

Restauration Comment nettoyer les bétons anciens

Si la durabilité des bétons fabriqués et mis en œuvre actuellement ne fait que s'améliorer, nombre de bétons anciens viennent à présenter des désordres qui nécessitent des interventions de nettoyage ou des réparations d'envergure.

Édifice emblématique du patrimoine en béton, la cathédrale Notre-Dame de Royan (Charente-Maritime), de Guillaume Gillet, a fait l'objet d'une succession de campagnes de restauration, dont une actuellement en cours.



Doc. DR

Le béton aussi a des problèmes de peau. A fortiori lorsqu'il est ancien. Mais compte tenu de l'apparition somme toute récente de ce matériau dans l'histoire de la construction, les manifestations de son vieillissement offrent encore un large champ d'expérimentation. Qu'est-ce qu'un béton ancien, d'ailleurs ? « Il n'y a pas de véritable définition ni de limitation chronologique stricte, répond Élisabeth Marie-Victoire, responsable du pôle béton au Laboratoire de recherche des monuments historiques [LRMH]. Cela va du béton à base de ciment naturel employé à la fin du XIX^e siècle au béton armé des bâtiments construits dans l'entre-deux-guerres, puis dans l'après-guerre, lesquels représentent une grande part des 813 édifices en béton protégés au titre des Monuments historiques recensés en décembre 2014. »

La problématique de la préservation de ces bâtiments ne s'est pas forcément posée à mesure de leur vieillissement, tant la reconnaissance de leur valeur patrimoniale a été tardive. Sur le plan technique, la formulation du matériau et les conditions de sa mise en

œuvre par le passé ne sont pas toujours bien documentées. Le degré d'altération (esthétique ou structurelle) varie d'un édifice à l'autre. « Les bâtiments de Perret, comme l'église Saint-Joseph du Havre ou le palais d'Iéna, siège du Conseil économique, social et environnemental, à Paris, ont plutôt bien vieilli », constate Élisabeth Marie-Victoire. A contrario, la piscine de la Butte-aux-Cailles (Paris 13^e), bâtie en 1924, avait dû fermer au public en raison de l'état de dégradation avancé de la voûte en béton armé de son bassin. Et l'on se souvient que les halles du Boulingrin, à Reims, ont échappé de peu à la démolition.

Diagnosics affinés

Depuis une vingtaine d'années, en s'appuyant sur d'importants chantiers de restauration dans l'Hexagone, l'étude du vieillissement des bétons a pourtant progressé de manière notable. Les pathologies les plus fréquentes ont pu être recensées, afin d'affiner les diagnostics et de déterminer les méthodes de nettoyage et de réparation les plus appropriées (*lire l'encadré p. 26*).

Doc. Lefevre Rénovation



Près de 4000 m² de façades ont été nettoyés à l'église Saint-Jacques-le-Majeur de Montrouge (Hauts-de-Seine) par la technique de l'hydrogommage.

Comme tous les matériaux de construction, le béton est soumis à l'épreuve du temps. Mais, au-delà même de l'érosion naturelle, un béton ancien peut rapidement subir – de par sa nature, les conditions de sa mise en œuvre et son entretien – des détériorations plus importantes. Ainsi, la cathédrale Notre-Dame de Royan de l'architecte Guillaume Gillet, inaugurée en 1958, présentait déjà dans les années 1960 d'importants problèmes d'étanchéité.

Facteurs multiples

Le premier facteur de dégradation d'un béton ancien tient à sa composition chimique et minéralogique. Sa résistance mécanique, sa compacité et son homogénéité sont directement liés à la pureté de l'eau employée, à la nature et à la granulométrie des granulats, au dosage du ciment et de l'eau, conditions plus aléatoires par le passé. Aujourd'hui, les caractéristiques intrinsèques du matériau sont en effet mieux connues. Des réactions entre le ciment et les granulats, dites « alcaligranulats », peuvent ainsi provoquer la formation de sels. De même, d'un rapport eau sur ciment (E/C) trop élevé découlera la porosité du béton, principale cause de sa réaction aux agents agressifs présents dans l'environnement (gaz carbonique, sulfates, chlorures, etc.), lesquels se diffusent d'autant mieux à l'intérieur d'un matériau que celui-ci est perméable. La pénétration, puis la propagation des agents agressifs a donc une double incidence, sur les armatures métalliques et sur l'appareil composite, la corrosion des unes accélérant le processus de vieillissement de l'autre. Un autre facteur de dégradation tient à la mise en œuvre proprement dite. « Les bétons anciens ont souvent les armatures trop proches du nu extérieur des façades, remarque ainsi l'architecte Philip Samama, du cabinet

Rémy, spécialisé dans le ravalement d'immeubles. De même, les reprises de béton banché nécessitent davantage de soin. » En effet, les conditions de coulage dans les banches, tel que pratiqué avec les moyens techniques passés, ont pu générer leur lot de désordres.

