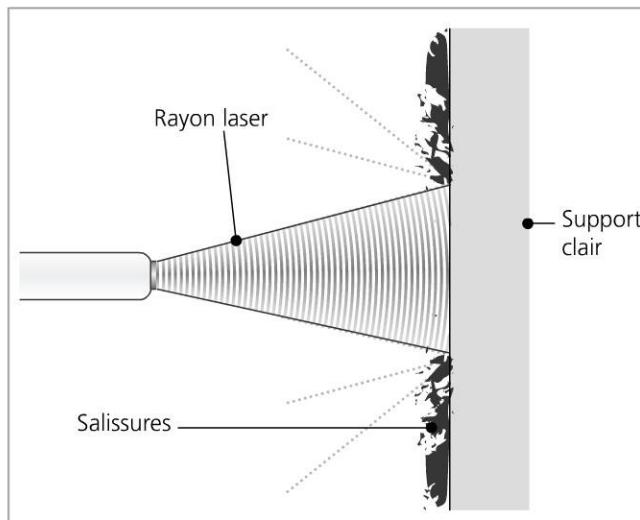
© G. Vallière

Nettoyage effectué au laser

Nettoyage effectué par microsablage

Essai comparatif des effets du laser et du microsablage sur une pierre de tuffeau.

1. Procéder aux réglages du laser en termes d'intensité lumineuse, de diamètre du faisceau et de fréquence de tir lumineux.
2. Travailler sur une petite surface, pendant une courte durée et à environ 30 cm du support. Déplacer à chaque tir de lumière le faisceau laser via le bras articulé de la machine. Il n'y a pas de risque majeur en cas d'insistance de tir de lumière sur la zone à nettoyer car la pierre claire réfléchit le faisceau.



| Action du laser.

OBSERVATIONS ET CONSEILS

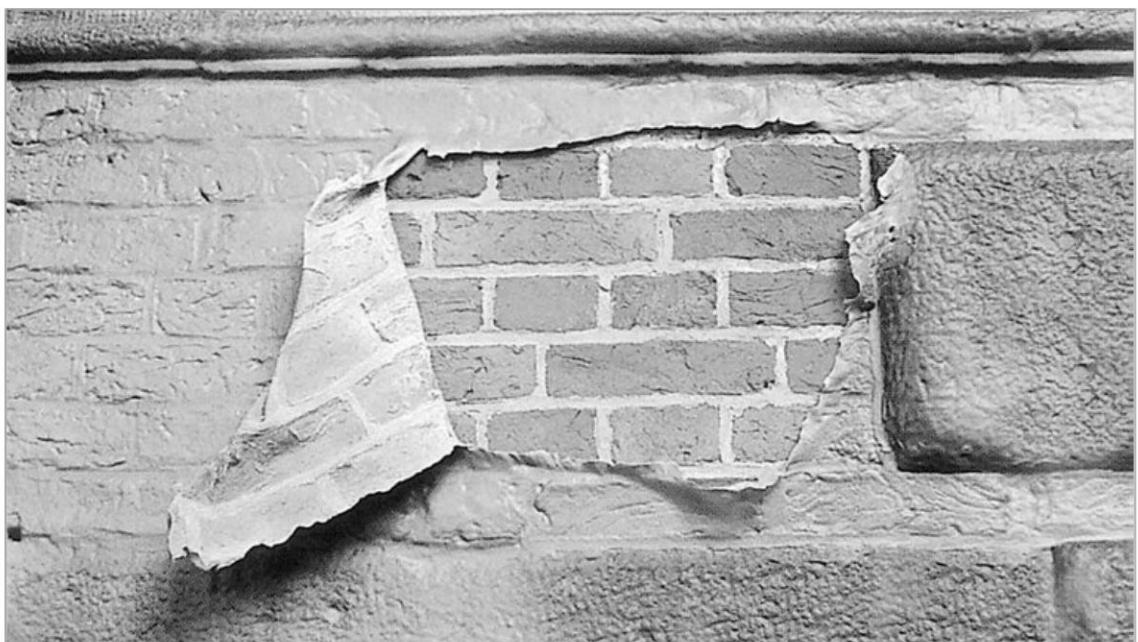
- L'emploi du laser peut altérer la tonalité soutenue de certains matériaux tels que la brique ou les pierres bleues calcaires; il peut dépolir des matériaux comme le marbre blanc. On a également remarqué dans la plupart des traitements un jaunissement de la pierre.
- Les recherches de mise au point sur le laser ont abouti à la sélection d'une source lumineuse la mieux appropriée : le laser Nd YAG déclenché. Il s'agit d'une lampe éclair avec barreau solide de grenat d'aluminium-Yttrium (Nd) dopé au néodyme (YAG). Avec ce procédé, la lumière est émise dans l'infra-rouge à 1,064 µm de longueur d'onde; le laser a une puissance maximale de 400 milijoules et des durées d'impulsion de 8 nanosecondes.
- Bien que l'efficacité du laser soit largement soulignée par tous les professionnels de la rénovation des monuments historiques, il reste que le procédé est extrêmement lent (maximum 2 cm²/s) et coûteux, impliquant une équipe de techniciens laséristes et une organisation complexe du chantier. Pour autant des recherches sont en cours pour la réalisation de lasers dont le champ de nettoyage serait plus large, à la manière des buses au niveau des lances de nettoyage à eau haute pression. Un programme de recherche Restor, dans le cadre d'un projet européen Eureka, vise à développer et à commercialiser un équipement de nettoyage de façades de type haussmannien, basé sur les principes de la photoablation laser et permettant de traiter plus de 10 m² par heure.

Peeling

Béton: salissures noires • **Brique**: salissures noires
• **Pierre**: poussières, salissures noires

Description du procédé

Le peeling consiste à déposer sur le mur à traiter un enduit à base de caoutchouc qui absorbe la pollution. Il s'agit d'un nettoyage purement mécanique, sans aucun risque de réaction chimique. Après séchage de la pâte sur le support, il suffit de retirer le film élastique.



| Retrait de l'enduit.

NETTOYAGE
PAR VOIE SÈCHE

Intérêt du procédé

Le peeling permet le nettoyage rapide de surfaces importantes. Il peut être utilisé sur tous types de bâtiments et sur de nombreux supports (stuc, staff, bétons, briques, pierres; murs, voûtes, plafonds, etc.). Il est particulièrement intéressant pour enlever les salissures des édifices ouvragés : moulures, corniches, sculptures, etc.

Moyens de mise en œuvre

De nombreux industriels de la chimie et fabricants ou revendeurs spécialisés dans la vente de produits chimiques commercialisent des procédés et produits à base de caoutchouc permettant ce type de nettoyage (Technistrip® de chez Technichem, le procédé Artex® de chez LGIM, etc.). L'entreprise Rewah a mis au point une pâte détersive élastique, utilisée pour le nettoyage à sec, exempte de réactifs chimiques : il s'agit du Monuclean BF1®.

MODE OPÉRATOIRE

Le produit contenant une petite quantité d'ammoniaque, il est important que l'opérateur porte masque de protection, gants et autres vêtements de protection. Assurer une bonne aération en cas d'application à l'intérieur.

1. Il est le plus souvent inutile de préparer le support. Appliquer le produit à la brosse ou à l'aide d'un pistolet. La température ambiante minimale d'application est en général de 10 °C.



Application du produit à la brosse.

2. Laisser sécher l'enduit à l'abri des intempéries, jusqu'à ce que se forme un film uniforme dont la couleur est devenue brunâtre. Le temps de séchage dépend des conditions atmosphériques et de l'environnement. Il est le plus souvent compris entre 2 et 12 heures et peut atteindre 3 jours sur les applications en extérieur et 7 pour les applications en intérieur.



Séchage du film.

3. Après séchage définitif, peler le film manuellement, sans outils particuliers.

© Rewah



Retrait du film.

OBSERVATIONS ET CONSEILS

- L'application de ces produits en extérieurs implique les protections des surfaces traitées contre les intempéries et le rayonnement solaire, ainsi que le maintien de températures constantes pendant le séchage.
- Le prix de la fourniture du produit est relativement élevé par rapport aux poudres de gommage (voir fiche *Gommage*) ou aux produits chimiques (voir fiche *Produits chimiques*) : de 7 à 14 euros ht/kg.
- Comme pour tout autre procédé de nettoyage de la pierre, il est important d'effectuer au préalable des essais de convenance afin d'évaluer l'efficacité du produit.
- Différentes recherches sur le produit ont montré que celui-ci ne contient aucune matière provoquant des réactions chimiques sur les matériaux de construction les plus courants et que le nettoyage à sec est obtenu par simple action mécanique de « peeling ». Les ouvrages sont protégés de toutes altérations sauf éventuellement le risque d'arrachage d'éléments fragiles, par exemple les extrémités de sculpture.

Ponçage

Béton: résidus de peinture

- **Pierre:** encroûtements noirs, desquamation

Description du procédé

Le ponçage des façades consiste à polir ou lisser le matériau support à l'aide, le plus souvent, d'une ponceuse à disques abrasifs.

Intérêt du procédé

Le ponçage est principalement utilisé sur les façades en béton. Il permet d'égaliser les surfaces abîmées et d'éliminer des dépôts résiduels particulièrement bien accrochés au support (résidus de peinture par exemple). Il peut également servir à effectuer des petites finitions sur les façades en pierre (par exemple après la retaillé) ou en brique. Le ponçage est un procédé agressif: on retire de la matière à la structure originelle. Il est donc réservé aux façades particulièrement endommagées dont l'épaisseur permet l'ablation d'une partie de la matière.

Équipement nécessaire

Les ponceuses électriques sont le matériel le plus répandu, pour autant des outils manuels de taille de pierre peuvent être utilisés, par exemple le chemin de fer (pour les façades en pierre de taille). Il est important de vérifier que les outils mis en œuvre produisent le même aspect de finition que celui observé sur la façade avant travaux. Le mieux est de chercher les traces d'outils laissées par les premiers constructeurs, qui permettront d'identifier les moyens mis en œuvre.

MODE OPÉRATOIRE

Il est important que l'opérateur et l'environnement du chantier soient protégés des émanations de poussières, en particulier en cas de non connaissance de la toxicité des poussières. Des masques de protection de classe III doivent être portés par l'opérateur, et il faut également prévoir l'ensemble des protections individuelles obligatoires (lunettes, gants). Un bâchage des échafaudages et un système d'humidification des zones de travail permettent de minimiser les pollutions environnementales.

1. Travailler en effectuant toujours des mouvements circulaires pour limiter le plus possible les effets de vagues. Éviter de trop insister sur une zone spécifique.
2. Évacuer les poussières dégagées durant le ponçage par aspiration ou par brossage avec une brosse souple.

OBSERVATIONS ET CONSEILS

- Le ponçage, bien que mécanisé, est contrôlé manuellement. La qualité d'un bon ponçage dépend donc du savoir-faire et de l'application de l'opérateur. Une mauvaise maîtrise du procédé se traduit par l'apparition de « vagues » à la surface de la paroi poncée.
- Le principal inconvénient du ponçage est le dégagement d'importantes quantités de poussières. Il est donc important de procéder à un dépoussiérage de la façade en fin de travaux pour éviter un encrassement trop rapide de celle-ci.
- Ce procédé agressif peut avoir des effets néfastes sur la façade traitée. Dans le cas de façade en béton le risque est de mettre à nu les aciers du béton armé ; dans le cas de façade en pierre de taille, la disparition du film protecteur naturel de la pierre (le calcin) peut fragiliser la pierre. L'application d'un traitement hydrofuge, d'un traitement reminéralisant ou d'un durcisseur de surface peut se révéler utile avant la recalcification naturelle de celle-ci.
- En règle générale, les entreprises modifient de manière artisanale les ponceuses du commerce afin d'obtenir des outils assurant une bonne qualité dans la réalisation des travaux. L'entreprise Marteau S.A. a par exemple monté sur une ponceuse à disque une platine équipée de trois galets et d'une centrale d'aspiration. Ainsi la planéité parfaite du ponçage est assurée et environ 90 % des poussières sont récupérées.

**NETTOYAGE
PAR VOIE SÈCHE**

Retaille

Pierre : alvéolisation, encroûtements noirs, nitrification, délitage, desquamation, pulvérulences, dissolution

Description du procédé

La retaille consiste à purger la pierre de ses parties altérées par découpe au ciseau. Le principe est simple : sous l'effet du coup de masse (ou de marteau têtu) qui lui est appliqué, une chasse (ou un ciseau) sectionne la pierre par cisaillement. La direction de la césure est influencée par la position du ciseau sur la pierre, la force du coup de masse et la nature de la pierre elle-même. La retaille de la pierre peut être associée à d'autres procédés de nettoyage mécanique à vif, mettant en œuvre une ponceuse à disque ou un chemin de fer (voir fiche Ponçage), qui permettent d'enlever par ablation une certaine épaisseur de la pierre.



| Tailleur de pierre au cours d'une démonstration.

Intérêt du procédé

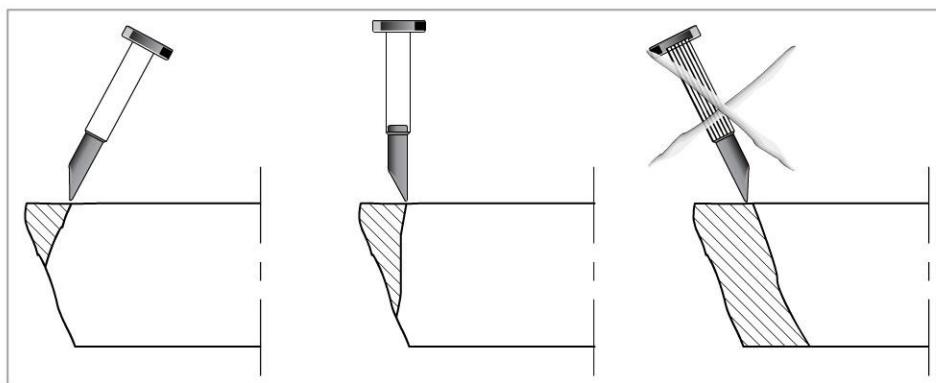
Cette technique est réservée aux façades dont la pierre est particulièrement endommagée. La pierre doit avoir une épaisseur suffisante pour permettre la retaille.

Moyens de mise en œuvre

Ce procédé nécessite une main-d'œuvre qualifiée, il est donc fortement recommandé de faire effectuer les travaux par des entreprises spécialisées.

MODE OPÉRATOIRE

1. Si la pierre à traiter n'est pas encastrée dans la façade, la poser à plat sur une matière absorbante incompressible, du sable par exemple, qui en épouse la forme. On évite ainsi que les chocs violents de la retaille cassent la pierre.
2. Choisir la chasse. Pour les pierres fermes (pierre dont la moyenne des résistances à l'écrasement se situe entre 276 et 520 kg/cm²), la chasse a un angle de coupe de 80 à 85°, une largeur assez réduite (environ 30 à 50 mm) et un tranchant de 5 à 6 mm. Ainsi, la surface portante de la chasse étant réduite, le coup de masse a un effet plus pénétrant. On tient le raisonnement inverse pour la chasse à pierre tendre : la largeur de la chasse peut être plus grande et le tranchant plus fin, l'angle de coupe ne variant pas.
3. Déterminer l'angle de coupe. Cette étape est importante car un angle mal choisi risque de casser la pierre. Le plus sûr est d'utiliser des angles les plus ouverts possible.

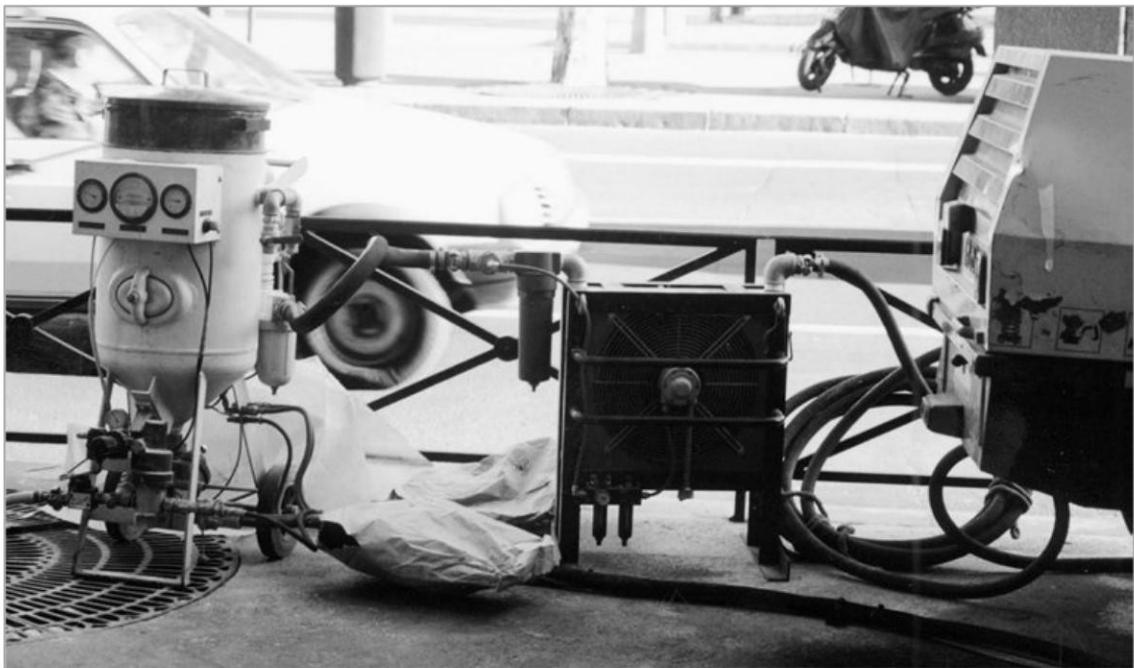


Angle de coupe de la chasse à adopter.

4. Procéder à la finition en fonction du type de parement souhaité. Le plus souvent une finition douce au papier de verre est réalisée après un dégrossissement vulgaire des coupes au chemin de fer. Différentes finitions peuvent être ajoutées (voir partie *Observations et conseils* de cette fiche).

