

La réalcalinisation, une nouvelle technique de conservation des monuments historiques en béton armé

Évaluation de l'efficacité, de la durabilité et de l'innocuité des traitements

Emmanuel Cailleux et Élisabeth Marie-Victoire

Résumé Les phénomènes de corrosion des armatures provoqués à la suite d'une carbonatation des hydrates du ciment sont l'une des principales causes d'altération des monuments historiques construits en béton armé. Dans ce cadre, s'ils montraient leur efficacité et si les traitements étaient réalisés suffisamment tôt, les traitements de réalcalinisation présenteraient l'avantage de limiter les traditionnels processus de purge et de ragréage, permettant ainsi de conserver les bétons anciens. Dans le but d'évaluer l'efficacité mais aussi la durabilité et l'impact de ces traitements, plusieurs séries d'essais ont été menées sur des échantillons de bétons anciens de compositions différentes, issus de trois édifices protégés au titre des monuments historiques. Au cours des deux ans qui ont suivi l'application des réalcalinisations, les traitements ont été caractérisés au moyen de différentes techniques analytiques.

Mots-clés Corrosion, béton armé, traitement électrochimique, réalcalinisation, monument historique.

Abstract **Assessment of the application of realkalisation treatments for the preservation of historical monuments made of reinforced concrete**

The corrosion of steel rebars by carbonation process is one of the main sources of decay of historical monuments made of reinforced concrete. If their efficiency was established, the electrochemical realkalisation treatments used for the restoration of such structures could be attractive to limit concrete removal and patch repair processes. In order to investigate the efficiency of these treatments and also their durability and impact on concrete, several tests were performed on ancient concrete samples with different compositions coming from three historical monuments. During the two years following the application of the realkalisations, the treatments were characterised by several analytical techniques.

Keywords Corrosion, reinforced concrete, electrochemical treatment, realkalisation, historical building.

La construction des premières structures en béton armé date de la seconde moitié du XIX^e siècle. À cette époque, la composition globale de ce « nouveau » matériau était déjà très proche de celle d'un béton actuel : une matrice de ciment assurant la cohésion d'un squelette constitué de sable et de granulats, à laquelle des armatures métalliques (barres, treillis...) étaient ajoutées pour assurer une résistance mécanique en traction (*figure 1*) [1]. Toutefois, à cette époque, leur formulation et leur mise en œuvre étaient souvent empiriques et, au cours du temps, plusieurs altérations (ou pathologies) se sont développées sur les édifices anciens. Parmi celles-ci, les plus courantes sont les fissurations et les écaillages, apparaissant à la suite d'une corrosion des armatures métalliques liée à une réaction de carbonatation du béton [2].

Ce processus de carbonatation concerne tous les bétons et correspond à une évolution naturelle du matériau. Il s'agit d'une transformation plus ou moins rapide des composés hydratés de ciment sous l'effet d'une réaction avec le dioxyde de carbone de l'air qui s'accompagne d'une importante variation de pH [3]. En effet, après sa mise en œuvre, le pH du béton est généralement compris entre 12 et 14. À ces valeurs très basiques, les armatures sont dans un

état dit « passif », pour lequel une couche d'oxydes très stable se forme à leur surface et les protège. Au cours du temps, le dioxyde de carbone dissous dans l'eau réagit avec les différents éléments du ciment : c'est le processus de carbonatation. Ce phénomène progresse depuis la surface extérieure vers l'intérieur du matériau. Outre les modifications microstructurales qu'il produit, il génère également une décroissance importante du pH qui se stabilise autour de 8-9. À ces valeurs, la couche de passivation protégeant les aciers n'est plus stable. Le film passif se détruit progressivement et la réaction de corrosion peut alors se développer en présence d'une humidité suffisante. Les croissances d'oxydes autour des armatures résultant de ces réactions génèrent des contraintes importantes qui peuvent conduire à des fissurations ou à des ruptures du béton d'enrobage (formation d'épaufrures) (*figure 1*). Ces phénomènes sont d'autant plus rapides et significatifs que les profondeurs d'enrobage des aciers sont faibles.