Par ailleurs, les facteurs environnementaux contribuent au développement de pathologies diverses qui, de l'en-crassement de surface à l'éclatement, affectent plus ou moins profondément le matériau selon l'entretien dont il fait l'objet. La pollution urbaine ou industrielle (gaz d'échappement, chauffage...) provoquera également des réactions sulfatiques responsables de salissures, de dépôts ou de croûtes, voire de fissurations.

Mais c'est surtout l'eau dont l'action est la plus néfaste, qu'elle résulte de remontées capillaires, de phénomènes accidentels (ruissellements, infiltrations, etc.) ou météorologiques. Il en va ainsi des eaux douces, susceptibles d'accroître la porosité du béton et de l'éroder superficiellement; des eaux acides (pluviales, stagnantes), principalement composées d'acides sulfurique et nitrique, qui provoquent dissolution et décomposition du matériau; des eaux chargées en sulfates (eau de mer, embruns), qui réagissent chimiquement en provoquant des gonflements internes, cause de fissurations; sans oublier les eaux interstitielles présentes dans le réseau capillaire du béton, qui, soumises au cycle gel-dégel, provoqueront par leurs mouvements des phénomènes d'écaillage, puis d'éclatement.

Enfin, le matériau peut subir des contaminations biologiques (algues, mousses, lichens), en particulier dans des zones plus difficiles d'accès lors de l'entretien, humides et non ensoleillées.

Les dégradations imputables aux corps présents dans l'environnement ne sont pas toujours visibles pen- (●●●)

Traiter les armatures corrodées

■ Au-delà des altérations d'ordre esthétique, la pathologie la plus lourde pour un béton ancien est la corrosion des armatures. Celle-ci entraîne en effet des risques de chute de matière, mais aussi, à un stade avancé, elle peut menacer la tenue de l'ouvrage. « Ce processus de dégradation dépasse souvent ce qui est constaté à l'œil nu : épaufrures, fissurations et autres éclatements ne sont généralement que la partie émergée de l'iceberg », explique Élisabeth Marie-Victoire, responsable du pôle béton au Laboratoire de recherche des monuments historiques (LRMH). D'où l'importance d'un diagnostic approfondi préalable à toute opération. De surcroît, dans le cas des monuments historiques, les interventions de restauration, conformément aux principes édictés par la charte de Venise, ne doivent pas dénaturer l'aspect originel de l'édifice. Le traitement usuel consiste à dégager les armatures en purgeant les parties non adhérentes ou friables, puis à éliminer la corrosion, foisonnante ou de surface. Ensuite, divers procédés peuvent être mis en œuvre.

Selon les cas, les aciers trop endommagés peuvent être remplacés, les autres recevant un traitement de passivation ou un inhibiteur de corrosion, solution adaptée lorsque les armatures sont proches du parement. Des traitements électrochimiques (réalcalinisation, déchloruration, protection cathodique à courant imposé, protection galvanique, etc.) peuvent être envisagés, selon la nature du béton et les particularismes du phénomène de corrosion révélés par les analyses. Autre aspect important : la réfection des zones dégagées à l'aide d'un mortier de réparation, prêt à l'emploi ou composé spécifiquement. « Lors de la restauration de la flèche de l'église de Lamotte-Warfusée [Somme], il a fallu reconstituer un béton le plus proche possible de l'original, indique Adrien Errigo, chef de secteur chez Freyssinet. Cela, afin de parer aux éventuelles incompatibilités des deux appareils. » « L'enjeu est d'autant plus grand que, dans le cas des monuments historiques, le ragréage doit respecter l'esthétique du bâtiment », renchérit Henry de Reviers. L'ingénieur



Mise en œuvre du mortier de réparation sur les arêtres de la flèche de l'église de Lamotte-Warfusée (Somme).

travaux de l'entreprise spécialisée Lefevre Rénovation a été confronté à une problématique similaire sur le chantier de l'église Saint-Jacques-le-Majeur de Montrouge (Hauts-de-Seine) : « Non seulement il nous a fallu mettre au point le dosage ciments-granulats-pigments le plus approprié, mais aussi faire en sorte que les reprises se fondent le mieux possible dans le parement d'origine. Nous les avons vieillies artificiellement par la technique du gommage, avec, par endroits, une restitution des décors bouchardés. »