OBSERVATIONS ET CONSEILS

- Pour le parement, on peut chercher à obtenir différentes finitions:
 - éclaté (pierres fermes) : le parement est travaillé à l'aide d'un tête ou d'une chasse. Dans les maçonneries appareillées, les arêtes sont généralement taillées en retrait de manière à former un bombement irrégulier ;
 - piqué (pierres demi-fermes) : le parement est aplani à la broche mais on laisse des traces du piquage ;
 - layé (pierres tendres) : le parement est dressé à la laie ou au ciseau, et garde une partie des traces laissées par les outils de taille.
- Le procédé de retaille de la pierre est proscrit sur les monuments historiques, pour lesquels la lisibilité de l'œuvre doit rester intacte. C'est pourtant l'un des seuls moyens (avec le ruissellement d'eau, voir fiche *Ruisseaulement d'eau*) permettant d'enlever les croûtes de sulfin nocif pour la pierre. Pour des bâtiments classés ou inscrits, cette méthode devra être acceptée par les architectes des Monuments historiques; pour des bâtiments en secteur sauvegardé, elle devra l'être par les architectes des Bâtiments de France. Quel que soit le niveau de protection administrative d'un édifice ou de sa préciosité, les propriétaires utilisant ce procédé peuvent demander aux entreprises de fournir les plans avant et après travaux des zones retaillées, ce qui permet de garder la trace des éléments retouchés.
- On peut profiter des opérations de零售 pour pallier certains manquements dans les dispositions constructives: mettre en place des bavettes de recouvrement en zinc, remplacer les pierres altérées par d'autres plus saines (voir fiches *Substitution par pierre artificielle* et *Substitution par pierre identique*), procéder à une réfection des joints (voir fiche *Restauration des joints rigides (pierres de taille)*), etc.



© G. Vallière

2.5 Nettoyage par projection de matière

Les procédés présentés ici permettent de nettoyer les surfaces encrassées par projection sous pression de particules abrasives. On distingue deux grands types de nettoyage par projection de matière :

- les projections « dures » (voir fiches *Sablage* ou *Hydrosablage*), de moins en moins utilisées pour le nettoyage des façades car pouvant causer d'importants dommages sur les supports fragiles. Le nettoyage est obtenu par percussion, c'est-à-dire par impact direct de poudres de forte granulométrie ou de sable (le plus souvent à base de silice).
- les projections « douces » (voir fiches *Gommage* ou *Hydrogommage*), très couramment employés aujourd'hui. Ce type de projection se fait avec des poudres très fines (microbilles de calcite, silicium, noyaux de fruits concassés, etc.), qui ont tendance à diverger sur l'obstacle. Le nettoyage est donc obtenu non par percussion ou impact direct, mais par frottements successifs.

Gommage	p. 122
Hydrogommage	p. 126
Sablage à sec	p. 129
Sablage hydropneumatique	p. 131
Microsablage	p. 134

Gommage

Béton: salissures noires, salissures vertes • **Brique**: salissures noires, salissures vertes • **Pierre**: salissures noires, salissures vertes

Description du procédé

Le gommage consiste à projeter à sec une poudre microfine grâce à de l'air comprimé. L'opération s'effectue sans addition de produits détergents ou chimiques.



© Thomann-Hanny

| Gommage en cours d'une façade.

Intérêt du procédé

La technique du gommage est bien adaptée lorsque le mur, trop mince (moins de 20 cm) ou trop poreux, ne permet pas l'utilisation des méthodes de nettoyage hydraulique. Elle sert en particulier à nettoyer des façades encrassées par la pollution atmosphérique, les poussières, les salissures vertes superficielles, et peut permettre d'éliminer les badigeons. Par contre ce procédé ne permet pas de purger la pierre en profondeur, pour éliminer du sulfin nocif par exemple.

Choix des poudres

Les poudres doivent assurer un nettoyage efficace tout en respectant les matériaux et les ouvrages sculptés. Trois critères principaux doivent être pris en compte : la nature de la substance à enlever, la nature du support et le degré d'encrassement. Il est impératif de faire des essais sur le support qui valideront les choix effectués. La pression de projection doit elle aussi faire l'objet d'une réflexion approfondie. Attention : bien que le gommage soit plus doux que le sablage, de mauvaises conditions d'application pourraient endommager l'épiderme du support à nettoyer.

TYPE DE POUDRE	FORME DES PARTICULES	INDICE DE DURETÉ	DIAMÈTRE
Alumine	Anguleuse	9 (très dur)	10 à 50 µm
Billes de verre	Ronde ou anguleuse	7 (dur)	30 à 50 µm
Calcite broyée	Ronde ou anguleuse	2,5 à 3 (doux)	40 à 500 µm
Noyaux de fruits broyés	Très irrégulière	< 3 (très doux)	500 µm

MODE OPÉRATOIRE

Les protections d'hygiène et de sécurité varient en fonction de la nature des poudres à projeter, des substances à enlever et des conditions de mise en œuvre (sculptures, façades, etc.) : du simple masque anti-poussière associé à des lunettes de protection, à la combinaison intégrale en tissu indéchirable (type Tyvek® par exemple) avec masque anti-poussière de classe III, ou encore cagoule ventilée autonome avec filtration intégrée.

1. Projeter la poudre en s'assurant que la buse de projection est toujours en mouvement, de préférence des mouvements circulaires. En effet, le flux d'air comprimé projeté sur la façade ayant tendance à diverger sur l'obstacle, les particules très fines de la poudre s'éparpillent de la même manière. Ainsi le nettoyage est obtenu non pas par percussion ou impact direct de granulats de plus forte granulométrie, mais par frottements successifs.
2. Lorsque la puissance d'aspiration est suffisante et que les paramètres granulométrie-pression-distance-temps d'application sont parfaitement réglés, il n'y a pas de résidus piégés dans le calcin. Un simple dépoussièrage à l'air des appuis et bandeaux est suffisant. L'utilisation de l'eau en phase finale fait perdre le bénéfice d'un procédé à sec (risques d'infiltration) et pourrait piéger les poussières dans la porosité.

OBSERVATIONS ET CONSEILS

- Le nettoyage par gommage est un procédé complexe, pour lequel il faut faire appel à des professionnels qualifiés.
- Il peut être utile de faire des prélèvements sur les pierres avant, pendant et après les travaux de nettoyage, qui permettent de suivre l'évolution des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques de la façade (altération du calcin, porosité augmentée, etc.).
- Lorsque les conditions d'application ne sont pas adéquates, ce procédé peut induire un effet « nuagé des façades », c'est-à-dire des zones plus ou moins claires sur la façade
- Un autre inconvénient est celui des poussières dégagées et de la dispersion de la poudre de projection dans l'environnement, en particulier en milieu urbain. En effet, la technique du gommage implique l'utilisation d'une grande quantité de poudre. Un bâchage étanche sur échafaudage est indispensable. La société Thomann-Hanry a mis au point une cabine ventouse® permettant à la fois de s'affranchir des échafaudages et de confiner les poussières dans une cabine aspirante. Les poudres récupérées sont ensuite humidifiées puis décantées pour être évacuées dans des décharges de classe I (gravats propres).
- La société Hydroconcept a mis au point un procédé de fabrication de micro-sphère de calcium résultant d'un procédé de croissance microcristalline en phase gazeuse dans des réacteurs de très grande taille (hauteur 170 m, diamètre 50 m) fournissant des températures allant de 680 °C à –20 °C. Ces poudres de projection ont l'avantage de ne pas être nocives.

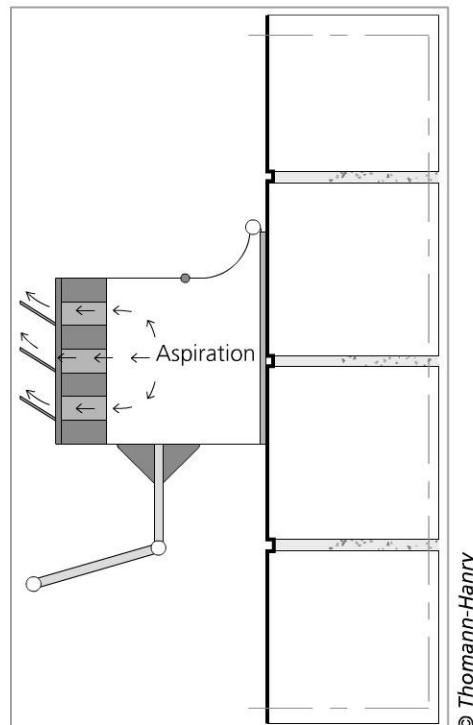


Schéma de principe de la cabine ventouse Thomann-Hanry®.

© Thomann-Hanry

ERREURS À ÉVITER



Projection trop forte sur une façade : on obtient un nuagé, le calcin est endommagé complètement ou par partie (trous).



Projection trop forte sur une moulure : la moulure est complètement usée.

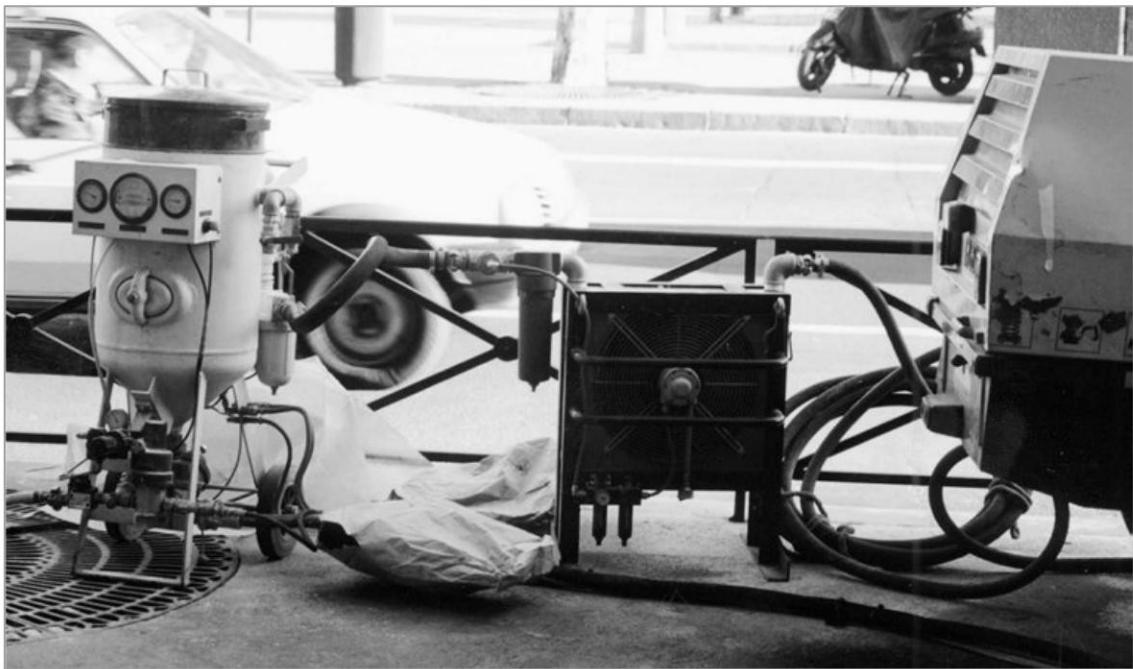
NETTOYAGE PAR
PROJECTION DE MATIÈRE

Hydrogommage

Béton: salissures noires, résidus de peinture • **Brique**: encroûtements noirs, salissures noires • **Pierre**: encroûtements noirs, salissures noires

Description du procédé

Comme le gommage (voir fiche *Gommage*), l'hydrogommage s'appuie sur la projection à basse pression (moins de 0,2 MPa) d'agrégats de très faibles granulométries, doux et fins (poudre de grès, craie, microfine de verrerie, etc.); mais l'agrégat est ici projeté avec un mélange eau/air. L'effet de l'hydrogommage est double: le lavage à l'eau permet de ramollir et d'emporter les salissures, et les poudres nettoient le support par abrasion.



© G. Vallière

| *Hydrogommeuse.*

Intérêt du procédé

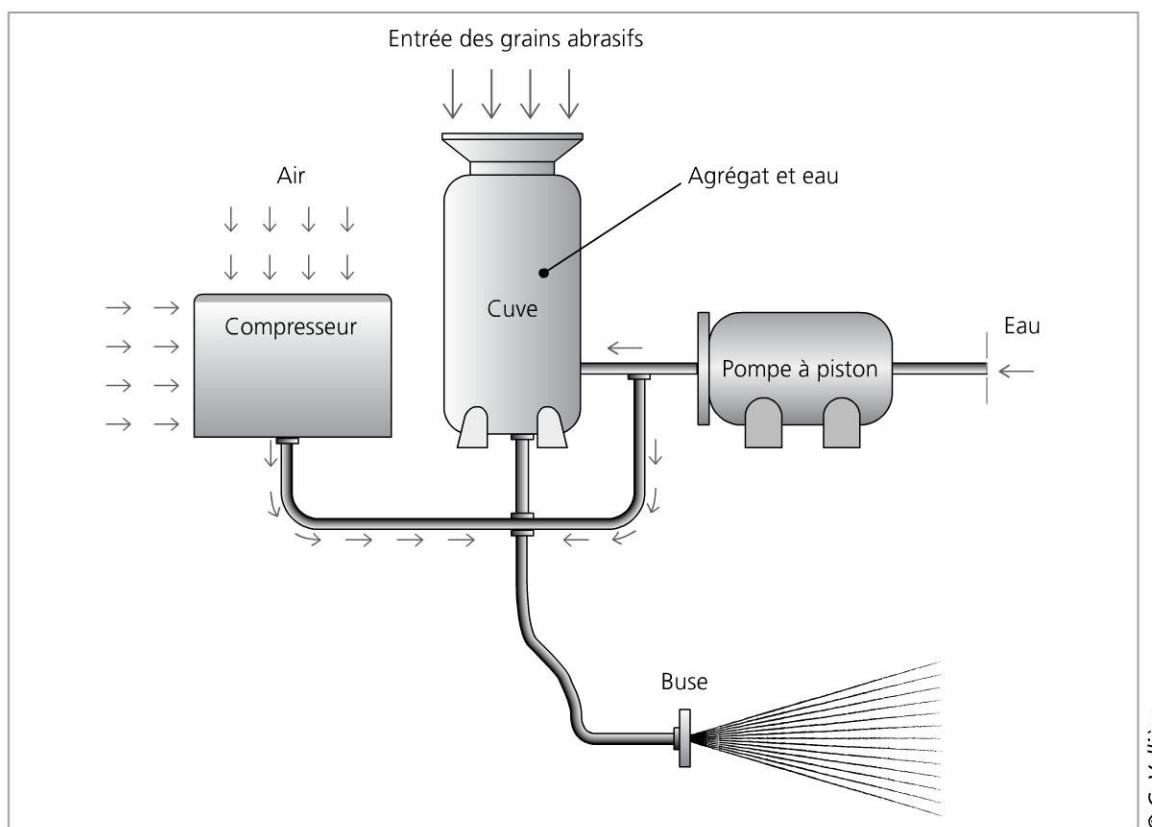
L'hydrogommage permet de nettoyer des façades encrassées par la pollution urbaine. Il peut également se révéler très efficace pour éliminer les peintures, les

badigeons et même les graffitis. Ce procédé est particulièrement adapté aux zones dans lesquelles la dispersion de poussières pourrait être problématique (lieux fermés, etc.): grâce l'action de l'eau, la dispersion de poussières est bien moins importante que lors du gommage.

Choix des poudres et moyens de mise en œuvre

Ce choix est particulièrement délicat: il s'agit de réaliser un bon nettoyage sans endommager l'épiderme du support (voir fiche *Gommage*). De même, la pression de projection a une grande importance pour la réussite du traitement. Elle est fonction de la dureté du support, de son degré d'enrassement et du type de grain abrasif choisi. Dans tous les cas, il est impératif de faire au préalable des essais sur le support, qui valideront les choix effectués.

Dans l'hydrogommeuse, le compresseur d'air assure le fonctionnement d'une pompe à eau qui maintient le mélange en pression. Une arrivée d'eau en fond de cuve empêche le colmatage du mélange des agrégats. Il est souvent indispensable d'ajouter un dispositif de séchage des agrégats afin d'éviter des bourrages dans la lance de projection.



| Principe de fonctionnement de l'hydrogommeuse.

© G. Vallière

MODE OPÉRATOIRE

Les ouvriers doivent être protégés avec des vêtements imperméables, des masques à cartouche d'air, des gants. Des vêtements de protection conçus pour les travaux de sablage (combinaison avec cagoule en tissu micro-perforé et indéchirable de type Tyvek®) sont en vente dans les commerces spécialisés en équipement de sécurité ou de protection individuelle pour le bâtiment. Pour autant la très faible nocivité de certaines poudres (traces infimes de silices) permet d'éviter l'utilisation des équipements de protection coûteux et encombrants obligatoires pour des travaux de sablage.

1. Mettre en place des bâches de protection autour du périmètre de projection pour éviter la dispersion du sable ayant rebondi sur la façade. Ces bâches peuvent être fixées sur l'échafaudage.
2. Charger les agrégats (80 %) dans la cuve avec de l'eau (20 %).
3. Projeter en commençant par le haut de la façade: ainsi, les particules de poudre ruissellent avec l'eau. Utiliser d'abord une pression faible (environ 0,01 MPa), puis l'augmenter si nécessaire. Le débit et la pression se règlent soit sur le tableau de bord de la cuve, soit au niveau de la lance.

OBSERVATIONS ET CONSEILS

- Il peut être avantageux d'utiliser une eau « dure » pour augmenter son pouvoir dissolvant, améliorant ainsi l'efficacité du traitement des sels solubles et des croûtes noires. Une eau dure est une eau qui contient beaucoup de calcaire dissous, sous forme de sels de calcium (le carbonate de calcium ou calcaire par exemple) ou de magnésium. La dureté d'une eau s'exprime en degrés français (°F): 0 à 18 °F pour une eau douce, 18 à 30 °F pour une eau mi-dure, 30 et au-delà pour une eau dure ; à Paris, la dureté de l'eau se situe entre 20 et 30 °F.
- La consommation de poudre est moindre que lors du gommage à sec du fait de l'apport d'eau, mais un important nettoyage du sol après intervention est à prévoir.
- Des techniques avancées utilisent des billes composées essentiellement de carbonate de calcium. Projectées à basse pression, elles balaiennent la façade et entraînent en roulant les salissures. Ce procédé semble avoir un avenir prometteur car, en raison de leur finesse, certaines microsphères viennent se fixer au niveau des capillaires et des interstices du support, débutant ainsi le processus de régénération du calcin.