Lorsque l'on est confronté à de telles altérations, les techniques de réparation traditionnelles consistent, le plus souvent, à éliminer mécaniquement le béton altéré, puis à protéger les armatures au moyen d'un produit de passivation

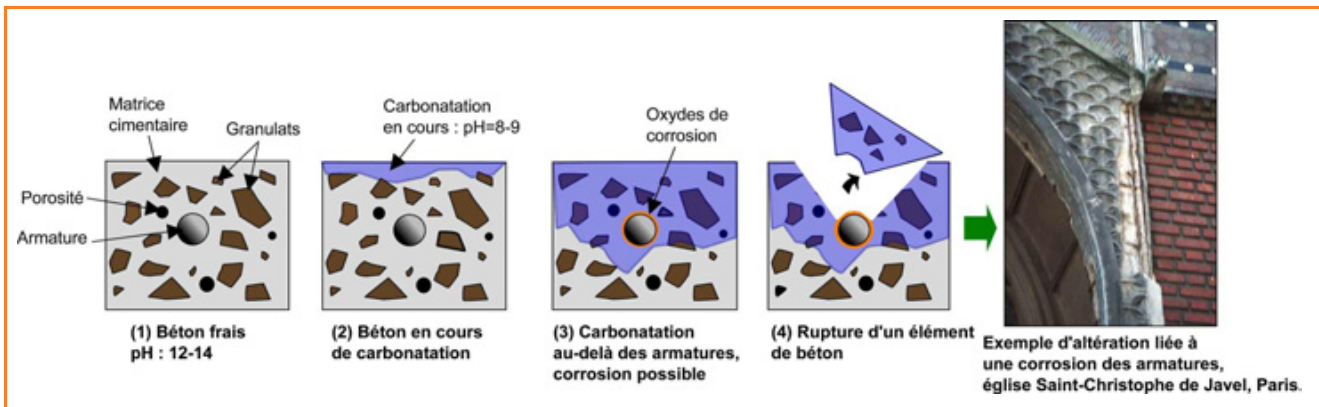


Figure 1 - Mécanisme d'altération du béton lié à un processus de corrosion des armatures induit par une carbonatation du béton.

et enfin à appliquer un produit de réparation [4]. Ces techniques traditionnelles ne sont pas préventives. Elles nécessitent des éliminations (purges) importantes de béton afin de dégager totalement les armatures corrodées et de ne pas laisser côte à côte des zones de corrosion active et des zones passives. Par ailleurs et spécialement pour les édifices anciens, des problèmes de compatibilité mécanique et esthétique peuvent également apparaître lors de l'utilisation de ces produits. Récemment, de nouvelles solutions de réparation, telles que les traitements de réalcalinisation, sont apparues sur le marché français. Ces techniques électrochimiques ont pour objectif d'accroître le pH du béton carbonaté autour des armatures en utilisant le passage d'un

courant électrique au travers des aciers et la migration d'une solution alcaline depuis la surface externe du béton vers les armatures [5-6] (voir encadré). Ces traitements sont à la fois préventifs vis-à-vis du phénomène d'épaufures et curatifs vis-à-vis de la carbonatation. S'ils montraient leur efficacité, ils constitueraient donc une alternative très intéressante aux réparations traditionnelles très invasives, notamment dans le cadre de la restauration d'édifices anciens protégés au titre des monuments historiques.

Actuellement, les principaux mécanismes pouvant être mis en œuvre au cours des traitements de réalcalinisation (migration de l'électrolyte alcalin et réaction d'électrolyse de l'eau) ont été identifiés. Les influences des principaux

Les traitements de réalcalinisation

La réalcalinisation est une méthode électrochimique ayant pour objectif de traiter la corrosion des armatures liée à une carbonatation du béton. En Europe, cette technique a été développée et commercialisée en Norvège à la fin des années 80. L'objectif de ce traitement est d'accroître l'alcalinité du béton autour des armatures afin qu'un film de protection « passif » puisse se reformer autour des aciers. Lors de son application, un treillis métallique est fixé temporairement à la surface du béton. Celui-ci est ensuite recouvert d'une pâte électrolytique, habituellement constituée de fibres cellulosiques, qui est à son tour imbibée d'une solution alcaline. Les électrolytes généralement utilisés sont à base de carbonate de sodium (Na_2CO_3) ou de carbonate de potassium (K_2CO_3) [7, 15].