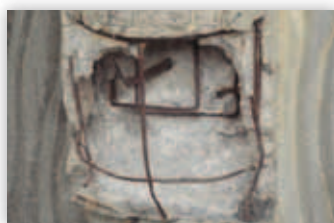
(●●●) dant la phase d'incubation. Le phénomène dit de « carbonatation » du béton en est l'exemple le plus éloquent. Il est provoqué par la propagation dans le béton du dioxyde de carbone contenu dans l'air (donc sous forme gazeuse), où il réagit avec l'eau interstitielle, transformant les hydroxydes en carbonate et abaissant le pH du béton. Lorsque la zone de carbonatation atteint les armatures en acier, celles-ci se corrodent. Ce processus de détérioration est fortement lié aux conditions d'humidité du matériau, il peut également s'accompagner d'une pollution due à la présence d'ions chlorures. L'expansion de la rouille au sein du béton provoque alors différents désordres, allant des fissures à l'éclatement.

Lorsque le matériau n'est pas dégradé mais seulement sali, son nettoyage reste de l'ordre de l'entretien et de la prévention. « Mais pour peu qu'il soit poreux avec de faibles enrobages autour des armatures – ce qui est la principale caractéristique des bétons anciens –, le nettoyage sera nécessairement associé à des opérations curatives au niveau des armatures », indique Élisabeth

Marie-Victoire. On peut répartir les techniques de nettoyage en trois catégories : les techniques par voie humide, par projection de matière ou par voie sèche. « Le choix dépendra de la configuration du chantier, en extérieur ou intérieur ; de l'ampleur de la zone à traiter ; de la nature et du degré de l'altération ; de la fragilité du béton ; de son aspect [strié, granuleux, bouchardé, etc.], mais aussi des conditions environnementales », détaille Luc Ellermann, responsable du développement de l'Entreprise pour la conservation du patrimoine.

Mais il faut également prendre en compte les limites de chaque technique. « Du point de vue du rendement, il est évident, par exemple, qu'un procédé de microabrasion, grâce auquel on peut nettoyer environ un mètre carré de surface par jour, est inenvisageable sur une façade. » De même, les techniques nécessitant un important apport d'eau ne peuvent pas être mises en pratique en intérieur. Et plus l'épiderme du béton est fragile, moins le nettoyage doit être agressif. Enfin, on traite de façon différente les salissures (cendres volantes, suie, carbone amorphe,

Principales pathologies recensées



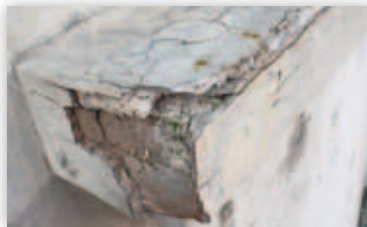
CORROSION DES ARMATURES

Oxydation des armatures métalliques du béton provoquée par le phénomène de carbonatation (vieillessement naturel du béton) combiné à la présence d'eau. L'acier se corrode par piqûres ou par feuilletés.



ÉCLATEMENT

Conséquence d'une altération du béton, l'éclatement peut avoir plusieurs causes (corrosion des armatures, migration de sels en surface, cycle gel-dégel, etc.)



NIDS DE CAILLOU

Défaut volumique sur un parement, constitué de granulats agglomérés. Découle d'une mauvaise mise en œuvre (vibration médiocre, coulage du béton dans les coffrages depuis un point trop élevé, etc.).

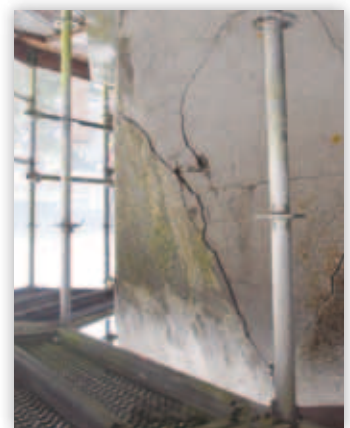


ÉCAILLAGE

Dégradation de la surface du béton due à l'action combinée des cycles gel-dégel et des sels fondants, caractérisée par le détachement progressif « d'écaillés » de mortier de la surface.

FISSURE

Petites ouvertures longilignes observables dans le parement. Une fissure traversante peut mettre en péril la stabilité de la structure.