Sablage à sec

Béton : résidus de peinture, salissures vertes, salissures grasses

Description du procédé

Ce traitement consiste à projeter du sable ou des grains abrasifs sur la surface à nettoyer.

Intérêt du procédé

Le sablage à sec est d'une grande efficacité pour décaper les salissures les plus tenaces, mais il est très abrasif et peut abîmer la façade. C'est pourquoi cette méthode est de moins en moins utilisée, voire totalement proscrite par les prescripteurs de travaux (architectes, maîtres d'œuvre, etc.). Elle est remplacée par le gommage (voir fiche *Gommage*). Le sablage à sec peut cependant se révéler utile dans des cas particulièrement difficiles : résidus de peinture, lichens, encroûtements, etc.

Choix des poudres

Les sables siliceux calibrés et tamisés, la silice, l'alumine, le corindon, l'olivine (silicate de fer et de magnésie) sont les poudres les plus utilisées. La nature, la masse volumique et la forme des particules projetées doivent être prises en compte lors du choix des poudres.

MODE OPÉRATOIRE

Les ouvriers doivent être protégés avec des vêtements imperméables (type sca-phandre), des masques avec cartouche d'air, des gants. Il existe des vêtements de protection spécialement conçus pour les travaux de sablage.

1. Installer des bâches de protection autour du périmètre de projection pour éviter la dispersion du sable projeté sur la voirie après avoir rebondi sur la façade. Ces bâches peuvent être fixées sur l'échafaudage. D'une manière générale, isoler au maximum le chantier des poussières nocives. Pour éviter la projection de grains abrasifs sur les vitrages, disposer des mannequins (c'est-à-dire des cadres en bois plein) positionnés au droit des baies.

2. Procéder au sablage. Les opérations peuvent débuter sans travaux préparatoires. La pression du jet, la distance au parement et la durée d'application permettent de faire varier la nature du traitement. Les pressions d'air comprimé ne devraient jamais excéder 3 kg/cm² sur les pierres tendres et les briques, et 10 kg/cm² pour les pierres dures et les bétons. Les risques de ravinement ou d'alvéolisation sont accentués lorsque l'ouvrier novice reste trop longtemps sur les parties à traiter et tient sa lance de projection perpendiculairement à la façade.
3. Rincer à grande eau la façade : il faut éviter que les grains de la poudre de projection (le plus souvent de la silice) ne restent collés sur le support.

OBSERVATIONS ET CONSEILS

- L'expérience et la dextérité des opérateurs chargés du sablage sont fondamentales car ce procédé très abrasif peut abîmer la façade. Quoi qu'il en soit, la rectitude des arêtes ou des bandeaux et la planéité du support n'est jamais totalement respectée. En outre cette méthode élimine la totalité du calcin protecteur, qui forme une couche très dure de protection de la pierre, la rendant plus sensible aux intempéries et à la pollution atmosphérique. Un traitement de reminéralisation hydrofuge (type Wacker OH® ou Technipac H®) est indispensable pour protéger la façade de manière temporaire, en attendant que le calcin se reforme.
- La législation française interdit le sablage à sec à l'air libre si l'abrasif utilisé pour la projection contient plus de 5 % de silice libre. Ce produit peut en effet causer une maladie grave, la silicose. Dans l'industrie, ce procédé est utilisé si le travail est effectué dans un milieu entièrement clos et étanche ; il permet d'effectuer par exemple le sablage des profilés en aciers et des coques de bateaux.

Sablage hydropneumatique

Béton: salissures noires, résidu de peinture • **Brique**: encroûtements noirs, salissures noires • **Pierre**: encroûtements noirs, salissures noires

Description du procédé

Le sablage hydropneumatique consiste à projeter à basse pression un mélange de grains abrasifs et d'eau sur la surface à nettoyer. Il s'agit donc d'une méthode de nettoyage par abrasion de matière, la pierre est nettoyée en profondeur. Une partie du calcin protecteur est arrachée dans le processus, mais ce phénomène est quelque peu adouci par l'utilisation d'eau. Le sablage hydropneumatique est similaire au sablage (voir fiche *Sablage à sec*), la projection d'eau en plus, et à l'hydrogommage (voir fiche *Hydrogommage*), mais les poudres de projection utilisées sont beaucoup plus douces et fines dans le cas de l'hydrogommage.

La qualité du nettoyage dépendra des différents paramètres suivants :

- la taille, le grain et la dureté des poudres utilisées;
- la quantité d'eau projetée;
- la pression de sortie des granulats par l'intermédiaire de la pression de l'air comprimé;
- la distance entre la lance de projection et la façade.



© G. Vallière

Cuve d'une sableuse hydropneumatique.

Intérêt du procédé

Le sablage hydropneumatique est d'une grande efficacité pour décaper les salissures les plus tenaces, mais il est très abrasif et peut abîmer la façade. C'est pourquoi cette méthode est de moins en moins utilisée, voire totalement proscrite par les prescripteurs de travaux (architectes, maîtres d'œuvre). Elle est remplacée par le gommage (voir fiche *Gommage*). Cependant, dans des cas particulièrement difficiles, elle peut se révéler utile : résidus de peinture, lichens, encroûtements, etc.

Grâce à l'utilisation d'eau, le sablage hydropneumatique permet une moindre dispersion des poudres projetées et une meilleure efficacité contre les croûtes noires que le sablage à sec (voir fiche *Sablage à sec*).

Choix des poudres

Caractéristiques de différentes poudres

NATURE DE LA POUDRE	DIAMÈTRE (microns)
Sable anguleux	100 à 300
Poudre de verre	600 à 1 400
Poudre d'oxyde d'alumine	600 à 2 360

MODE OPÉRATOIRE

Protéger les ouvriers par des vêtements imperméables, des masques avec cartouche d'air, des gants. Il existe des vêtements de protection spécialement conçus pour les travaux de sablage.

1. Mettre en place des bâches de protection autour du périmètre de projection pour éviter la dispersion du sable projeté sur la voirie après avoir rebondi sur la façade. Ces bâches peuvent être fixées sur l'échafaudage. D'une manière générale, isoler au maximum le chantier.
2. Projeter le mélange air/sable/eau en prenant soin de tenir la lance de projection à plus d'1 m de la façade. Il est impératif d'effectuer au préalable des essais pour régler au mieux la machine. On règle en général la pression de l'air à moins de 3 kg/cm² pour les pierres tendres et moins de 10 kg/cm² pour les pierres dures.
3. Rincer à grande eau la façade pour éviter que les grains de la poudre de projection (le plus souvent de la silice) ne restent collés sur le support.
4. Ramasser le sable projeté lors des opérations de nettoyage car celui-ci peut être nocif pour l'environnement, en particulier lorsque les poudres contiennent de la silice libre en grande quantité. Le sable utilisé peut éventuellement être recyclé.

OBSERVATIONS ET CONSEILS

- Il peut être avantageux d'utiliser une eau « dure » pour augmenter son pouvoir dissolvant, améliorant ainsi l'efficacité du traitement des sels solubles et des croûtes noires. Une eau dure est une eau qui contient beaucoup de calcaire dissous, sous forme de sels de calcium (le carbonate de

calcium ou calcaire par exemple) ou de magnésium. La dureté d'une eau s'exprime en degrés français (°F): 0 à 18 °F pour une eau douce, 18 à 30 °F pour une eau mi-dure, 30 et au-delà pour une eau dure. À Paris par exemple, la dureté de l'eau se situe entre 20 et 30 °F.

- Cette méthode enlève par abrasion tout ou partie de l'épaisseur du calcin, qui forme une couche très dure de protection de la pierre. De ce fait, la pierre est moins protégée contre les intempéries et la pollution. Un traitement de reminéralisation hydrofuge (type Wacker OH® ou Technipact H®) est obligatoire pour protéger la façade temporairement; le calcin se reforme ensuite graduellement, de manière naturelle.
- La parfaite rectitude des arêtes de bandeau, les corniches et moulures, la planéité des grands panneaux sont difficiles à préserver du fait de l'abrasion de la surface nettoyée.
- Certaines poudres contiennent du silice, produit nocif pour la santé. Leur utilisation est déconseillée.
- Cette méthode, par son procédé abrasif destructeur et violent (éclats de pierres ou de briques) et par la toxicité des poudres utilisées (silice), est aujourd'hui de moins en moins utilisée par les maîtres d'œuvre du bâtiment. Elle est même interdite par les architectes des Monuments historiques, qui redoutent les dommages qu'elle peut induire. Les méthodes d'hydrogommage (voir fiche *Hydrogommage*) ou de nettoyage à haute pression (voir fiche *Nettoyage haute pression*) semblent avoir pris le pas sur ce procédé. Cependant la rapidité du sablage hydropneumatique et son efficacité dans le décapage des encroûtements et des sels nocifs sont des éléments qui peuvent justifier l'emploi de cette technique.

Micsablage

- Brique : encroûtements noirs, salissures noires, salissures vertes*
• *Pierre : encroûtements noirs, salissures noires, salissures vertes*

Description du procédé

Le micsablage consiste à nettoyer une surface par projection constante et sous forte pression d'air comprimé chargé de particules abrasives. C'est une méthode de nettoyage à sec, il n'y a donc pas de pénétration d'eau qui pourrait endommager le support.



| *Micsablage en cours sur les détails d'une sculpture.*

Intérêt du procédé

Si le gommage ou l'hydrogommage permettent de traiter de grandes surfaces, la petite buse utilisée pour le micsablage est adaptée à un travail fin et précis. Ce procédé est d'ailleurs très employé en restauration des ouvrages sculptés et travaillés. Il est particulièrement efficace pour éliminer les croûtes peu épaisses (moins de 2 mm).

Choix des poudres

Ce choix est déterminant car il conditionne la vitesse et le type d'abrasion : la taille, le grain et la dureté font varier, à pression égale, le travail effectué. En général les poudres utilisées sont des sables fins obtenus par tamisage et riches en quartz (dureté 7 sur l'échelle de Mohs). Les silex concassés (dureté 7-8 sur l'échelle de Mohs) donnent des poudres plus dures et plus coupantes. Sur les chantiers exceptionnels où des éléments sculptés sont à traiter, on utilise des poudres très peu abrasives comme les noyaux d'abricot ou de pêche concassés.

Caractéristiques de différentes poudres

TYPE DE POUDRE	FORME DES PARTICULES	INDICE DE DURETÉ (échelle de Mohs ¹)	DIAMÈTRE (microns)
Alumine	Anguleuse	9 (très dur)	40 à 150
Billes de verre	Ronde ou anguleuse	7 (dur)	30 à 200
Calcite broyé	Ronde ou anguleuse	4 (doux)	40 à 500
Noyaux de fruits broyés	Très irrégulière	< 3 (très doux)	500

1. L'échelle inventée par Mohs va de 1 pour le talc à 9 pour le diamant.

Source : documentation technique société Hydroconcept.

L'appareil de projection est constitué d'un réservoir contenant la poudre abrasive, relié à un système de projection et de mélange dans le gaz (en général de l'air mais parfois aussi de l'azote ou du gaz carbonique). La fine granulométrie des poudres nécessite la pulvérisation d'azote ou d'air déshydraté pour éviter l'obstruction de la buse. Le problème reste avant tout la possession d'une machine efficace et adaptée, que seuls quelques professionnels de la statuaire possèdent.

MODE OPÉRATOIRE

- Si le support n'est pas trop encrassé, procéder à un dépoussiérage (brosse et ruissellement d'eau, voir fiche *Ruisseaulement*). Autrement faire un nettoyage complet des grandes zones peu ouvrageées, par gommage ou hydrogommage (voir fiches *Gommage* et *Hydrogommage*). Le microsablage est réservé pour les zones ouvrageées.
- La distance de projection de la buse au support varie entre 2 et 6 cm. Contrôler à tout moment le travail effectué afin d'ajuster si nécessaire les pressions du fluide et la distance de projection.

3. Parachever le microsablage par un nouveau dépoussiérage à la brosse, éventuellement accompagné d'une projection d'eau.

OBSERVATIONS ET CONSEILS

- Certaines poudres peuvent être toxiques à inhaler, il est donc important de protéger l'opérateur. Il doit travailler avec une combinaison de protection et respirer à l'aide d'un masque équipé d'un filtre à air. Les poudres contenant plus de 5 % de silice sont interdites à cause des risques de silicose.
- Le microsablage étant une méthode abrasive, il faut veiller à ce qu'il ne constitue pas un facteur de dégradation et d'usure du parement à nettoyer. Ce procédé enlève toujours une part de la matière, ce qui peut nuire aux lignes sculptées. En cas de microsablage trop grossier, le risque est d'éliminer le calcin protecteur et d'augmenter la rugosité en façade. Il est donc primordial de bien déterminer la nature de la poudre et la pression de projection, et d'effectuer des essais préliminaires.
- Le microsablage ne permet de nettoyer que quelques cm² à l'heure. C'est donc un procédé lent, réservé aux zones ouvragées dans lesquelles seule une petite buse peut pénétrer.



Projection en cours.



2.6 Stabilisation

Rénover une façade n'est pas un acte anodin et tout client ou maître d'ouvrage souhaite que les effets des travaux durent le plus longtemps possible. Sont décrits dans cette partie des traitements permettant une stabilisation durable de l'édifice : il s'agit de traiter les causes des pathologies et non de simplement donner un « coup de propre ». En effet il est vain de nettoyer des traces d'humidité sur un mur si les causes de cette humidité ne sont pas traitées au préalable (voir fiche *Humidité*), une fissure mal rebouchée risque de faire pénétrer de l'eau dans le bâtiment et de continuer à évoluer (voir fiches *Traitements des fissures par injection* et *Traitements des fissures par colmatage*), un mur qui « prend du ventre » ou menace de s'écrouler doit être conforté par injection de coulis ou être renforcé par mise en place de tirants noyés (voir fiche *Consolidation par harpes et tirants noyés*).

Traitements de l'humidité provenant du sol	p. 138
Traitements de l'humidité provenant de l'eau de pluie	p. 145
Consolidation par harpes et tirants noyés	p. 148
Traitements des fissures par injection	p. 152
Traitements des fissures par colmatage	p. 159

Traitements de l'humidité provenant du sol

Béton : efflorescences, humidité • Brique : efflorescences, humidité, remontées capillaires • Pierre : nitrification, humidité, remontées capillaires, efflorescences

Lorsque l'humidité affectant un mur provient du sol, la première chose à faire est d'établir un diagnostic précis pour connaître la nature exacte du problème : pourcentage d'humidité dans la maçonnerie, porosité des maçonneries, caractéristiques chimiques de la pierre, nature des liants, capacité d'absorption du support, présence de sels, etc. Sont présentées ci-dessous les méthodes les plus utilisées dans le traitement des remontées capillaires.

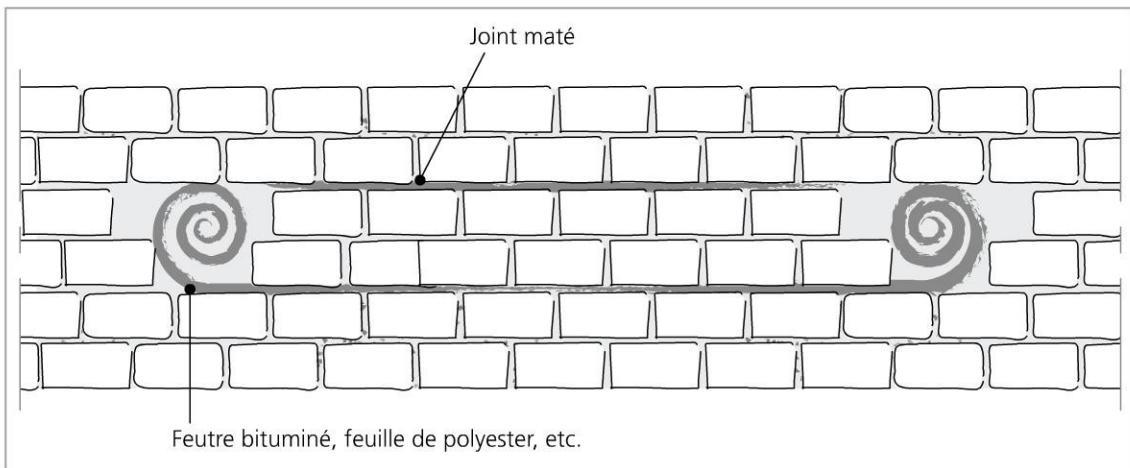
DIFFÉRENTS TRAITEMENTS

Arase étanche

La technique la plus courante de traitement consiste à scier le mur pour y introduire une barrière étanche (feuilles de polyester, aluminium, mastic à base d'asphalte, etc.). Ce travail se fait par panneaux alternés et peut être réalisé à l'aide d'une grande disqueuse à eau équipée d'un disque diamant, outil qui assure des profondeurs de sciage d'au moins 20 cm. Ne peuvent être traitées ainsi que des maçonneries homogènes (c'est-à-dire d'un seul bloc massif), à joints réguliers et d'épaisseur limitée.



| Arase étanche en cours de réalisation.



| Coupe de principe d'une arase étanche.