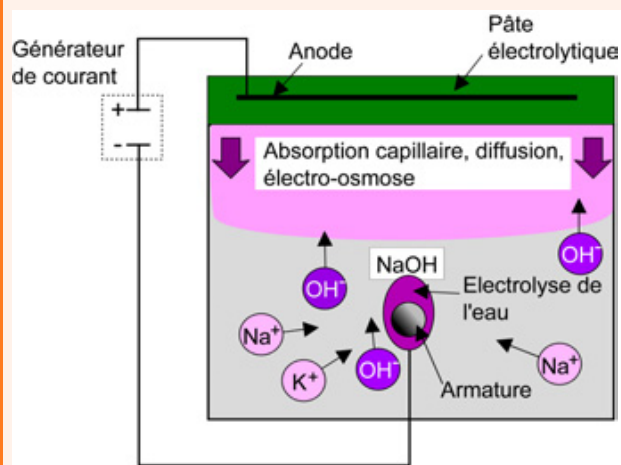


Schéma de principe du traitement de réalcalinisation par courant imposé [5].

La réalcalinisation met en œuvre simultanément deux phénomènes :

- **La migration**, dans le béton, de la solution alcaline appliquée en surface de la zone à traiter. Sa pénétration peut se faire par absorption capillaire, par diffusion ou encore par électro-osmose, c'est-à-dire sous l'effet d'un champ électrique. Simultanément, un déplacement des ions alcalins déjà présents dans le béton peut aussi être observé (phénomène d'électromigration). Ainsi, les ions négatifs (OH^-) sont déplacés vers la surface du béton et les ions positifs (Na^+ ...) sont attirés vers les armatures.

- **Une réaction d'électrolyse de l'eau** au niveau des armatures, permettant de générer des ions OH^- autour des aciers. La formation des OH^- permet de former un anneau de réalcalinisation qui se développe radialement autour des armatures. Cette réaction est obtenue par une polarisation des aciers : le potentiel de l'acier est artificiellement déplacé à une valeur d'environ $-1\,000$ mV (par rapport à une électrode de référence au sulfate de cuivre) au moyen du passage d'un courant électrique. Deux techniques peuvent alors être distinguées : par courant imposé et par anode sacrificielle. La première utilise un générateur de courant connecté aux armatures [8]. Pour la seconde, le courant est apporté par la consommation progressive d'une anode sacrificielle (habituellement en alliage d'aluminium) placée en surface du béton.

La durée d'un traitement peut s'étendre de quelques jours à plusieurs semaines [8]. Un projet de norme européenne concernant la réalcalinisation prévoit que ce traitement devrait être terminé lorsqu'une charge totale de $200\text{ A}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ a été délivrée [16]. Il recommande également de ne pas dépasser un seuil de densité de courant de $4\text{ A}/\text{m}^2$ sous peine de voir apparaître des endommagements du béton ou des interfaces armature/béton. À la fin du traitement, les armatures, le treillis et le générateur de courant sont déconnectés. Le treillis métallique et la pâte électrolytique sont déposés. La surface de béton est nettoyée. Un mortier ou une peinture peuvent parfois être appliqués afin de limiter les phénomènes de recarbonatation.