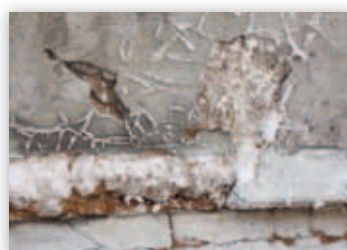


FUITE DE LAITANCE

Mélange d'eau et des éléments les plus fins du béton échappés d'un coffrage lors de la mise en œuvre, dessinant une coulure sur le parement.

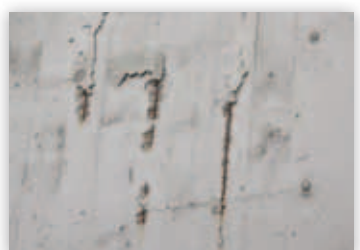
EFFLORESCENCE

Cristallisation de sels solubles (nitrates, sulfates) à la surface d'un béton poreux et soumis à l'humidité, prenant l'apparence de dépôts blanchâtres de type « barbe à papa » et symptôme d'humidité.



ÉPAUFURURE

Défaut de surface dû à un choc accidentel ou conséquence d'un écaillage lié à la corrosion des armatures, l'épaufrure est un éclatement du béton provoquant le détachement de fragments.



Pour pouvoir formuler un diagnostic, les observations à l'œil nu doivent être confirmées par des analyses du matériau et de la structure.

sous-produits de combustion, graisse, suif de bougies, etc.) et les recouvrements biologiques. En outre, dans certains cas, il peut s'avérer nécessaire de coupler plusieurs techniques. « Pour réhabiliter le granito qui revêt les parements de la crypte du Hartmannswillerkopf [Haut-Rhin], on a effectué un nettoyage principal avec un latex complété par un curetage à l'outil pour retirer les croûtes de calcite », précise Luc Ellermann. L'équation comporte donc de multiples paramètres.

Voie humide

La voie humide rassemble plusieurs techniques utilisant de l'eau ou des solutions dégrassantes, soit pour le nettoyage, soit pour le rinçage, et dont l'application sur le support s'effectue avec ou sans pression.

Le nettoyage à haute pression consiste en une forte projection d'eau. Réservé à l'entretien de bétons résistants ayant reçu au préalable un traitement hydrofuge ou recouverts d'un enduit, il est à proscrire pour des bétons fragiles, en raison de son agressivité, ou poreux, en raison

des risques d'infiltration, de migration et de mobilisation des sels qu'il peut provoquer. Idem pour le nettoyage à l'eau sans pression. Qui plus est, il est difficile d'appliquer ces techniques à une seule zone isolée. La nébulisation, pulvérisation de microgouttelettes (brouillard), s'avère une solution moins agressive, bien qu'elle présente les mêmes risques d'imbibition du support. « Ces nettoyages à l'eau se pratiquent pour un certain type d'édifices, mais sont rarement préconisés s'agissant de monuments historiques où le béton est le plus souvent laissé à l'état brut », précise Élisabeth Marie-Victoire.

L'injection-extraction d'eau sous vide est un lavage à base d'eau froide sous vide d'air. Elle permet de recourir à l'eau dans des interventions intérieures, sans risque de fuite ou de projection, comme ce fut le cas sur les parements de l'église Sainte-Odile (Paris 17^e), où cette technique a été testée en 2008. Le principe ? Une projection d'eau à basse pression effectuée par une tête d'aspiration appliquée sur le support en béton, (●●●)



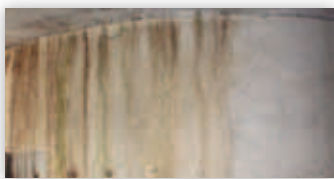
RECOUVREMENT BIOLOGIQUE

On distingue trois formes de contaminants biologiques : les algues (appareil végétatif sans feuille, tige ou racine) ; les mousses (coussinets de tiges garnies de feuilles fixées au support par des poils) ; et les lichens (association d'un champignon et d'une algue, fixée au support par des racines). La colonisation est conditionnée par les facteurs de luminosité, de température et d'humidité du support.



GONFLEMENT

Excroissance convexe du béton provoquant des fissurations, généralement suivies par un écaillage et des épaufrures. Elle peut être causée par la corrosion des armatures, l'impact des cycles gel-dégel, une réaction alcaligranulat ou une attaque sulfatique.