Déshydratation

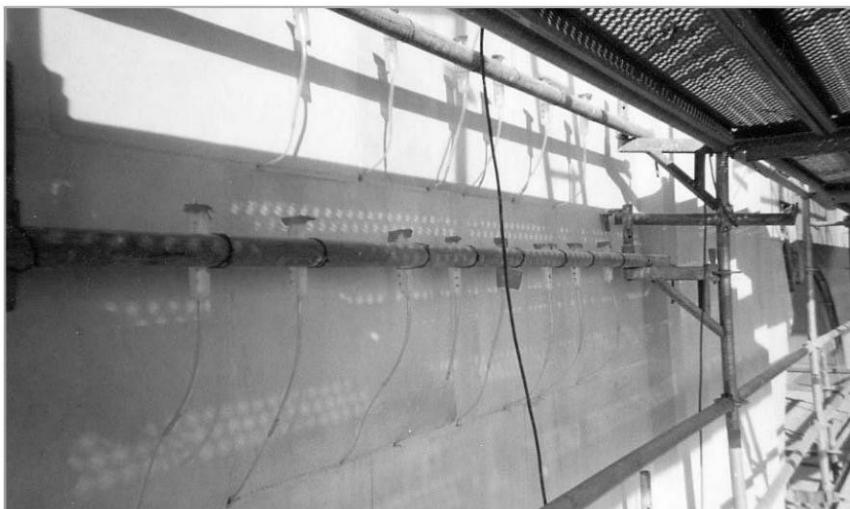
Le principe est simple : un déshydrateur équipé d'un ventilateur envoie de l'air chaud et sec, qui se charge d'humidité au contact du milieu ambiant. Dans le déshydrateur, l'air est mis en contact avec des cristaux de sel hygroscopiques, pouvant capter la quasi-totalité de la vapeur d'eau.

La déshydratation est une mesure d'accompagnement à l'injection directe dans le support de produits chimiques (voir ci-dessous *Injection*). En effet l'injection de ces produits doit se faire dans des conditions précises d'humidité et de température. Concrètement, un polyane (bâche plastique) est tendu sur la zone à traiter et la buse de sortie est glissée dessous. La puissance totale nécessaire des machines (capacité de 30 à 1 000 l/jour) dépend de l'estimation de la quantité d'eau, de la perméabilité du matériau à assécher et du volume du local.

Injection

Ce procédé consiste à injecter dans la maçonnerie des produits chimiques imperméabilisants ou hydrofuges afin de créer des barrières étanches qui empêcheront les remontées d'eau par capillarité. Il faut commencer par percer à la base du mur à traiter des trous espacés de 10 à 20 cm, répartis sur une ou deux rangées (en fonction de l'épaisseur du mur). Les murs de plus de 40 cm d'épaisseur nécessitent d'être injectés depuis les deux faces. La quantité de produit injecté est fonction de la porosité des matériaux ; elle est en moyenne de 1,5 l par mètre linéaire de mur et pour 10 cm d'épaisseur. Les produits utilisés peuvent être du polysiloxane à ramifications courtes modifiées potentialisé par un trioxy-stéarate d'aluminium en solution. La très faible tension de surface de la molécule lui permet une migration efficace, notamment dans les matériaux poreux contaminés par les sels solubles.

On utilise pour l'injection des pompes basse et haute pression de type Techniflow®, équipées de manomètres réglables et de régulateurs de débit horaire. Des cannes d'injection avec compteur de passage permettent un contrôle précis des volumes injectés. Bien que moins rapide, l'injection par gravité peut être préférable car elle évite la dislocation de certains matériaux et favorise une bonne répartition du produit dans la zone traitée.



Injection sous pression.

L'efficacité du traitement est conditionnée par :

- la qualité des forages (emplacement, espacement et profondeur des trous) ;
- la maîtrise de l'injection (contrôle des quantités injectées par compteur de passage) ;
- la continuité de la barrière anticapillaire ;
- le choix du produit.

La composition spécifique du produit d'injection (souvent à base de résines et de polymères hydrophobes) doit garantir une bonne diffusion dans tous les supports sans que celle-ci soit influencée par la nature du support, sa structure (cavités), sa teneur en eau, sa teneur en sels ou la nature de ces sels.

Le diagnostic s'effectue à l'aide d'un hygromètre MK3, DGT ou SM, qui permet d'obtenir rapi-



© ATB-Technichem

Appareil de mesure.

dément un grand nombre de mesures à différents endroits. En effet, la migration d'eau par remontée capillaire se caractérise par un pourcentage maximal d'eau à la source (en bas du mur) et une diminution progressive de la teneur en eau au fur et à mesure qu'on remonte vers le haut du mur, jusqu'à une valeur minimale d'équilibre à environ un mètre de hauteur.

Attention, certains appareils de mesure enregistrent un courant électrique entre deux électrodes de l'appareil enfonce dans quelques millimètres dans le support. Or la présence de sels influence la mesure du courant électrique et donc le relevé. Seule la mesure du « poids d'eau » dans les maçonneries, effectuée en laboratoire après prélèvement, peut donner un résultat totalement fiable en ce qui concerne la teneur en humidité des maçonneries.

© ATB-Technichem



| Testeur thermo-hygromètre.

© ATB-Technichem



| Pompe pour injection.

© ATB-Technichem



| Kit injection digital.

© ATB-Technichem



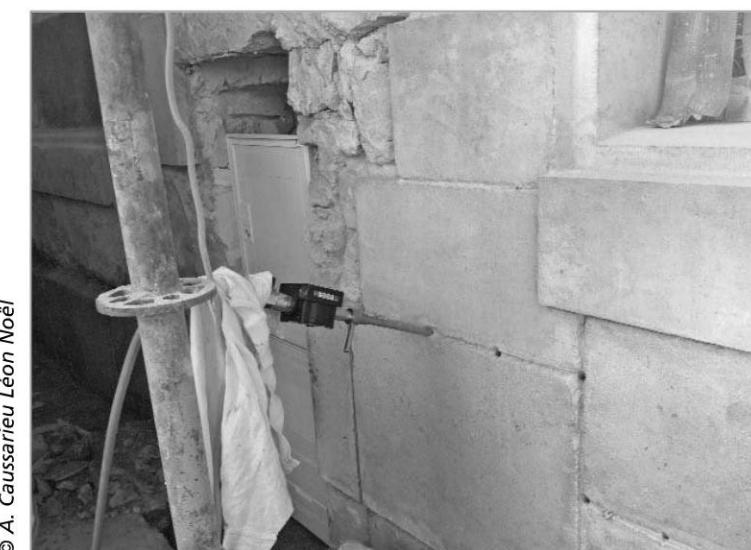
| Humidimètre Protimeter®.

MODE OPÉRATOIRE

- Mesure préalable de la teneur en eau en différents endroits localisés
- Définition des travaux préparatoires
- Localisation des zones de forage et d'injection
- Définition d'un plan de forage et des phases d'injection
- Détermination de la quantité et du type de produit d'injection par mètre linéaire de mur traité (en fonction de l'épaisseur et de la nature des murs concernés)
- Dégagement de la zone proche du mur où est prévue l'injection (meubles, tapis... si nécessaire enlever également les plinthes et les radiateurs)
- Protection des sols, murs et autres éléments pouvant être souillés par le produit d'injection
- Élimination de l'enduit intérieur jusqu'à 60 cm au-dessus de la barrière anti-capillaire (fortement conseillé : cela permet de bien situer les joints pour le forage, d'accélérer le séchage du mur et d'éliminer la partie de l'enduit la plus contaminée par les sels)
- Traitement et réparation des dégradations de la maçonnerie

En fonction de la nature des ouvrages et de l'importance des travaux, une procédure de suivi de l'efficacité du traitement peut être demandée. Sauf spécification contraire lors du traitement, le taux d'humidité à cœur du mur doit être inférieur à 5 % après une période de séchage de 6 à 12 mois.

La plupart des barrières étanches sont efficaces après 48 heures, toutefois la durée de l'assèchement du mur (6 à 12 mois et plus) est fonction de sa nature, de son



© A. Caussarieu Léon Noël

épaisseur, de la quantité d'eau qu'il renferme et des conditions ambiantes extérieures et intérieures (exposition, chauffage, ventilation, teneur en sels minéraux).

Les enduits contaminés par les sels minéraux (sulfates, chlorures, nitrates et autres) resteront toujours humides. En effet, ces sels sont hygroscopiques et absorbent donc l'humidité atmosphérique même après la suppression de l'humidité ascensionnelle. On peut constater des poussées de sels plus importantes pendant la phase d'assèchement.

On vérifiera que les maçonneries sont sèches à l'aide d'un appareillage de type « bombe à carbure » avant tout reprise de finition (enduits, badigeons, peintures, etc.). Il faut pour cela faire appel à des entreprises spécialisées qualifiées (qualification Qualibat 1542) et utilisant des produits avec avis technique certifié (type Socotec, Apave, CSTB ou autre).

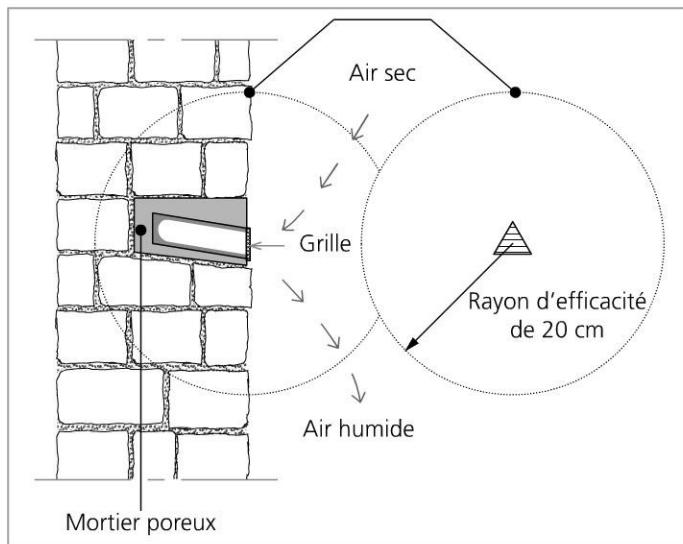


© A. Caussarieau Léon Noël

Traitement par siphons atmosphériques

Un petit tube à base de terre cuite très poreuse permet l'absorption de l'eau par capillarité. Ouvert à ses deux extrémités, il est introduit sur les 2/3 de l'épaisseur du mur. En pénétrant dans le tube, l'air sec extérieur se charge d'humidité; il ressort ensuite du fait de l'augmentation de sa densité. Une nouvelle arrivée d'air sec entretient le cycle d'évaporation.

Ce procédé est peu utilisé aujourd'hui car considéré comme insuffisamment efficace. Il peut en outre induire des effets indésirables (taches de moisissure, apparition de champignons sur la face du mur opposée à celle où est enfoncé le siphon).



Exemples de siphon.

OBSERVATIONS ET CONSEILS

- Les remèdes préventifs (drainage périphérique, soubassement étanche, vide sanitaire ou cave bien ventilée, etc.) sont souvent très efficaces pour minimiser ou empêcher les remontées capillaires.
- En cas de remontées capillaires dans les parois, il est déconseillé de poser:
 - des feuilles de plomb, qui enferment l'eau à l'intérieur du mur;
 - des doubles cloisons sans autre traitement, qui cachent le mur contaminé mais avec lesquelles l'humidité crée un système de pontage : l'humidité utilise les zones de contact entre les éléments sains et secs (tels que la cloison) et le support dégradé humide pour pénétrer et détériorer les éléments sains;
 - des films, crépis ou enduits étanches à base de ciment ou de chaux fortement hydraulique, qui enferment l'humidité et sont détériorés par l'action du salpêtre.
- Il est important de diagnostiquer la présence de sels minéraux dans le mur car ils peuvent provenir en partie de remontées capillaires. Ils apparaissent souvent sous forme d'efflorescences. Si la présence de sels minéraux est avérée, il est nécessaire d'utiliser les produits d'injection adaptés et d'appliquer une solution de primaire d'accrochage avant la réalisation d'un nouvel enduit.
- Des tests de convenance du traitement envisagé au mur touché par l'humidité peuvent être exécutés : renseignez-vous au préalable auprès d'un laboratoire spécialisé dans les études sur les matériaux et les bâtiments.
 - Test de compatibilité physique, avec le test de Blaine. Il s'agit de déterminer scientifiquement la quantité de produit à injecter dans un matériau ou une structure.
 - Test de compatibilité chimique, avec une analyse par spectro-microscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF), qui permet d'identifier la ou les molécules constituant le fluide de l'injection, puis de vérifier les compatibilités et stabilités moléculaires.
 - Test d'efficacité, avec un traceur au ribidium. Le résultat peut être obtenu dans les 15 jours qui suivent l'injection.

Traitement de l'humidité provenant de l'eau de pluie

Béton : humidité • Brique : humidité

- *Pierre : nitrification, humidité, desquamation, dissolution*

Cette fiche présente les précautions à prendre pour minimiser les risques d'infiltration d'eau de pluie à l'intérieur d'un bâtiment.

DIFFÉRENTS TRAITEMENTS

Fissures

Le traitement des fissures peut être effectué par injection (voir fiche *Traitement des fissures par injection*), par mortier adhésif (dans le cas des fissures mortes, c'est-à-dire stabilisées – voir fiches *Traitement des fissures par injection* et *Traitement des fissures par colmatage*) ou par masticage (dans le cas des fissures vivantes, c'est-à-dire qui continuent à évoluer, ou de fissures dont on ignore si elles sont mortes ou vivantes – voir fiche *Traitement des fissures par colmatage*).

Ventilation

Lors de la construction du bâtiment, un espace pouvant faire plusieurs centimètres a parfois été aménagé entre le mur de structure et une cloison intérieure. Il sert d'isolant : la circulation d'air y permet la respiration et le séchage des murs de structure humide. Il faut donc s'assurer que les ouvertures de ventilation de la lame ne sont pas bouchées ; si aucune ventilation n'a été prévue à l'origine, on peut créer des ouvertures.

Éléments architecturaux

Il est important de s'assurer de la bonne conception et du bon état des appuis des baies (jonction appui-tableau, pente suffisante, fissuration éventuelle), des bandeaux (qui peuvent être protégés par une couverture en zinc) et des larmiers : ils permettent de casser la descente de l'eau le long de la façade. Si nécessaire, refaire ces éléments ou les créer.

Joints

Il s'agit de vérifier le bon état des joints – joints entre les éléments (briques ou pierres) de la façade, joints de dilatation entre parties de bâtiment ou entre élé-

ments préfabriqués, joints entre le support et les menuiseries – et éventuellement de les restaurer (voir fiche *Joints souples* dans le cas de restauration de joints de dilatation, et les fiches *Joints rigides (brique)*, *Joints rigides (pierre de taille)*, et *Joint rigides (pierrres et moellons)* dans les autres cas). Veiller à ce que le rejet des eaux soit assuré à chaque croisement de joints.

Maçonneries

Il faut envisager une réfection des maçonneries lorsqu'elles sont endommagées (desquamation, alvéolisation, dissolution, etc., voir *Differentes pathologies*, p. 5). On procède par râgréage (dans le cas de façade béton, voir fiche *Râgréage béton*) ou par substitution par pierres identiques ou artificielles (dans le cas de façade de briques ou de pierres apparentes, voir fiches *Substitution de pierre artificielle* et *Substitution de pierre identique*).

OBSERVATIONS ET CONSEILS

- Les produits chimiques d'imperméabilisation (type hydrofuge) ne constituent pas forcément une bonne solution car leur efficacité se dégrade avec le temps: il faut une nouvelle application tous les deux ans pour obtenir une efficacité maximale. D'autre part ces produits, même qualifiés de « respirants », enferment la plupart du temps les sels dans le support, ce qui peut provoquer des dommages irréversibles: au contact de l'humidité, les sels gonflent et font éclater la pierre ou l'enduit. Les hydrofuges de façades peuvent cependant être utilisés, avec précautions, lorsque le calcin de la pierre est altéré (ils permettent alors de la protéger en attendant sa recalcification) ou lorsque les murs sont sensibles au gel et à l'humidité.
- Pour éviter l'apparition de taches d'humidité sur l'enduit, il est possible de créer dans le sous-enduit un réseau de canaux qui facilitera l'évaporation rapide de l'eau. Pour cela, il faut utiliser des sables et des granulats de granulométrie différente pour chaque couche d'enduit (au minimum trois couches dont la taille des granulats est décroissante depuis la première couche – 0/6 mm – jusqu'à la dernière – 0/2 mm). Il est également important de ménager à l'intérieur du sous-enduit des petits « réservoirs » qui permettront de stocker les sels et de supporter leur expansion: vous éviterez ainsi l'éclatement de l'enduit. Ces réservoirs sont réalisés par utilisation d'adjuvants type entraîneur d'air lors du gâchage du mortier. Pour que ces réseaux et ces réservoirs soit opérationnels, l'enduit de finition choisi doit permettre l'échange gazeux du sous-enduit avec l'atmosphère. L'utilisation d'une couche d'enduit au mortier de chaux aérienne de faible épaisseur (3 à 7 mm) et un dosage plus faible que celui du corps d'enduit (chaux CL) favorisent les échanges gazeux.

- La disparition des éléments décoratifs en saillie sur les façades (les bandeaux) n'a pas favorisé la réduction des problèmes liés à la pénétration de l'eau de pluie. En effet, ces bandeaux permettent d'empêcher le ruissellement de l'eau en coupant à tous les étages du bâtiment le ruissellement. La formation de grandes traces de salissures noires est ainsi fortement ralentie. C'est pour cette raison qu'il est important de mener une réflexion architecturale avant de supprimer ces éléments à la fois fonctionnels et décoratifs.