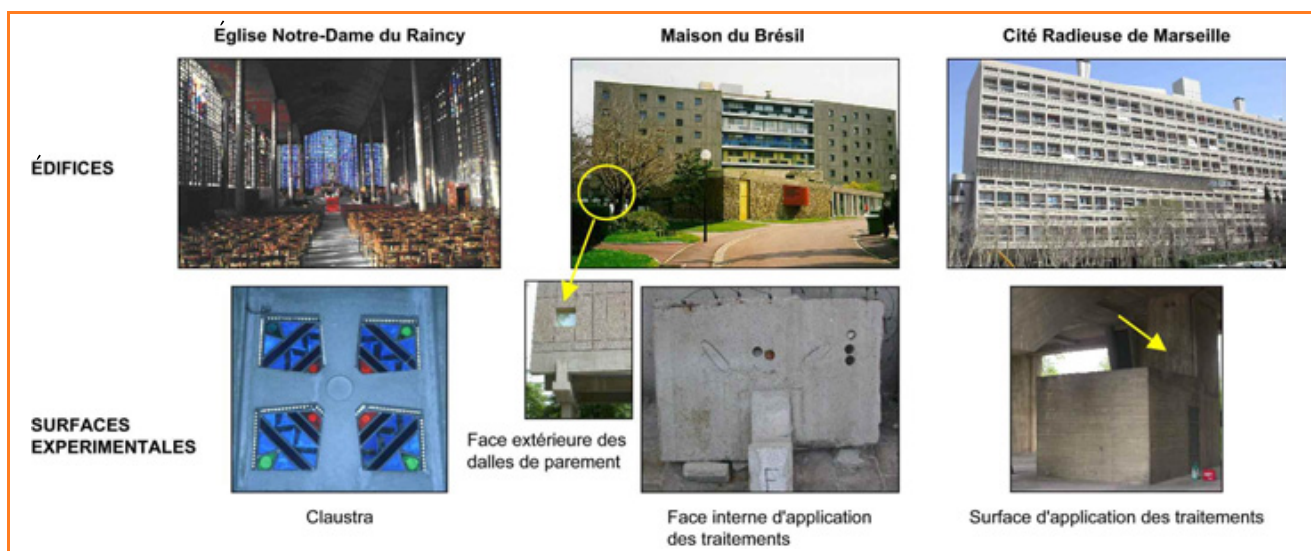


Figure 2 - Édifices et zones d'essais.

paramètres du traitement (résistivité du béton, densité de courant, concentration en alcalins...) sont également assez bien définies, bien que l'amplitude de certains phénomènes reste encore à évaluer de façon plus approfondie, notamment concernant la pénétration de l'électrolyte alcalin [5, 7-10]. En contrepartie, peu d'études concernent la durabilité des traitements. Les évolutions des ions hydroxydes dans le temps, la sensibilité au phénomène de lessivage (sous l'effet des eaux de pluies), l'influence de la composition du béton (notamment pour des ciments contenant des laitiers⁽¹⁾ ou des fumées de silice) ou encore la vitesse de recarbonatation n'ont été que très peu évaluées [7, 11-13]. Enfin, plusieurs effets secondaires ont été mis en évidence au cours de précédents travaux. Il s'agit principalement d'un endommagement du béton sous l'effet de densités de courant trop élevées et de la formation de composés expansifs issus d'une réaction (dite « alcali-granulat ») s'établissant entre les alcalins présents dans le béton et la silice de certains granulats dits « potentiellement réactifs » (PR) ou « potentiellement réactifs à effet de pessimum » (PRP) [6-9]. Les granulats PRP présentent une réactivité très importante et contiennent une teneur en silice réactive supérieure à une concentration critique dite « teneur pessimale ».

Afin de pouvoir répondre à ces questions, deux programmes de recherche de trois ans ont été menés au sein du Cercle des Partenaires du Patrimoine depuis 1999 sur la conservation des bétons anciens. Au cours de ces études, deux techniques de réalcalinisation ont été testées : l'une utilisant un courant imposé et l'autre basée sur la consommation d'une anode sacrificielle. Les traitements ont été appliqués sur des éléments de béton armé de compositions différentes, provenant de trois édifices anciens protégés au titre des monuments historiques. Plusieurs techniques analytiques ont été utilisées afin de caractériser l'efficacité, la durabilité et l'impact de ces traitements. Un suivi dans le temps sur une période de deux ans a aussi été mené.