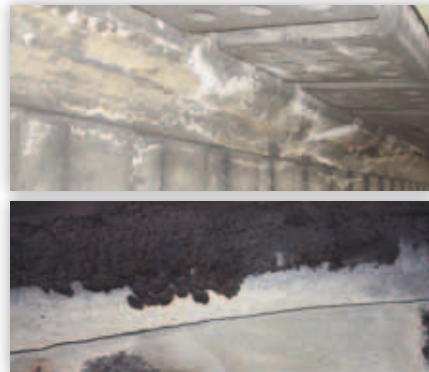


INFILTRATION

Trainées colorées sur le parement indiquant un ruissellement d'eau. L'humidité entraîne le développement de contaminations biologiques.

FAÏENÇAGE

Formation de fissures fines qui se présentent en réseaux le plus souvent hexagonaux à la surface du béton.

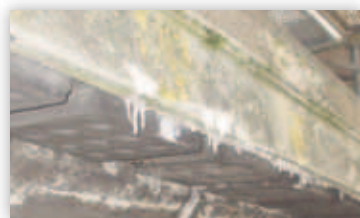


SALISSURES

Dépôts sur la surface du béton de microparticules présentes dans l'atmosphère (cendres, suies, carbone, fumées, graisses, gaz, etc.), pouvant s'accompagner d'encroûtements noirs. Les encrassements ont tendance à se concentrer sur les éléments en saillie (bandeaux, linteaux, acrotères, etc.)

VARIATIONS DE TEINTE

Des différences de couleur sur une paroi peuvent être causées par une intervention postérieure à la construction avec la mise en œuvre d'un béton d'une composition différente.



STALACTITE

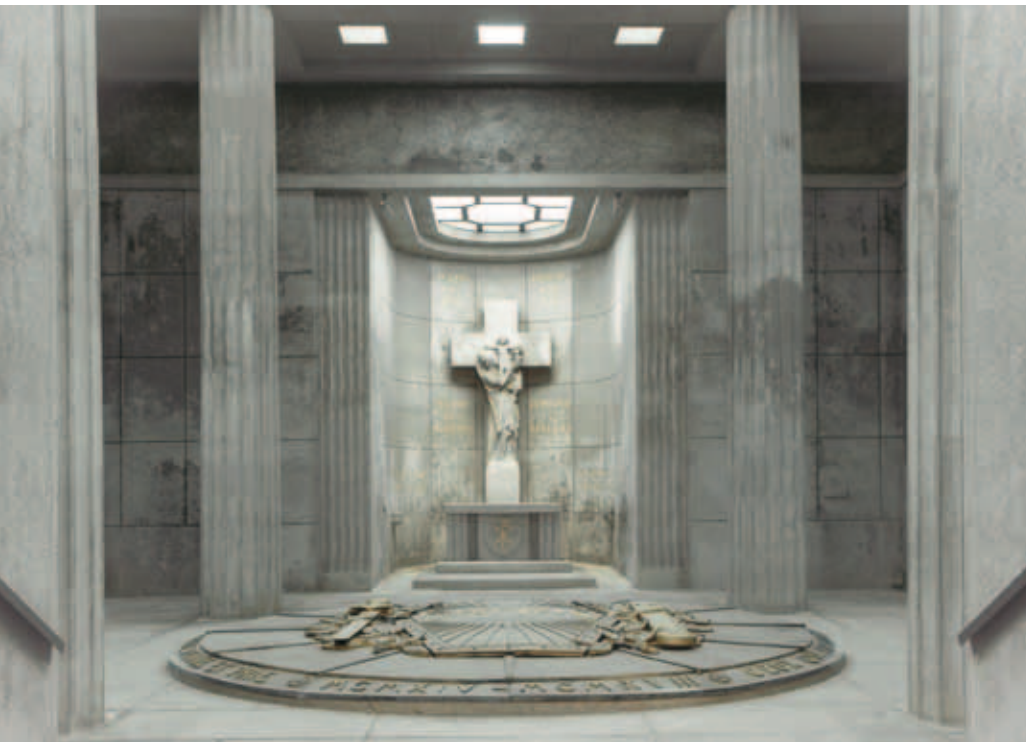
Concrétion de forme allongée, blanchâtre ou teintée de rouille (en cas de corrosion des armatures), souvent en calcite, trahissant une présence d'eau dans la matrice ou les fissures du béton.

TRACES DE ROUILLE

Taches provoquées par la corrosion des armatures et la circulation de l'eau dans le béton.



Docs. LRMH - Lefevre Rénovation



Avant nettoyage, la crypte du Hartmannswillerkopf (Haut-Rhin) présentait notamment des concrétions calcaires très endurées. Ci-dessous, un exemple de telles concrétions.