Consolidation par harpes et tirants noyés

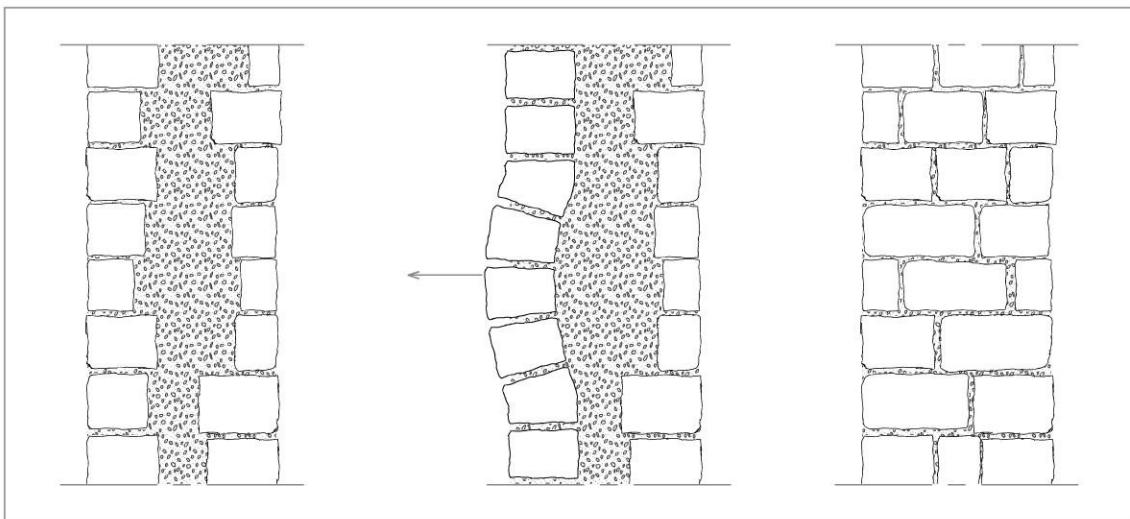
Brique: fissuration • Pierre: fissuration

Description du procédé

Ces techniques permettent de reconstituer les parements d'aplomb. Un premier traitement consiste à relier les moellons par des harpes, c'est-à-dire par une imbrication de pierres croisées les unes sur les autres. Il peut en effet arriver dans les constructions anciennes que ce ne soit pas le cas. Ces harpes permettent une bonne répartition des charges sur toute l'épaisseur de la maçonnerie du mur et apportent une réelle stabilité. La mise en place de tirants est une solution complémentaire de renforcement de maçonneries fragiles. Ils relient deux murs qui ont tendance à s'ouvrir dans des directions opposées, annulant ainsi cette évolution.



Têtes de tirants acier sur mur extérieur.



Mur non harpé

« Ventre »

Mur correctement harpé

Intérêt du procédé

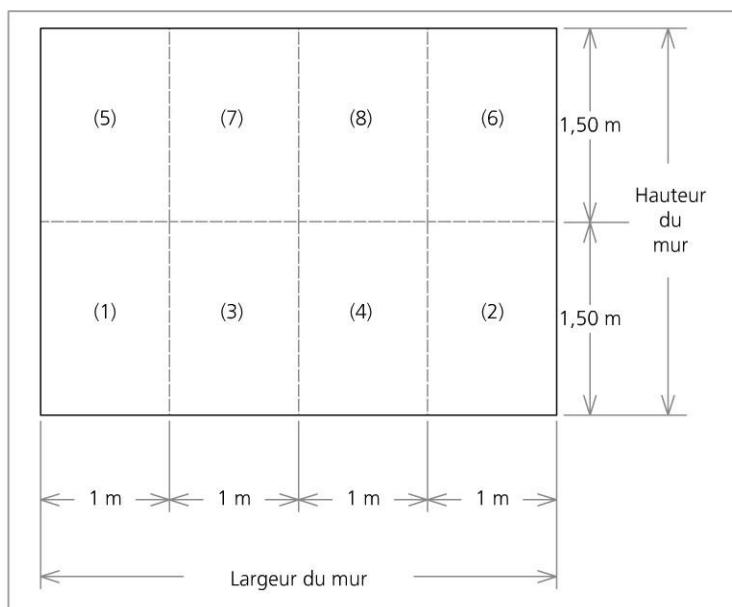
Un mur qui n'est pas d'aplomb ou qui prend du « ventre » risque de s'effondrer, mettant en péril la construction dans son ensemble.

Moyens de mise en œuvre

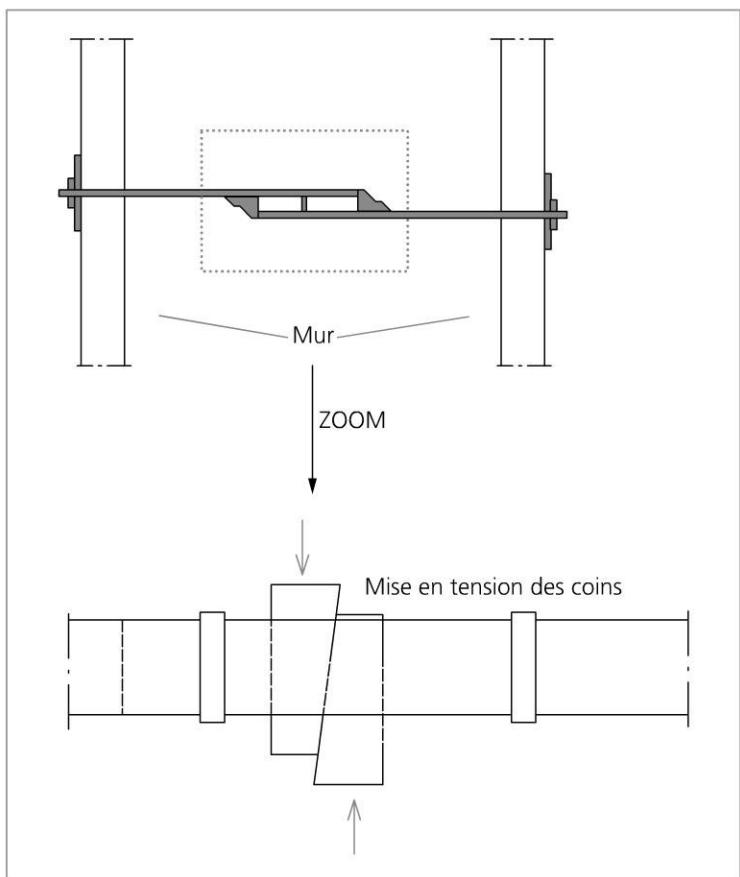
Pour la reconstitution du harpage, il est possible de travailler à l'aide d'outils mécaniques ou manuels (marteau et burin). Les tirants sont en général en acier, matériau caractérisé par une grande résistance mécanique à la traction.

MODE OPÉRATOIRE

Pour reconstituer les parements d'aplomb, travailler par parties alternées : on évite ainsi d'ébranler la maçonnerie. Effectuer des démolitions précises et successives, généralement de 1 m de large sur 1/2 hauteur d'étage et 1/2 épaisseur de mur (voir schéma ci-contre). Lors de la repose des pierres et moellons, veiller à former les harpes manquantes. Effectuer les joints selon les recommandations de la fiche *Joints rigides (pierre de taille)*.



Lorsque le diagnostic préalable de la façade a mis en évidence que les contraintes transitant par celle-ci sont trop importantes, renforcer la structure par des tirants noyés dans les planchers et reliant deux murs opposés. La mise en tension des tirants doit être effectuée avec soin pour éviter que le mur continue à se déplacer jusqu'à mettre les tirants en tension. Elle se fait par l'intermédiaire de coins ou de manilles positionnés à mi-distance entre les deux têtes de tirants.



Tirants noyés dans le plancher (vue de dessus et vue en coupe).



| Forage au diamant pour mise en place de tirants.



| Tirants acier visibles.

OBSERVATIONS ET CONSEILS

- Certains murs de façade présentent un fruit (inclinaison de la tête du mur par rapport à un plan vertical vers l'intérieur du bâtiment) entre le plancher haut du rez-de-chaussée et le faîte. Ce fruit peut avoir été voulu : on a parfois diminué progressivement l'épaisseur du mur prise sur l'extérieur. Les charges transitant par le mur sont en effet de moins en moins importantes à mesure que l'on s'élève par rapport au niveau du sol. Il serait inutile de vouloir redresser ce type de faux aplomb car il n'affecte ni la solidité ni la pérennité de l'ouvrage. Cela serait même dangereux car la structure originelle du bâtiment serait modifiée.
- Il faut éviter la suppression des entraits de charpente, lors de l'aménagement de combles par exemple. Ils font office de tirants d'une façade à l'autre. La suppression de ces entraits risquerait d'augmenter la poussée dans les murs et pourrait mettre l'ouvrage en péril.

Traitemen~~t~~**t** des fissures par injection

Béton : fissuration, microfissuration • **Brique** : fissuration • **Pierre** : fissuration

Description du procédé

Le traitement des fissures par injection consiste à injecter des résines ou des coulis de chaux hydraulique ou de ciment dans les fissures, ce qui permet de reconstituer en profondeur les éléments altérés tout en renforçant leur résistance et leur étanchéité. Il s'agit donc d'une action sur la structure même du mur, et non d'un traitement superficiel ou d'un simple camouflage.



© SMBR

| Injection de résine.

Intérêt du procédé

Ce procédé permet de traiter des fissures profondes, pouvant porter atteinte à la stabilité et à l'étanchéité d'un ouvrage. Pour les fissures moins profondes, en cas de faïençage par exemple, voir fiche *Traitemen~~t~~**t** des fissures par colmatage*.

Choix des résines et mortiers d'injection

Les matériaux injectés sont le plus souvent des résines de type époxy bi-composantes. Leur viscosité doit permettre une injection à basse pression (à favoriser par rapport aux injections à haute pression, qui peuvent endommager des matériaux fragilisés) et une pénétration dans les fissures très fines. Les résines doivent en outre avoir un retrait réduit, une élasticité suffisante pour suivre les déformations de l'ouvrage et une bonne adhérence sur support humide ou sale. Le durcissement se fait en général par polymérisation (réaction de liaisonnement des molécules entre elles) ou prise hydraulique (durcissement par contact avec l'eau).

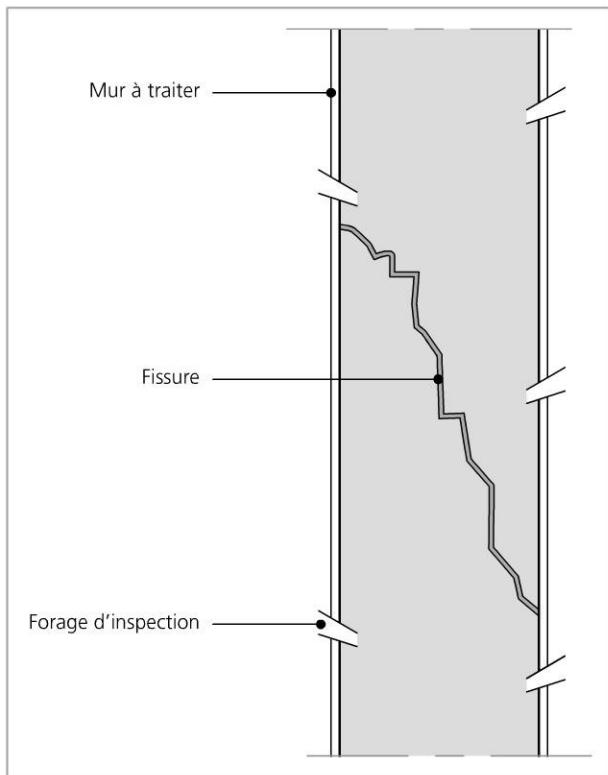
L'autre technique consiste à injecter des mortiers, généralement à base de chaux :

- mortier Spinor (société Holcim) : disponible en 3 compositions différentes en fonction de la résistance à la compression souhaitée après durcissement, il est adapté à l'injection dans les maçonneries présentant des cavités importantes ;
- mortier PLM-M (société CTS, spécialisée dans la fourniture de matériaux pour la restauration des monuments historiques) : composé de liants ultra-fins de chaux naturelle et de carbonate de calcium de granulométrie contrôlée, il est destiné à l'injection de maçonnerie déstructurée présentant des fissurations de faible épaisseur ;
- mortier Mape Antique : il est composé de chaux hydraulique naturelle et de géopolymères ; il a été utilisé dans des conditions très satisfaisantes au château de Caen, par exemple.

MODE OPÉRATOIRE

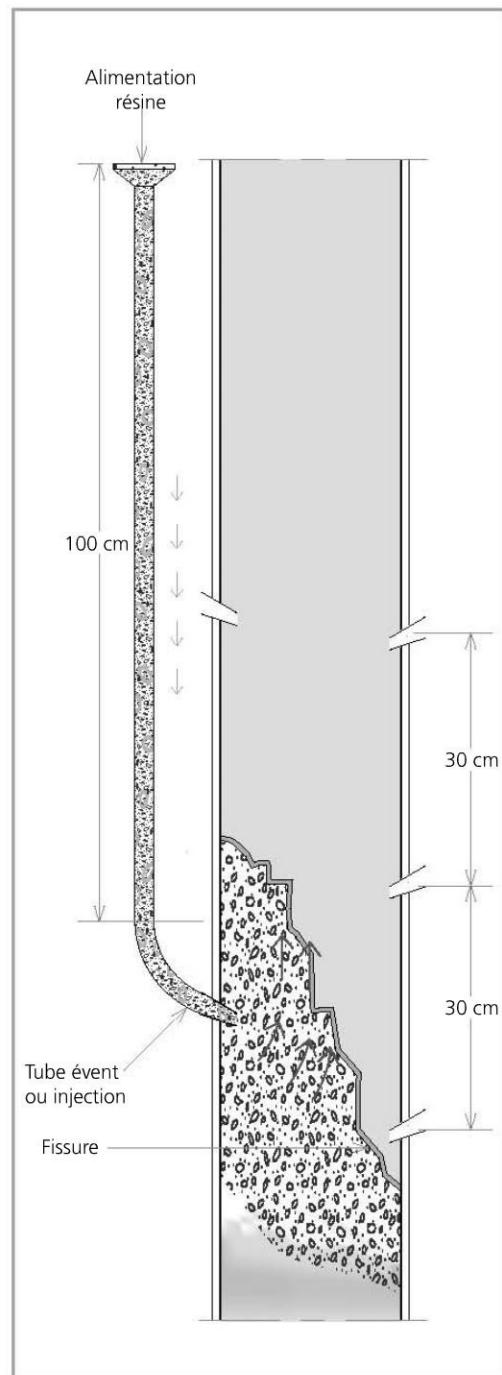
Consolidation de maçonnerie par injection de résine

1. Repérer les fissures en forant des trous dans la périphérie de celles-ci. Les diamètres, profondeurs et inclinaisons des trous sont fonction de l'importance des fissures et de la nature des parois. Ces trous pourront servir ultérieurement à l'injection.



| Repérage des fissures.

2. Nettoyer la fissure des poussières et des petits éléments détachés du support à l'aide par exemple d'une soufflette. Si la fissure est humide, sécher par soufflage, chauffage ou lavage à l'alcool. Si on constate des concréctions (carbonate de chaux, calcite), les dissoudre par un traitement à l'acide phosphorique puis rincer abondamment.
3. Forer des trous à la perceuse, tous les 30 cm environ pour des fissures de 1 mm de largeur. Pour des fissures de 2 à 3 mm, un maillage plus resserré sera nécessaire; si les fissures sont plus larges, procéder d'abord à un colmatage (rebouchage manuel) puis injecter tous les 30 cm. Repousser la poussière contenue à l'intérieur du trou vers l'extérieur à l'aide d'une soufflette, puis installer des tubes événets (en forme d'entonnoir) ou des tubes d'injection.
4. Démarrer l'injection depuis le bas vers le haut de l'élément à traiter. Suivre la progression de l'injection à travers les événets: ils permettent l'évacuation de l'air contenu dans les fissures et laissent ainsi la résine combler toute la fissure. Dans le cas d'injection à basse pression, éléver le bac ou l'entonnoir contenant la résine de 1 m au-dessus de l'élément à traiter: on crée ainsi une pression d'environ 0,01 MPa.
5. Finir éventuellement par un colmatage 24 heures après l'injection – dans ce cas on aura ouvert au préalable les lèvres de la fissure. Travailler à l'aide d'une truelle et d'un mortier époxy ou d'un simple mortier au plâtre si la pression d'injection de la résine dans la fissure est faible (voir fiche *Traitement des fissures par colmatage*).



Principe de mise en œuvre pour des fissures de 1 mm de largeur environ. On injecte soit directement dans la fissure, soit à la périphérie de la fissure (la résine migre alors au travers de la maçonnerie).

Consolidation de maçonnerie par injection de coulis spécifiques

Étude de convenance pour définir les caractéristiques des coulis d'injection

Cette étude doit être confiée à un laboratoire spécialisé. Elle comprend deux étapes et permet de valider le type de mortier d'injection à mettre en œuvre, ainsi que le protocole d'intervention.

1. Étude analytique

À partir de prélèvements réalisés sur site, le laboratoire identifie les maçonneries à consolider. À cet effet, on procède à :

- l'auscultation dynamique de la maçonnerie et la mesure de la propagation des ondes sonores ;
- la détermination de la perte au feu et l'analyse thermogravimétrique ;
- la détermination du résidu insoluble ;
- l'identification des phases cristallines par spectrométrie de diffraction des rayons X ;
- l'analyse élémentaire par spectrométrie de fluorescence des rayons X.

Au terme de ces analyses, le rapport, transmis à la maîtrise d'ouvrage et au maître d'œuvre permet de définir la composition du mortier de confortement à mettre en œuvre.

2. Étude sur site des essais d'injection

Les essais d'injection réalisés sur site ont pour but de valider le choix de mortier réalisé au stade de l'étude analytique et de définir la compatibilité des techniques mises en œuvre avec les éléments en place.

Les sondages sont réalisés par carottage (diamètre de 40 à 100 mm). L'observation des carottages permet d'ajuster le nombre de points d'injection à mettre en œuvre ainsi que la fluidité du mortier d'injection.

Protocole d'injection des coulis

Points d'injection

À partir des études réalisées précédemment et du protocole défini en collaboration avec le laboratoire, une cartographie précise des points d'injection est établie de manière à définir les emplacements.

Suivi de contrôle en cours de chantier

La mise en place de sondes électroniques reliées à un enregistreur permet de suivre en temps réel la progression de l'humidité au cœur de la maçonnerie.

Ces sondes sont de deux types : sondes résistives se déclenchant à saturation et sondes capacitatives permettant d'anticiper l'humidification excessive des parements.