Application des traitements

Édifices et surfaces d'expérimentation

Les traitements de réalcalinisation ont été appliqués sur des éléments de béton armé issus de trois édifices (figure 2) :

- Des claustras de l'église Notre-Dame du Raincy (93) de dimensions 60 x 60 x 8 cm³. Construite entre 1922 et 1923 par les frères Perret, cette église se caractérise par l'utilisation, entre les piliers porteurs, de claustras de remplissage utilisant la répétition de cinq formes géométriques simples. En raison d'altérations liées à la corrosion des armatures, la plupart de ces claustras ont été remplacés entre 1994 et 1996.

- Des dalles de parement d'environ 1 m² issues de la Maison du Brésil à la Cité Universitaire de Paris. Cet édifice construit entre 1957 et 1959 par Le Corbusier a été fermé en 1995 ; une phase de restauration s'étalant de 1999 à 2000 a permis sa réouverture. Au cours de cette phase, la majorité des panneaux de parement a été remplacée à l'identique.

- Une zone d'essai d'environ 1 m² localisée sur la façade ouest de la Cité Radieuse de Marseille. Ce bâtiment construit par Le Corbusier entre 1947 et 1951 est une œuvre clé de l'histoire de l'architecture française du XX^e siècle. En raison de nombreuses altérations du béton, une phase de restauration de l'édifice a débuté en 2004.

Pour tous ces bâtiments, les diagnostics menés avant restauration ont conclu à des altérations liées à une corrosion des armatures induite par la carbonatation. Les principales caractéristiques physico-chimiques et microstructurales des bétons sont regroupées dans le *tableau 1*.

L'application des traitements

Les réalcalinisations ont été réalisées par les sociétés commercialisant les traitements. Les paramètres d'application sont donnés dans le *tableau II*. La *figure 3* montre la mise en œuvre de techniques par courant imposé et anode sacrificielle sur les dalles de parement issues de la Maison du Brésil.

Protocole d'évaluation

Les traitements de réalcalinisation ont été caractérisés au moyen de différentes techniques usuelles de diagnostic du génie civil : pulvérisation d'indicateur coloré, cartographie de potentiel, analyse par fluorescence X, observations au microscope électronique à balayage (MEB) et analyse au spectromètre à dispersion d'énergie (EDS). Ces tests avaient

Tableau I - Principales caractéristiques des bétons des différents sites.

Édifice	Porosité accessible à l'eau (%)	Nature du liant	Réactivité des granulats par rapport à l'alcali réaction
Église du Raincy	~ 16	Ciment Portland	Potentiellement réactifs
Maison du Brésil	~ 17	Ciment Portland, ajouts de laitiers et cendres volantes	Potentiellement réactifs
Cité Radieuse	Entre 18 et 24	Ciment Portland	Réactivité peu probable

Tableau II - Paramètres des traitements et récapitulatif des évolutions de pH.

Surfaces expérimentales et traitements	Durée (j)	Anode	Électrolyte	Densité de courant (A/m ²)	Charge totale (A.h/m ²)	Virage de la phénolphtaléine	
						Juste après traitement	Deux ans après
Église du Raincy							
Courant imposé	11	Alliage de titane	K ₂ CO ₃	-	-	oui	-
Anode sacrificielle	52	Alliage d'aluminium	Na ₂ CO ₃	-	0,095-0,115	non	-
Maison du Brésil							
Courant imposé	6	Alliage de titane	K ₂ CO ₃	6,25	775	oui	non
Anode sacrificielle	29	Alliage d'aluminium	Na ₂ CO ₃	0,22	156	oui	non
Cité Radieuse							
Courant imposé	9	Alliage de titane	K ₂ CO ₃	1	219	oui	oui

pour principaux objectifs d'évaluer les variations de pH des bétons, de vérifier la migration de l'électrolyte alcalin ainsi que son possible lessivage sous l'effet de la pluie, d'estimer l'activité de corrosion des armatures et notamment une éventuelle repassivation des aciers, et enfin d'identifier la formation éventuelle de nouveaux composés pathogènes. Afin de pouvoir comparer les résultats obtenus sur les bétons réalcalinisés, des éléments témoins, non traités, ont été caractérisés parallèlement.