Doc. ECP

(●●●) créant un vide. L'action combinée de l'air et de l'eau dans le vide permet d'éliminer les salissures par l'eau de traitement, laquelle est aspirée dans le même temps. Cette solution douce ménage l'épiderme du béton, tout en le débarrassant efficacement des salissures noires ou des croûtes; elle évite également la propagation de l'eau dans le support puisque le séchage est relativement rapide.

Le nettoyage à la vapeur d'eau permet de dégraisser des parements intérieurs ou extérieurs faiblement indurés, les salissures se décollant sous l'action de la chaleur. Ce procédé est particulièrement approprié pour les recouvrements biologiques, car il limite la recolonisation après le nettoyage. Grâce à un apport d'eau réduit, les risques d'infiltration sont minimisés, à condition que le support soit peu poreux.

Autre méthode employée, dans le domaine des monuments historiques notamment, celle du cataplasme. Elle consiste à appliquer sur le support, au moyen d'une compresse ou par projection, un désincrustant neutre humidifié, qui désolidarise les corps gras, salissures, croûtes noires de la couche superficielle. Après un temps d'imprégnation de quelques jours, le cataplasme est retiré; le nettoyage est complété par un rinçage et un brossage doux qui éliminent les derniers résidus. Avantage: l'eau ne pénètre que superficiellement dans le matériau.

Projection de matière et voie sèche

Pour les nettoyages intérieurs ou les supports trop fragiles pour tolérer la voie humide, on privilégiera des méthodes d'abrasion par projection de matière ou des peulables, voire, en dernier recours, le laser.

Les procédés abrasifs sont plus ou moins durs. Agressif, le sablage à sec peut endommager le support (perte de matière), il est donc globalement à proscrire pour les bétons anciens. On préférera le gommage, projection de poudres fines chimiquement neutres, grâce à de l'air comprimé. Adapté à de grandes surfaces, il dégage néanmoins de la poussière et disperse des poudres

dans l'atmosphère. La version humide de cette technique, l'hydrogommage, permettra de limiter les poussières aériennes, grâce à l'apport d'eau dans le mélange d'air et de microgranulats projeté également à basse pression. « Cette technique, que nous avons mise en œuvre pour nettoyer les façades de l'église Saint-Jacques le Majeur de Montrouge [Hauts-de-Seine], est l'une des plus efficaces et des plus couramment employées en restauration patrimoniale », précise Henry de Reviers, ingénieur travaux pour l'entreprise spécialisée Lefèvre Rénovation. Elle permet de nettoyer de grandes surfaces extérieures.

La technique d'abrasion la plus délicate est le micro-sablage (microabrasion), réservée à de très petites surfaces, ou à la statuaire. L'indice de dureté sur l'échelle de Mohs de l'abrasif choisi doit être inférieur à la résistance du matériau traité. « On peut utiliser une poudre de noyaux de pêches », illustre Luc Ellerman.

En voie sèche et sans abrasion, le peeling, développé il y a quelques années, est particulièrement adapté aux nettoyages en intérieur. Il consiste en l'application sur le support d'une pâte à base de latex, qui, après polymérisation, prend l'aspect d'un film emprisonnant les salissures, que l'on retire à la main.

Enfin, bien que permettant des interventions d'une très grande précision, sans altération de l'épiderme, le laser demeure, compte tenu de son coût, de la lenteur et la complexité de sa mise en œuvre, rarement utilisé.

« Il n'existe pas de solution idéale pour nettoyer un béton ancien, mais autant de solutions que de cas particuliers », conclut Élisabeth Marie-Victoire. Par ailleurs, les techniques évoluent au gré des expériences... et du développement des pathologies. Nul ne peut ainsi prédire comment vieilliront les bétons ultraperformants d'aujourd'hui. La dermatologie du béton a donc de beaux jours devant elle!

Félicie Geslin

En savoir plus

- « Rénovation des façades, guide à l'usage des professionnels », Éditions Eyrolles (2013).
- « Le nettoyage des bétons anciens : guide des techniques et aide à la décision », *Les Cahiers techniques du cercle des partenaires du patrimoine* n° 4 (2009).
- « Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion », AFGC et Cefracor, 2003 www.concretectorrosion.net
- « Le béton et les monuments historiques », *Monumental* n° 16, Éditions du patrimoine (1997).
- « Les altérations visibles du béton : définitions et aide au diagnostic », *Cahiers techniques du cercle des partenaires du patrimoine* n° 1 (1996).