Préparation du mortier

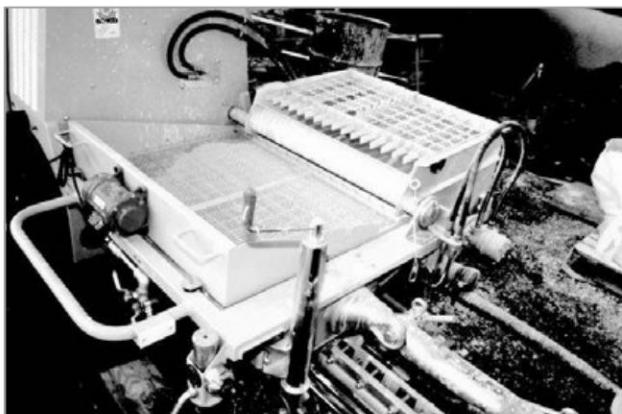
Le mélange est préparé à l'aide d'une turbine à haute turbulence (1 500 tr/min) permettant une mise en suspension dite « colloïdale » des produits. On vérifiera

que l'eau utilisée pour le gâchage ne contient aucune matière organique en suspension.

Matériel d'injection

Un agitateur intégré à la cuve permet le malaxage permanent du mortier, évitant ainsi tout risque de ségrégation. La pression d'injection est toujours inférieure à la pression de refus définie par les essais et est d'autant plus basse que le débit d'injection est plus élevé.

La pression de refus n'est atteinte que lorsque le débit de l'injection est très réduit et dans tous les cas inférieur à 2 bars.



*Machine d'injection
Putzmeister SP11 DQR,
400 l de malaxage.*

Mise en œuvre

En fonction des résultats de l'étude préalable, les injections pourront être réalisées selon le protocole suivant :

1. Réfection des joints de parement et réalisation d'évents de contrôle. L'ensemble des percements fait l'objet d'un plan d'implantation et d'un suivi des quantités par forage. Le schéma d'implantation répond au principe de base des injections, à savoir une réparation en quinconce des percements et une profondeur de forage variable aux 2/3 de l'épaisseur du mur, de manière à couler au centre des maçonneries. Les trous sont réalisés soit par carottage soit par perforateur dans les joints.
2. Injection d'eau sous pression dans la maçonnerie, de manière à éliminer les poussières accumulées à l'intérieur du parement et à favoriser l'écoulement du mortier.
3. Injection du mortier liquide à une pression comprise entre 0,5 et 2 bars.
4. Vérification de la bonne pénétration du mortier au niveau des évents de contrôle.
5. Rebouchage des évents au mortier de chaux et compléments d'injection, à une pression comprise entre 1 et 2 bars.

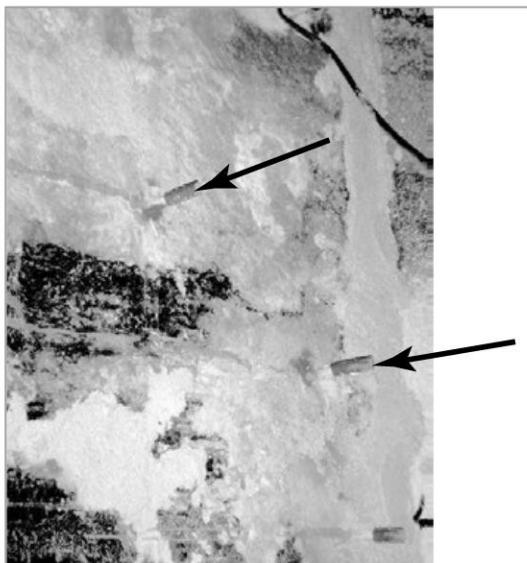


Exemple d'injection de coulis au travers d'un joint d'une maçonnerie de moellons.

Il faut noter l'importance du suivi des quantités. Une procédure de contrôle, qui commence par la diffusion au maître d'œuvre des bordereaux de livraison des matériaux, doit être effective pendant la réalisation de cette tâche.

Suite à l'analyse des vides des maçonneries, un maillage des injecteurs est établi avant réalisation, de manière à combler l'ensemble des maçonneries. Ce maillage réalisé en quinconce permet une injection uniforme soit gravitaire soit à faible pression.

Avant toute injection, il est nécessaire de procéder au calfeutrement des parements apparents et des diverses fissures.



OBSERVATIONS ET CONSEILS

- On peut utiliser des résines polyester, qui sont plus économiques que les résines époxy. Elles sont toutefois moins résistantes à l'eau que ces dernières, offrent une moins bonne adhérence sur le béton et ont un retrait plus important. Les injections associant un mélange de latex et de bitume ou les résines acryliques permettent de redonner l'étanchéité nécessaire aux zones altérées et peuvent éventuellement être préconisées pour les zones fortement humides.
- Une température supérieure à 15 °C favorise une polymérisation rapide. Prenez garde aux températures élevées, qui risquent d'induire une prise trop rapide, et donc incomplète, de la résine. À l'inverse si la température est basse (en général moins de 10 ou 5 °C), il est nécessaire de réchauffer la zone à traiter. Une résine mise en œuvre à une température normale atteint sa résistance définitive en une semaine environ.
- L'injection n'est pas une étape anodine du chantier et de la phase de consolidation des maçonneries. La méthode de travail utilisée doit permettre la mise en œuvre d'un coulis homogène sans décantation et ne doit pas provoquer de noyau dur au sein de la maçonnerie.
- Dans le cas de maçonneries houardées au plâtre, il est indispensable de ne pas injecter de liant hydraulique, car la réaction d'un liant hydraulique (type chaux hydraulique ou ciment) avec le plâtre provoque des sels expansifs (appelés « ettringite ») qui engendreront à terme « l'explosion » des maçonneries. L'analyse des mortiers constituant le cœur des maçonneries est donc absolument primordiale avant le choix du mortier composant le coulis d'injection.

Traitement des fissures par colmatage

Béton : faïençage, fissuration • Brique : fissuration • Pierre : fissuration

Description du procédé

Le colmatage est le plus souvent réalisé par obturation de la fissure. On peut considérer qu'il existe deux types de colmatage :

- un colmatage en profondeur, qui consiste en un remplissage complet de la fissure à l'aide de mastic ;
- un colmatage superficiel, dans lequel on traite la fissure sur quelques millimètres seulement.

Intérêt du procédé

Le colmatage permet de traiter des fissures larges ou des crevasses qui sont stabilisées ou dont l'évolution est minime (de l'ordre du micron). En règle générale, le colmatage superficiel est utilisé dans le cas de fissures ne touchant pas à la solidité ou à l'étanchéité de l'ouvrage. Il s'agit d'un traitement préalable du support, avant application d'un revêtement de façade type RPE (revêtement plastique épais), d'une peinture de façade, etc. Le colmatage en profondeur intervient lorsque les dommages sont plus importants.

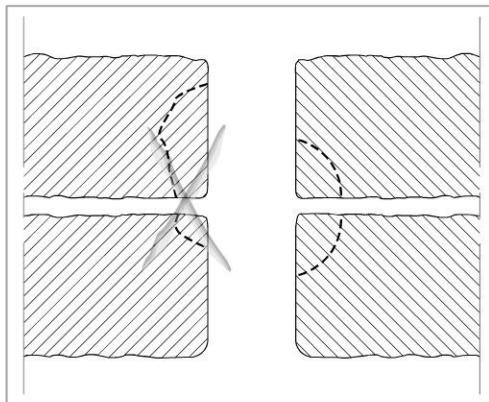
Choix des mastics

Pour le colmatage en profondeur, on utilise des mastics fluides, souples (pour permettre un mouvement éventuel de la fissure) et consitants (pour résister aux pressions hydrostatiques). Pour le colmatage superficiel, on utilise des mastics en cartouche ou en boudin.

Il est important de différencier les deux types de produits le plus souvent utilisés, à savoir les mastics plastiques, susceptibles d'être modelés, et les produits élastiques, susceptibles de se déformer, qui selon leur forme auront des moyens de mise en œuvre différents. On utilise des produits élastiques dans le cas de fissures dites vivantes (elles continuent à évoluer), et des produits plastiques dans le cas de gorges larges et profondes n'évoluant plus. Ces deux produits sont utilisés indifféremment pour les colmatages superficiels ou en profondeur.

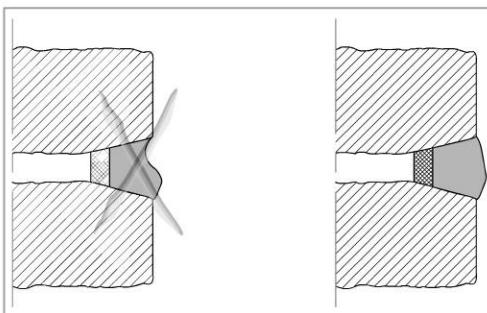
MODE OPÉRATOIRE

1. Ouvrir la fissure pour créer une zone de travail permettant un bon accrochage du produit. La section de cette ouverture doit être symétrique par rapport à la fissure (voir croquis) mais ne doit pas dépasser 20 mm de largeur, autrement le mastic risque de couler.



Ouverture de la fissure.

2. Renforcer le mastic de rebouchage en l'armant de fibres (filasse, jute, etc.) ou utiliser des mastics fibrés prêts à l'emploi si la largeur de la gorge dépasse 20 mm.
3. Si la gorge est profonde et large, appliquer un fond de joint (matériau incompréhensible inerte), qui empêche le mastic de pénétrer sur toute la profondeur de la fissure.



Gorge profonde et large mastiquée (avec fond de joint).

4. Pour certains mastics, il faut appliquer un primaire d'accrochage. Il assure une bonne adhérence du mastic sur les parois de la gorge (se référer aux prescriptions des fournisseurs).
5. Appliquer le mastic. Prendre soin de bien le serrer en le faisant pénétrer profondément dans la gorge.

OBSERVATIONS ET CONSEILS

- Avant de réaliser une peinture sur la façade après traitement des fissures, il est nécessaire de vérifier la compatibilité du mastic de traitement et de la peinture d'application : bonne adhérence, coefficients de dilatation proches, compatibilité des composants.
- Les mastics plastiques sont en général peu sensibles à la température, mais un vieillissement peut-être observé, se manifestant par des craquelures sur la croûte superficielle. Ce phénomène n'expose pas le matériau sous-jacent à des risques majeurs.

- Bien que les performances des produits élastiques soient supérieures à celles des mastics plastiques, leur mise en œuvre est souvent plus complexe. Elle nécessite une main-d'œuvre qualifiée, capable de mélanger, doser et malaxer le produit (produits bi-composants).
- Dans le cas de faïençage, un tel processus de réparation serait long et fastidieux. D'autres solutions peuvent être proposées: réfection complète de l'enduit, application d'un revêtement plastique épais généralement non armé (sauf au droit des fissures), doublage par pierres agrafées, etc.



© SMBR

2.7 Autres procédés

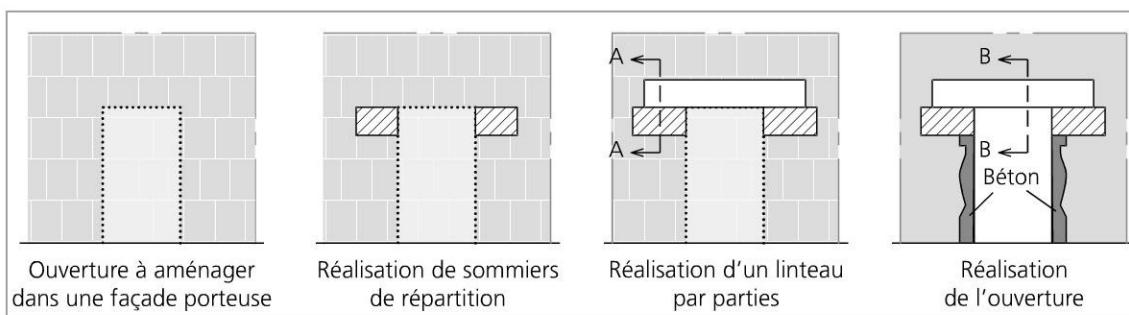
Création d'ouverture
Procédés avancés

p. 164
p. 169

Création d'ouverture

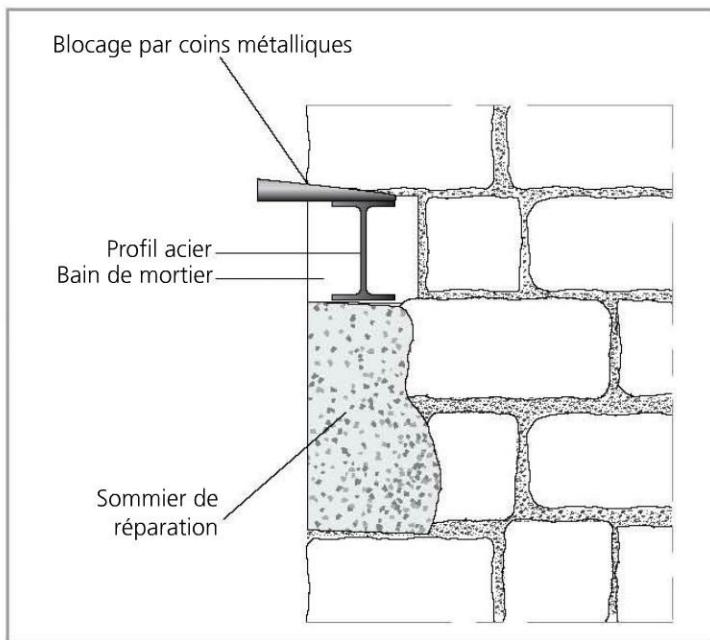
L'ouverture d'une baie dans un mur existant est une opération de plus en plus courante. Mal réalisée, elle peut entraîner des désordres irréversibles : affaissement de la maçonnerie au-dessus de l'ouverture, fissuration des allèges au-dessus des baies, etc. Il est donc important, lors de l'ouverture d'une baie, de préserver la stabilité des murs et de prendre un certain nombre de précautions.

MODE OPÉRATOIRE



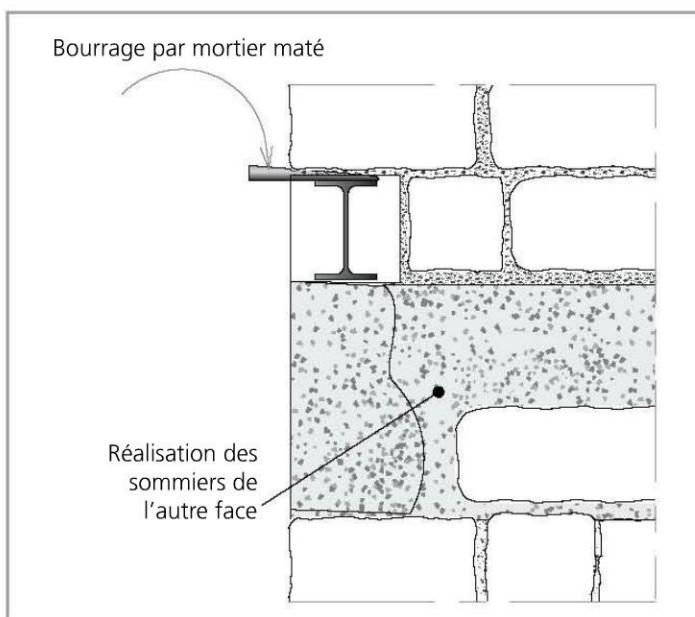
| Schéma n° 1 : étapes de l'ouverture d'une baie.

1. Ouvrir le mur sur environ un tiers de son épaisseur afin d'aménager un espace suffisant pour la création d'un sommier de répartition en béton : il servira à bien répartir les charges ramenées par les futurs profilés métalliques sur la maçonnerie et à éviter ainsi les effets de poinçonnement. Cet espace dans le mur permet également la mise en place d'un profilé métallique de type IPN, en forme de « I », ou d'un HEB, en forme de « H ». (Les profilés IPE ont des ailes d'épaisseur constante, les IPN ont des ailes d'épaisseur variable, les HEA et les HEB ont des hauteurs équivalentes à leur longueur. À hauteur égale, les ailes des HEA sont moins épaisses que celles des HEB.)
2. Préparer une gâchée de mortier de béton bien serrée pour réaliser les sommiers d'appuis. Laisser sécher puis mettre en place le premier profilé métallique. Bloquer le profilé par des coins métalliques ou en bois de façon à le maintenir en place et à éviter son déversement.



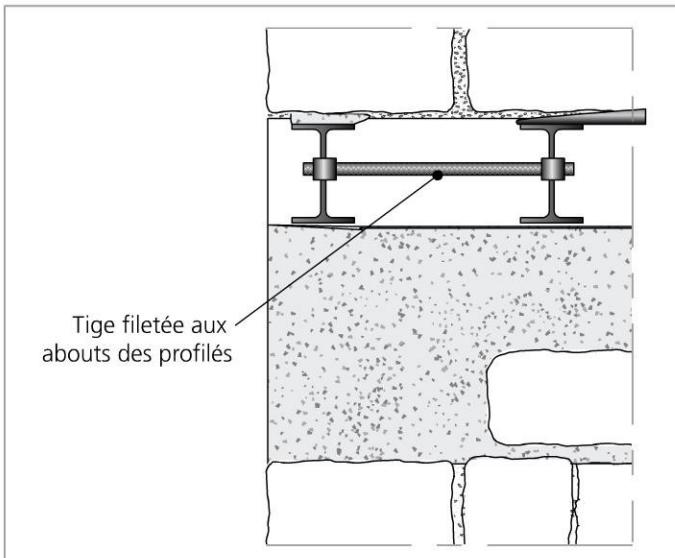
*Coupe A-A du schéma n° 1 :
création d'un demi-sommier
d'appui et mise en place
du premier profilé métallique.*

3. Réaliser les sommiers de l'autre face par la même méthode (voir étape 2). Réglér la hauteur et la longueur d'appui du premier profilé sur son sommier de répartition en correspondance avec le sommier venant d'être réalisé afin d'obtenir une parfaite symétrie entre les deux profilés. Bourrer l'espace entre le profilé et le mur existant avec un mortier maté. Bien serrer le mortier, puis retirer les coins servant à maintenir en place le profilé.