Résultats

Aspect visuel

Après traitement, un « jaunissement » assez important a été constaté en surface des bétons de la Maison du Brésil et de la Cité Radieuse. Des tests complémentaires, menés uniquement à partir de la pâte électrolytique, tendraient à montrer que son contact prolongé avec le béton pourrait être responsable de ce phénomène. Ce « jaunissement », qui est

toujours visible deux ans après traitement, pourrait se révéler problématique dans le cadre de la conservation de monuments historiques.

L'apparition d'efflorescences⁽²⁾ blanches a également été observée dans tous les cas. Elles peuvent être liées soit à des excédents de solution électrolytique, soit à des cristallisations de sulfate de sodium, comme cela a été constaté pour la dalle de la Maison du Brésil traitée par anode sacrificielle. Dans ce dernier cas, il est probable qu'elles résultent d'une réaction entre des cristallisations superficielles de gypse liées à une pollution urbaine et la solution électrolytique alcaline.

Évolutions de pH et migration des alcalins

Les variations de pH au sein du béton sont généralement estimées par pulvérisation d'un indicateur coloré, la phénolphtaléine, sur une fracture fraîche. Cet indicateur reste incolore pour des pH inférieurs à 9, correspondant à un béton carbonaté, et vire au rose pour des pH supérieurs à 10, correspondant à des bétons non carbonatés.

Juste après réalcalinisation, une coloration rose de la phénolphtaléine a été observée autour des armatures pour tous les essais, à l'exception du traitement par anode sacrificielle appliqué sur les claustras de l'église du Raincy (tableau II). Ce phénomène indique un accroissement du pH et, par conséquent, un effet positif des traitements. Dans le cas de l'application qui n'a pas fonctionné, le manque d'efficacité pourrait être lié à une densité de courant trop faible, comprise entre 0,095 et 0,115 A.h/m².

Pour évaluer la durabilité des traitements, de nouvelles pulvérisations de phénolphtaléine ont été réalisées régulièrement sur des

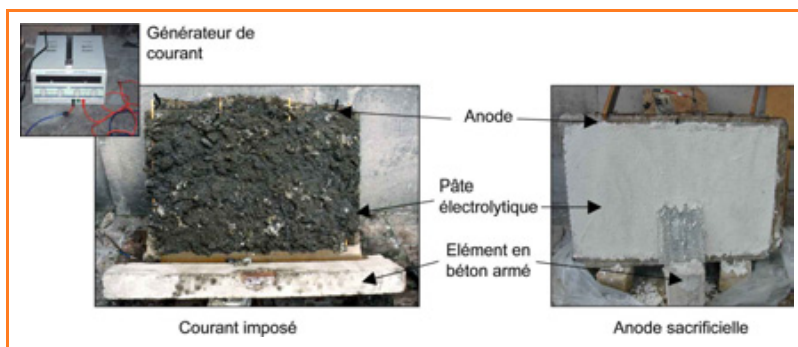


Figure 3 - Application des traitements par courant imposé et anode sacrificielle sur les dalles de parement de la Maison du Brésil.