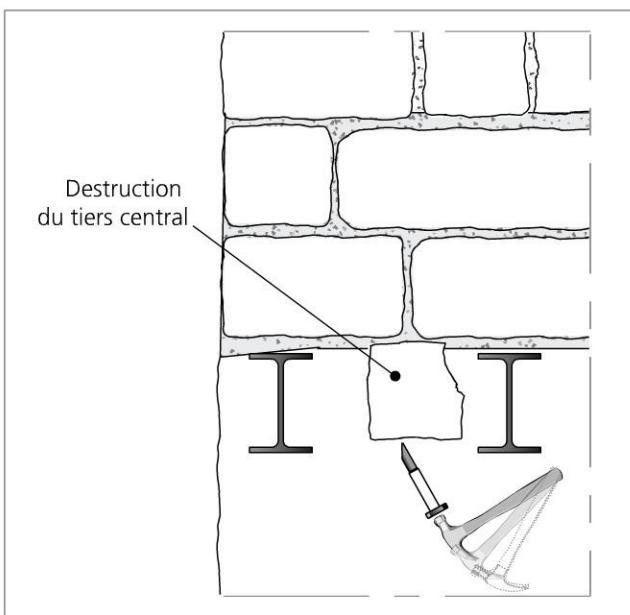
*Coupe A-A du schéma n° 1 :
réalisation du deuxième
sommier d'appui.*

4. Ouvrir l'espace nécessaire à la mise en œuvre du deuxième profilé métallique. Une fois les profilés placés, remplir une nouvelle fois l'espace entre le nouveau profilé et le mur existant avec un mortier maté. Bien serrer le mortier puis retirer les coins servant à maintenir en place le profilé.



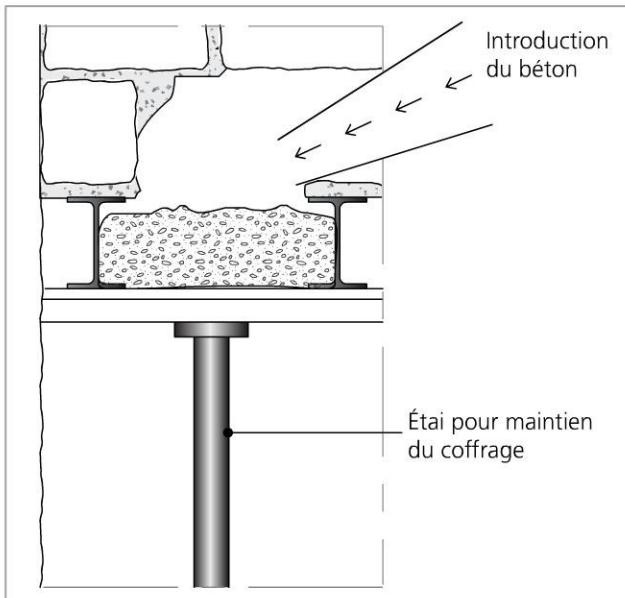
Coupe B-B du schéma n° 1 : mise en place du second profilé métallique.

5. Détruire le tiers central entre les deux profilés sur toute la longueur de la baie en utilisant des outils manuels de type marteau et burin. Prendre soin de ne pas endommager les profilés métalliques. Immédiatement, maintenir les profilés avec des coins et liaisonner leurs abouts par une tige filetée.



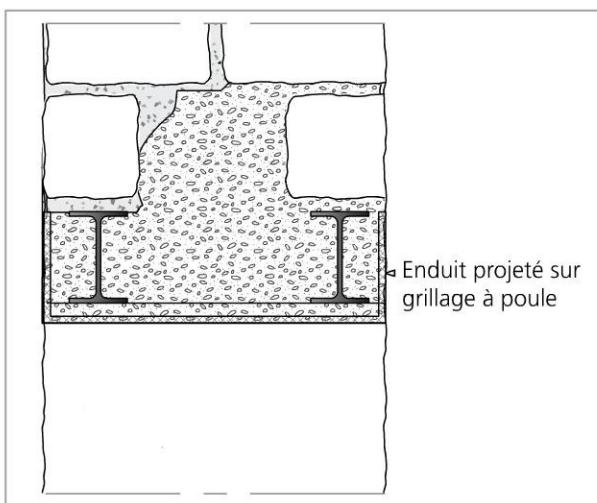
Coupe A-A du schéma n° 1 : démolition du tiers central entre les deux profilés.

6. Coffrer entre les appuis du linteau, sur toute la partie inférieure, et maintenir le coffrage par des étais. Ménager des espaces pour l'introduction de goulottes séparées de 1,50 m au plus les unes des autres et s'en servir pour introduire le béton. Attention : éviter les bétons trop plastiques et trop secs, qui assureraient mal l'enrobage des aciers et la cohésion du linteau.



Coupe B-B du schéma n° 1: réalisation du linteau béton entre les deux profilés métalliques précédemment mis en place.

7. La finition peut s'effectuer par mise en place d'un grillage à poule ou d'un « nergaldo » (grillage rendant possible l'accroche du mortier sur une surface lisse, un profilé métallique par exemple) permettant l'application d'un enduit projeté par voie mécanique ou manuelle sur le profilé au travers de ses accroches métalliques.



Coupe B-B du schéma n° 1: enduisage de finition du linteau.

OBSERVATIONS ET CONSEILS

- En moyenne on utilise des IPN de:
 - 80 mm pour des portées maximales de 1 m;
 - 100 mm pour des portées maximales de 1,5 m;
 - 120 mm pour des portées maximales de 2 m;
 - 140 mm pour des portées maximales de 2,5 m.
- Dans le cas de murs en moellons, les portées données ci-dessus sont à réduire d'environ 15 %.
- La longueur des appuis de rive (bord d'une fenêtre) varie de 15 à 35 cm.
- Il est possible de construire un linteau en béton armé. Celui-ci nécessite un temps de réalisation plus long du fait des temps de durcissement du béton à respecter (au minimum 7 jours de cure du béton avant décoffrage mais la résistance définitive retenue est celle mesurée à 28 jours). Le principe de réalisation est le même que pour la mise en œuvre des profilés métalliques, à savoir en deux étapes successives. Pour relier les deux parties on aura pris soin au préalable de disposer des aciers transversaux en attente (type épingle HA 6) tous les 30 cm.

Procédés avancés

NETTOYAGE CRYOGÉNIQUE PAR PROJECTION DE GLACE SÈCHE

Description du procédé

Ce traitement très novateur consiste à projeter de la glace sèche sur le support à nettoyer. La glace sèche est de l'anhydride carbonique (CO_2) à l'état solide qui, à pression atmosphérique, est à une température d'environ -80°C . Quelques industriels fabriquent et mettent en œuvre le nettoyage cryogénique : l'entreprise Airliquide avec le procédé Cleanblast®, l'entreprise Linde gas avec le procédé Cryoclean®, l'entreprise Cold Jet, etc.

On distingue trois effets :

- **un effet mécanique**, causé par la percussion contre le support de pellets (c'est-à-dire de petits cylindres de 3-16 mm de diamètre) de glace sèche projetés à une vitesse proche de celle du mur du son (330 m/s). Le pellet pénètre dans les déchets à enlever, se brise et crée une onde qui soulève l'encrassement ;
- **un effet thermique**, induit par la différence de température entre la glace sèche et le support. Le choc thermique rend le déchet incrusté friable ;
- **un effet de souffle**, dû à la sublimation du CO_2 des pellets. Quand la glace sèche frappe la surface à nettoyer, elle passe de l'état solide à l'état gazeux, ce qui provoque une dilatation du volume de l'anhydride carbonique par un facteur de presque 700. Cette dilatation entraîne une explosion des incrustations à nettoyer.

Intérêt du procédé

Le nettoyage cryogénique est aujourd'hui utilisé principalement dans l'industrie mais des applications pour le bâtiment et les travaux publics sont en cours de développement. Ce procédé a l'avantage de limiter les nuisances environnementales car il ne nécessite la mise en œuvre d'aucune substance chimique. Il n'occasionne pas de surcoût financier pour le traitement des déchets : il suffit d'aspirer ou de ramasser les dépôts emportés ou décapés du support.

À la différence des méthodes de nettoyage par sablage, retaillé ou brossage avec des brosses métalliques, le nettoyage à glace sèche n'a pas d'effet abrasif sur le support et se révèle très respectueux des matériaux fragiles. Il permet de nettoyer les zones les plus difficiles d'accès grâce à l'utilisation de buses à jets de différentes

dimensions, exploitant différentes vitesses de nettoyage. Enfin le nettoyage cryogénique ne fait courir aucun risque d'inondation ou d'humidification trop importante du support car la glace, constituée de CO₂, s'évapore au contact de la surface à nettoyer.

Applications actuelles

Le procédé est utilisé dans divers secteurs d'activité.

- Imprimerie : nettoyage des couleurs humides ou sèches, de la poudre de papier et des restes de colle.
- Industrie alimentaire : nettoyage des machines à empaqueter sans ajout d'eau ou de substances chimiques.
- Industrie de matière plastique : nettoyage délicat des revêtements en plastique et des polyuréthanes dilatés.
- Nettoyage de machines : presses à impression, cadres électriques, distributeurs des adhésifs thermoplastiques et des colles, photocopieuses, lignes de production, etc.
- Nettoyage des lignes de production : fours industriels, robots pour soudure, réservoirs à sucre, conteneurs pour la polymérisation, lignes de montage, systèmes transporteurs, etc.

NETTOYAGE PAR ULTRASONS MULTIFRÉQUENCES

Description du procédé

Le nettoyage par ultrasons utilise la propagation d'ondes sonores à hautes fréquences pour éliminer les salissures superficielles déposées sur un support. Un générateur produit une énergie électrique que le transducteur transforme en ondes mécaniques vibratoires à haute fréquence. Lorsque ces ondes traversent une solution liquide nettoyante, elles provoquent une « cavitation », c'est-à-dire la formation de milliers de bulles microscopiques qui grossissent et éclatent contre la pièce à nettoyer. L'action de ces bulles microscopiques permet un nettoyage au niveau moléculaire.

Les ultrasons sont des ondes élastiques dont la fréquence est comprise entre 15 kHz environ et quelques centaines de mégahertz. En deçà de cette bande, on a affaire à des sons ou infrasons ; au-delà ce sont des hypersons. Les ultrasons possèdent toutes les propriétés générales des ondes élastiques (ondes de pression ou ondes vibratoires selon le milieu de propagation). Ils se distinguent par l'interaction qu'ils peuvent avoir avec le milieu dans lequel ils se propagent, la solution liquide nettoyante dans le cas du nettoyage par ultrasons.

Un appareil produisant des ultrasons est communément appelé transducteur ou convertisseur ultrasons. La technologie des transducteurs peut être basée sur des

générateurs pneumatiques (sifflet, sirène, etc.), électrodynamiques (haut-parleur) ou électriques. Dans ce dernier cas, on utilisera les propriétés des matériaux magnétostrictifs ou piézoélectriques pour convertir l'énergie électrique en une énergie mécanique ultrasonore.

Applications actuelles

Les applications sont définies selon des plages de fréquence, chacune possédant des caractéristiques propres, à exploiter selon la nature et la dureté du support ainsi que selon le type d'encrassement ou de salissure à nettoyer. D'une manière générale, plus la fréquence est basse et plus le nettoyage est agressif. Ainsi, autour de 25 kHz, le nettoyage est adapté aux surfaces dures et permet un nettoyage efficace des cires, des graisses, des huiles etc. Avec des fréquences autour de 45 kHz le nettoyage est moins agressif, ce qui permet de travailler sur des surfaces plus tendres (aluminium, pierres tendres, etc.) ou sur des zones difficiles d'accès; cette fréquence est également utilisée pour le dégazage de solutions aqueuses, HPLC, etc. Les fréquences supérieures à 130 kHz sont utilisées pour des nettoyages fins et minutieux de pièces difficiles d'accès et fragiles (joaillerie, électronique, pièces archéologiques, etc.), souillées par des graisses, des poussières, des huiles.

NETTOYAGE PAR PROJECTION SPONGEJET®

Description du procédé

Le procédé Spongejet®, développé par l'entreprise Tecnubel, consiste à projeter sous pression des éponges polyuréthanes de faible dimension (quelques dizaines de microns) contre les surfaces à traiter. Les éponges sont projetées à une pression d'environ 0,6 MPa, ce qui est très supérieur aux pressions utilisées pour le gommeage. Elles se déforment et s'aplatissent au moment de l'impact; en reprenant leur forme, elles absorbent les salissures situées au point d'impact et les entraînent dans leur chute.

Les éponges sont ensuite collectées, transférées dans l'unité de tamisage et séparées des salissures. Seules les poussières fines sont éliminées. Toutes les éponges ayant encore une dimension suffisante peuvent être réutilisées au cours d'une nouvelle projection.

Dans le cas de nettoyage de salissures noires, les déchets peuvent être déposés en décharge de classe II, tandis que les déchets issus du nettoyage de surfaces ayant été polluées par des produits chimiques ou par des produits dangereux pour l'environnement devront être déposés dans des décharges de classe III (processus de décontamination, d'incinération et d'enfouissement spéciaux).

Intérêt du procédé

Le procédé Spongejet® a l'avantage de mettre en œuvre des produits n'étant pas nocifs pour la santé (les éponges polyuréthanes) et de limiter considérablement la dispersion de poudres dans la zone de traitement. Il répond ainsi aux besoins d'industriels souhaitant utiliser un procédé de décapage de surface moins nocif pour les manipulateurs et l'environnement que les méthodes de sablage à base de projection de silice. Le procédé est particulièrement intéressant pour le nettoyage en milieu sensible, par exemple dans des usines ne permettant pas un arrêt de production pour réaliser le traitement nécessaire. Il est aussi indiqué dans le cas de salissures nocives, peinture au plomb ou graisses par exemple.

Applications actuelles

Ce procédé est aujourd'hui utilisé pour :

- le dégraissage et le nettoyage de sols industriels pollués ;
- la restauration après incendie et le décapage des résidus de noir de suie ;
- la préparation de surfaces avant peinture ;
- la décontamination de métaux, bétons, plastiques, etc.

NETTOYAGE PAR HYDROASPIRATION

Description du procédé

L'hydroaspiration consiste à projeter de l'eau sous pression et à l'aspirer immédiatement au travers d'une cloche faisant ventouse sur le support. On distingue deux types de système.

- **Système à flux direct** Une buse de nettoyage située en partie supérieure de l'appareil envoie de l'eau sous pression (réglage de 0 à 15 MPa) : par effet cinétique, l'eau casse les salissures et les arrache. Elle tombe ensuite à la base de l'appareil, où elle est évacuée par aspiration. On travaille donc en flux direct : l'aspiration permet seulement d'évacuer l'eau de projection. L'efficacité du nettoyage peut être améliorée par une augmentation de la pression de projection de l'eau, mais le support risque alors d'être endommagé.
- **Système à flux renversé** L'eau arrive sous pression (réglage de 0 à 15 MPa) à la base de l'appareil, cassant et arrachant les salissures. Un système d'aspiration en partie haute de la lance de nettoyage, muni d'un volet d'ouverture très étroit, aspire l'eau. En remontant sur la surface à nettoyer, elle passe sous les salissures et les décolle : c'est le flux inversé. Ce système a donc un double effet : d'abord impact lié à la projection sous pression puis flux inversé permettant le décolllement des salissures. On peut augmenter la dépression créée par l'aspiration forcée pour accroître l'efficacité du nettoyage.

Il est possible d'injecter directement au niveau de la tête de nettoyage des produits auxiliaires, par exemple des tensio-actifs ou des régulateurs de pH (voir fiche *Produits chimiques*).

L'hydroaspiration fait l'objet de développements par de nombreuses entreprises fabriquant du matériel de nettoyage ainsi que par des entreprises de rénovation de façades.

© SM/BR



Tête de nettoyage en action.

Intérêt du procédé

Le nettoyage par hydroaspiration est particulièrement efficace pour éliminer les salissures noires ou vertes. Il ne peut toutefois être mis en œuvre sur des murs atteints de desquamation ou de pulvérulence, ou sur des surfaces ouvragées, car la ventouse ne pourrait se fixer correctement sur le support.

Ce procédé de lavage sous vide permet de se garantir contre les risques de pollution environnementale puisque le liquide chargé de salissures ou de particules toxiques est aspiré (il peut être neutralisé immédiatement ou traité à part si nécessaire). On évite les mouvements d'air chargé de particules, qui sont l'inconvénient du sablage, et la mise en place de lourdes protections périphériques (colmatage des baies, bâches sur échafaudage, etc.) devient inutile. Enfin, grâce à l'effet de « léchage du support », les murs traités ne sont pas imprégnés en profondeur par l'eau projetée.

Applications actuelles

Ce procédé est aujourd'hui utilisé pour :

- le dégraissage ;
- le nettoyage de sols ;
- le décapage de badigeons ou des façades empoussiérées ;
- la préparation de surfaces avant peinture.

ANNEXES

ANNEXE A – Législation et démarches administratives

Les obligations légales

Les articles L. 132-1 à L. 132-5 du Code de la construction et de l'habitation imposent un ravalement tous les dix ans. Ces articles ne s'appliquent qu'à Paris et dans certaines communes, dont la liste est publiée par arrêtés préfectoraux dans chaque département. Les services techniques ou de l'urbanisme de chaque commune peuvent renseigner sur les obligations qui y sont en vigueur.

Les communes disposent de toute une panoplie de procédures assorties d'aides pour inciter les propriétaires à rénover la façade de leur habitation. Il peut s'agir d'OPHA (Opérations programmées d'amélioration de l'habitat), de campagnes de ravalement, ou de la signature de protocoles avec les organisations professionnelles. À Paris, par exemple, un protocole a été signé en 1991, puis modifié en 1995 et en 2000.

Les communes peuvent faire parvenir aux propriétaires ne se conformant pas spontanément à l'obligation de ravalement décennal une injonction de ravalement dans un délai de six mois. Cette injonction prend la forme d'un arrêté municipal. Le propriétaire n'obtempérant pas à l'injonction, ni à une sommation délivrée à l'issue de ce délai, est passible d'amendes. Le tribunal, saisi par le maire, peut autoriser la commune à exécuter le ravalement aux frais du propriétaire défaillant.

Les articles L. 313-1 à L. 313-15 du Code de l'urbanisme signalent les dispositions particulières découlant de la situation de l'immeuble dans un secteur sauvegardé.

Les quatre courriers de la ville de Paris

Le propriétaire d'immeuble nécessitant une rénovation reçoit successivement:

- une première lettre amiable – référencée L.01;
- une seconde lettre amiable de relance – référencée L.02 (6 mois après);
- un premier envoi faisant grief: l'arrêté municipal d'injonction (6 mois plus tard – sans réponse ou à défaut d'exécution);
- un second envoi faisant grief: l'arrêté municipal de sommation (6 mois plus tard, faute d'exécution).

Les démarches administratives

La déclaration préalable

Les articles L. 442-1, L. 442-2 et R. 422-3 du Code de l'urbanisme indiquent que tout ravalement nécessite le dépôt d'une « déclaration de travaux exemptés de permis

de construire ». Sous réserve qu'ils ne modifient pas notablement l'aspect de la façade, les travaux de ravalement ne sont donc pas soumis à l'obligation de permis de construire.

L'autorisation d'exécuter la rénovation des immeubles classés monuments historiques est subordonnée à l'accord de l'architecte des Bâtiments de France (ABF) du département concerné. Le ravalement des bâtiments inscrits à l'inventaire supplémentaire des Monuments historiques doit faire l'objet d'un permis de construire. Des prescriptions particulières peuvent en outre être imposées par les autorités instruisant le dossier pour les rénovations effectuées dans un périmètre de protection autour d'un monument historique (500 m), dans une Zone de protection du patrimoine architectural et urbain (ZPPAU), dans un site « inscrit » ou « classé ».

Le service départemental de l'architecture peut aider dans la définition du projet de rénovation de la façade (matériaux, coloris, etc.). La déclaration et le dossier qui l'accompagne sont retirés et déposés en mairie. Les autorités compétentes ont un mois dans le cas général et deux dans les cas particuliers évoqués précédemment pour rendre leur avis. L'autorisation, valable pendant deux ans, fait l'objet d'un affichage sur rue.

L'ouverture de chantier

Les travaux de rénovation de façades nécessitent généralement un échafaudage. La mairie peut à ce titre délivrer une autorisation d'échafaudage (valable trois mois) permettant l'empiètement de l'édifice sur le domaine public. L'indemnisation demandée varie selon les communes.

Les travaux peuvent aussi nécessiter de faire reposer l'échafaudage sur une propriété privée. Pour des travaux jugés nécessaires et dont la gêne occasionnée n'est pas disproportionnée à leur intérêt, l'autorisation ne peut pas être refusée par le propriétaire. L'indemnisation sera de préférence négociée à l'amiable; en cas de désaccord, elle sera fixée par le tribunal.

ANNEXE B – Aides et subventions

Subventions de l'Agence nationale pour l'amélioration de l'habitat (ANAH)

Les subventions de l'ANAH sont accordées aux propriétaires qui réalisent des travaux d'amélioration concernant des logements qu'ils occupent ou qu'ils louent. Ne sont éligibles aux aides de l'ANAH que les bâtiments achevés depuis au moins 15 ans à la date de l'octroi de la subvention. Cette restriction peut être assouplie pour des constructions particulièrement dégradées ou en cas de catastrophe naturelle.

L'ANAH impose trois conditions pour obtenir des subventions :

- occuper ou louer après travaux le logement pendant 9 ans à titre de résidence principale;
- faire réaliser les travaux par des professionnels du bâtiment;
- attendre son autorisation pour entreprendre les travaux.

Les subventions sont d'environ 20 % du montant des travaux pouvant être subventionnés, avec des plafonds en fonction du type de bénéficiaire et des particularités de l'immeuble. La méthode de calcul des subventions, le détail des conditions de ressources et les modalités de constitution et d'instruction des dossiers de demande sont expliqués sur le site Internet de l'ANAH (voir Annexe D – Adresses utiles, p. 182).

Les dossiers de subventions peuvent être demandés et présentés directement à la délégation locale de l'ANAH, mais aussi par l'intermédiaire d'associations départementales qui présentent l'avantage de permettre de constituer et d'instruire à partir des mêmes pièces des dossiers de demande d'autres aides et subventions.

Pour les travaux en copropriété, le recours aux subventions doit être prévu dès la préparation de l'assemblée générale qui vote les travaux. C'est en effet lors de cette assemblée générale que doit être désigné un mandataire commun (le syndic) qui constituera le dossier collectif permettant ensuite l'instruction des dossiers individuels.

Les prêts « pass travaux »

Les prêts « pass travaux » sont accordés aux salariés (ainsi qu'aux dirigeants ou aux retraités depuis moins de 5 ans) des entreprises du secteur privé assujetties au 1 % logement. Les travaux de rénovation de façades sont concernés à deux titres : l'entretien de copropriété et l'étanchéité en cas de défaut existant.

Le montant du prêt peut couvrir 100 % du coût des travaux. Il peut atteindre 8 000 euros sans conditions de ressources et 9 600 euros sous certaines conditions de ressources.

Le prêt peut s'étaler sur 10 ans, avec les conditions habituelles de taux de prêts 1 % logement (1,5 % hors assurance).

Un site Internet dédié aux prêts « pass travaux » fournit tous les détails concernant les conditions et modalités d'attribution : <http://www.pret-pass-travaux.com>.

Les autres aides et subventions

Les conseils régionaux, généraux et municipaux proposent de nombreuses subventions et aides, notamment dans le cadre d'Opération programmée d'amélioration de l'habitat (OPAH). Dans tous les cas, les travaux doivent être exécutés par une entreprise.

Les associations départementales Pact Arim peuvent aider les propriétaires à élaborer leur projet de rénovation en leur fournissant des conseils techniques, administratifs et financiers.

ANNEXE C – Qualifications et certifications

La certification des produits, régie par le Code de la consommation, s'articule autour d'un référentiel mis au point et adopté conjointement par des professionnels, des organisations de consommateurs, un organisme certificateur et les pouvoirs publics (Service de la consommation et de la répression des fraudes).

Ce n'est pas le cas des certificats de qualification (règles définies seulement entre l'organisme certificateur et la profession) ou de la certification ISO (critères de qualité définis par entreprise).

De plus, les contrôles et audits d'admission et de renouvellement de la certification de produits sont effectués par un organisme certificateur indépendant présentant toutes les garanties de compétence nécessaires, puisqu'il doit lui-même se soumettre à un agrément.

Certifications de produits

On distingue deux types de certification de produits :

- le marquage « NF », qui est délivré par l'AFNOR (Association française de normalisation) ou des organismes qu'elle a mandatés. Outre la conformité du produit à un référentiel technique, le producteur doit prouver la conformité de son système qualité à des exigences issues de la norme ISO 9002 ;
- le marquage « CE », qui atteste la conformité du produit à une norme européenne. Cette dernière prévaut sur la norme française équivalente. Le marquage résulte d'une déclaration de conformité du fabricant. Les essais et contrôles restent sous sa responsabilité.

La certification ISO 9000

Il s'agit de la certification de l'ensemble des procédures et méthodes mises en œuvre par l'entreprise pour assurer la qualité de la fabrication et de la distribution de ses produits, ainsi que de ses services. ISO 9000 est une famille de normes internationales publiées par l'ISO (International Standards Organization) pour la mise en place et la gestion d'un « système de management » de la qualité dans les entreprises.

Les chartes et engagements de qualité

Il s'agit d'engagements pris par des entreprises vis-à-vis de leur clientèle. Ces chartes, engagements et garanties ont une vocation marketing. La vérification de leur application réelle n'est pas organisée de manière systématique.

Les certificats de qualification

Délivrés par des organismes regroupant les organisations de professionnels ainsi que des représentants de leurs clients importants et des institutions intéressées, les certificats de qualification visent à attester du niveau de qualification d'une entreprise par spécialité ou technique. Le certificat de qualification Qualibat, en particulier, propose un système complet d'évaluation des compétences techniques d'une entreprise (qualification), de sa gestion de la qualité (certification de système qualité) et de l'importance de ses moyens humains et financiers (classification).

Les différentes qualifications pouvant entrer en ligne de compte dans le choix d'une entreprise de rénovation de façades sont listées ci-dessous. Un site Internet (voir Annexe D – *Adresses utiles*, p. 182) permet de contrôler les certifications Qualibat obtenues par une entreprise.

PRÉPARATION DU SITE ET INFRASTRUCTURE

15 DÉCONTAMINATION ET TRAITEMENT CURATIF

153 CHAMPIGNONS

154 ASSÈCHEMENT DES MURS

STRUCTURE ET GROS ŒUVRE

21 MAÇONNERIE ET BÉTON ARMÉ COURANT

211 MAÇONNERIE ET BÉTON ARMÉ COURANT

212 RAVALEMENT

213 ENDUITS AUX LIANTS HYDRAULIQUES PROJETÉS

214 TRAVAUX PARTICULIERS ET TECHNIQUES SPÉCIFIQUES

217 TRAVAUX NEUFS ET DE RÉHABILITATION EN PIERRE

218 RESTAURATION DU PATRIMOINE ANCIEN (1)

219 RESTAURATION DES MONUMENTS HISTORIQUES

ENVELOPPE EXTÉRIEURE

34 CALFEUTREMENT ET PROTECTION DES FAÇADES

341 CALFEUTREMENT DE JOINTS DE CONSTRUCTION

342 PROTECTION DES FAÇADES PAR IMPERMÉABILISATION – CLASSE I1, I2, I3

343 PROTECTION DES FAÇADES PAR ÉTANCHÉITÉ – CLASSE I4

FINITIONS

61 PEINTURE

611 PEINTURE – RAVALEMENT

612 à 615 SPÉCIALITÉS DE LA PEINTURE

612 PEINTURE – RAVALEMENT

613 PEINTURE INDUSTRIELLE

614 FILAGE – DÉCORATION – DORURE

615 PEINTURE EN LETTRES ET ATTRIBUTS

ANNEXE D – Adresses utiles

Associations de consommateurs

ACDL (*Association des comités de défense des locataires*)
11, rue Bellefond, 75009 Paris
Tél. : 01 48 74 94 84

ARC (*Association des responsables de copropriété*)
27-29, rue Joseph-Python, 75020 Paris
Tél. : 01 40 30 12 82
www.unarc.asso.fr

CGL (*Confédération générale du logement*)
29, rue des cascades, 75020 Paris
Tél. : 01 47 66 18 17
www.lacgl.org

CLCV (*Consommation, logement, cadre de vie*)
59, boulevard Exelmans, 75016 Paris
Tél. : 01 56 54 32 10
www.clcv.org

CNL (*Confédération nationale du logement*)
8, rue Meriel, BP 119, 93104 Montreuil cedex
Tél. : 01 48 57 04 64

Organismes dispensateurs d'aides et subventions

ADEME (*Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie*)
27, rue Louis-Vicat, 75737 Paris cedex 15
Tél. : 01 47 65 20 00
www.ademe.fr

ANAH (*Agence nationale pour l'amélioration de l'habitat*)
8, avenue de l'Opéra, 75001 Paris
Tél. : 01 44 77 39 39
www.anah.gouv.fr

Fédération nationale des centres Pact-Arim
27, rue La Rochefoucauld, 75009 Paris
Tél. : 01 42 81 97 70
www.pact-habitat.org

Fédérations et chambres syndicales

CAPEB (*Confédération de l'artisanat et des petites entreprises du bâtiment*)

2, rue Béranger, 75003 Paris

Tél. : 01 53 60 50 00

www.capecb.fr

Conseil national de l'ordre des architectes (CNOA)

Tour Maine-Montparnasse

33, avenue Maine, BP 54, 75755 Paris cedex 15

Tél. : 01 56 58 67 00

www.architectes.org

FFB (*Fédération française du bâtiment*)

33, avenue Kléber, 75116 Paris

Tél. : 01 40 69 51 00

www.ffbatiment.fr

FFSA (*Fédération française des sociétés d'assurances*)

26, bd Haussmann, 75009 Paris

Tél. : 01 42 47 90 00

www.ffsa.fr

Ordre des géomètres-experts

40, avenue Hoche, 75008 Paris

Tél. : 01 53 83 88 00

www.geometre-expert.fr

SNI (*Syndicat national de l'isolation*)

10, rue du Débarcadère, 75852 Paris cedex 17

Tél. : 01 40 55 13 70

www.snisolation.fr

Syndicat national de l'hygiène

33, avenue Philippe-Auguste, 75011 Paris

Tél. : 01 44 64 89 55

Union nationale des entrepreneurs céramistes du bâtiment (UNECB)

6/14, rue la Pérouse, 75116 Paris

Tél. : 01 40 69 58 20

www.unecb.ffbatiment.fr

UNPVF (*Union nationale des entrepreneurs de peinture, vitrerie et finitions*)

9, rue la Pérouse, 75784 Paris cedex 16

Tél. : 01 40 69 53 73

Associations ou organismes d'intérêt général

AFNOR (Association française de normalisation)

11, avenue Francis-de-Pressensé, 93571 La Plaine Saint-Denis

Tél. : 01 41 62 80 00

www.afnor.org

ANIL (Association nationale pour l'information sur le logement)

2, bd Saint-Martin, 75010 Paris

Tél. : 01 42 02 05 50

www.anil.org

AQC (Agence Qualité Construction)

29, rue Miromesnil, 75008 Paris

Tél. : 01 44 51 03 51

www.qualiteconstruction.com

CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment)

84, avenue Jean-Jaurès, Champs-sur-Marne, 77447 Marne-la-Vallée cedex 2

Tél. : 01 64 68 82 82

www.cstb.fr

GRECAM (Groupe de recherche sur l'économie de la construction et de l'aménagement)

82, avenue Marceau, 75008 Paris

Tél. : 01 47 55 99 00

www.grecam.com

INC (Institut national de la consommation)

80, rue Lecourbe, 75015 Paris

Tél. : 01 45 66 20 20

www.conso.net

Qualibat

55, avenue Kléber, 75784 Paris cedex 16

Tél. : 01 47 04 26 01

www.qualibat.com

Qualité France (Groupe Bureau Veritas)

Immeuble « Le Guillaumet »

60, avenue du Général-de-Gaulle

92046 Paris-La-Défense cedex

Tél. : 01 41 97 00 74

www.qualite-france.com

Également aux éditions Eyrolles (extrait du catalogue)

Généralités

Jean-Paul ROY & Jean-Luc BLIN-LACROIX, *Dictionnaire professionnel du BTP*, 3^e éd. 2011, 848 p.

Enseignement professionnel et formation continue

Léonard HAMBURGER, *Maître d'ouvrage bâtiment. Guide pratique, technique et juridique*, 2012, 384 p.

Yves WILDLOECHER et David CUSANT, *Manuel de l'étude de prix. Entreprises du BTP*, 2012, 208 p.

Jean-Pierre GOUSSET, *Techniques des dessins du bâtiment*

- *Dessin technique et lecture de plan. Principes & exercices*, 2^e éd. 2013, 288 p.
- *Plans topographiques et plans d'architecte* (en préparation)
- *Plans de bureaux d'études (béton armé, charpente, électricité, fluides)* (en préparation)

Jean-Claude DOUBRÈRE, *Résistance des matériaux. Cours et exercices corrigés*, 12^e éd., 2013, 176 p.

Méthodes

Collectif Capeb/CTICM/ConstruirAcier, *Structures métalliques : ouvrages simples. Guide technique et de calcul d'éléments structurels en acier*, 2013, 104 p.

Collectif, *Lexique de construction métallique*, nouvelle édition revue et mise à jour par Jean-Pierre Muzeau, collection « Les essentiels acier », coédition ConstruirAcier, 2013, 368 p.

Marc LANDOWSKI & Bertrand LEMOINE, *Concevoir et construire en acier*, collection « Les essentiels acier », 2011, 112 p. coédition ConstruirAcier

Michel BRABANT, Béatrice PATIZEL, Armelle PIÈGLE & Hélène MÜLLER, *Topographie opérationnelle*, 3^e éd. 2011, 424 p.

Jean-Louis GRANJU, *Béton armé. Théorie et applications selon l'Eurocode 2*, 2011, 480 p.

Christian LEMAITRE, *Les matériaux de construction*

1. *Propriétés physico-chimiques des matériaux*, 2012, 144 p.
2. *Mise en œuvre et emploi des matériaux*, 2012, 288 p.

Eurocode (en coédition avec l'Afnor)

Jean-Louis GRANJU, *Introduction au béton armé. Théorie et applications courantes selon l'Eurocode 2*, 2012, 272 p.

APK, sous la direction de Jean-Pierre MUZEAU, *Manuel de construction métallique. Guide d'application de l'Eurocode 3*, 256 p.

Yves BENOIT, Bernard LEGRAND & Vincent TASTET, *Calcul des structures en bois. Guide d'application de l'Eurocode 5*, 2^e éd. 2011, 512 p.

– *Dimensionner les barres et les assemblages en bois. Guide d'application de l'Eurocode 5 à l'usage des artisans*, 2012, 256 p.

Marcel HUREZ, Nicolas JURASZEK & Marc PELCÉ, *Dimensionner les ouvrages en maçonnerie. Guide d'application de l'Eurocode 6*, 2009, 328 p.

Droit

Agnès CURAT, *Le mémento des concours d'architecture dans les collectivités territoriales*, 2011, 366 p.

Brice FÈVRE et Sébastien FOURAGE, *Le mémento du conducteur de travaux*, 3^e éd. 2010, 124 p.

Patricia GRELIER WYCKOFF, *Le mémento des marchés privés de travaux*, 3^e éd. 2011, 312 p.

– *Le mémento des marchés publics de travaux*, 5^e éd. 2012, 320 p.

– *Pratique du droit de la construction. Marchés publics et privés*, 6^e éd. 2010, 640 p.

– *Le mémento des contrats complexes de la commande publique*, 2012, 224 p.

Bernard de POLIGNAC, Jean-Pierre MONCEAU & Xavier de CUSSAC, *Expertise immobilière. Guide pratique*, 6^e éd. 2013

Jean-Louis SABLON, *Le contentieux des dommages de construction*, 2012, 400 p.

...et des centaines d'autres livres de BTP, de génie civil, de construction et d'architecture sur

www.editions-eyrolles.com