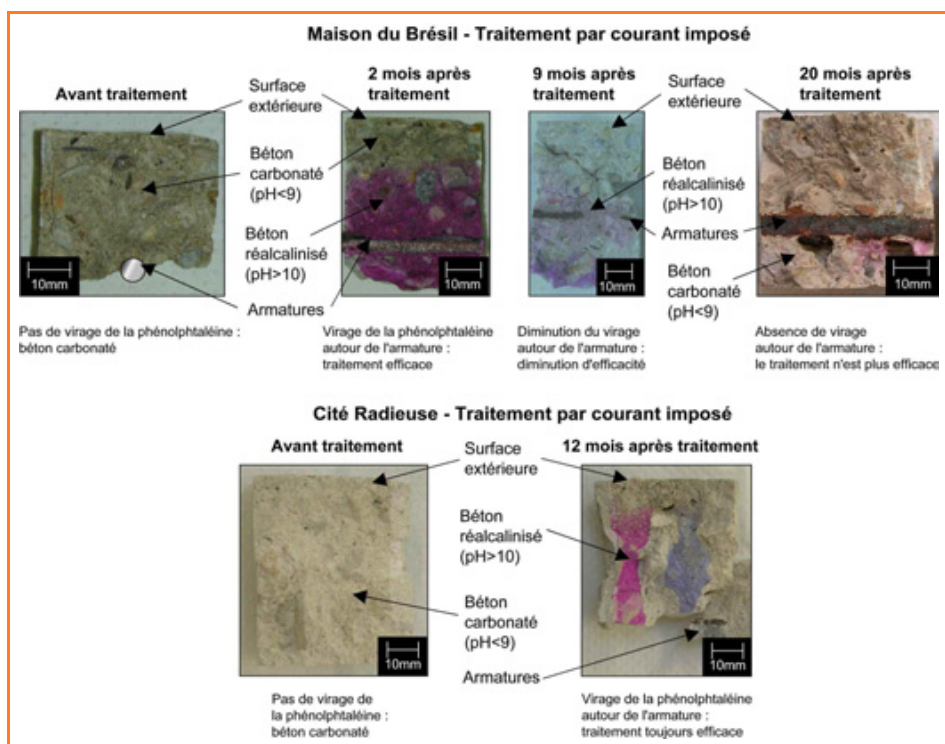


Figure 4 - Évolution du pH suite aux traitements de réalcalinisation par courant imposé appliqués sur les bétons de la Maison du Brésil et de la Cité Radieuse.

échantillons issus des dalles de la Maison du Brésil et de la Cité Radieuse de Marseille. Pour les dalles, une diminution progressive de l'intensité de virage de la phénolphthaleïne a été observée pour les deux techniques de réalcalinisation. Deux ans après traitement, l'indicateur coloré ne vire plus, indiquant que le pH du béton est de nouveau similaire à celui d'un béton carbonaté (figure 4 et tableau II). Cette évolution suggère une faible durabilité des traitements. Par contre, pour la Cité Radieuse de Marseille, un pH basique a été conservé un an après traitement, indiquant que la réalcalinisation est toujours efficace (figure 4 et tableau II). Cette différence de comportement pourrait être liée à la présence de laitiers et de fumées de silices dans le béton des dalles de la Maison du Brésil. En effet, des études récentes menées en laboratoire ont également montré de faibles durabilités lors de traitements de réalcalinisation de bétons de laitiers [10].

La migration de l'électrolyte a été vérifiée au moyen de dosages de alcalins du béton par fluorescence X. Pour les deux types de traitements appliqués sur les dalles de la Maison du Brésil, les résultats indiquent de nets enrichissements en K_2O et en Na_2O , persistant dix mois après réalcalinisation. Par conséquent, il est probable que les alcalins apportés par les traitements ont été peu sensibles au processus de lessivage. Toutefois, cette augmentation des teneurs a conduit le matériau à se placer dans des conditions favorables au développement d'une réaction alcali-granulat [14].

Activité de corrosion

Sur site, l'activité de corrosion est généralement évaluée au moyen de mesures du potentiel de corrosion des armatures par rapport à une électrode de référence (le plus souvent une électrode au cuivre/sulfate de cuivre). Dans ce cadre, la réalisation de cartographies est recommandée afin d'identifier des gradients de potentiel, souvent liés à des phénomènes de corrosion. En effet, en fonction de l'état de l'acier (passif ou actif), les valeurs de potentiel peuvent être significativement modifiées. Elles sont aussi très sensibles aux variations de température et d'humidité relative. Pour ces raisons, les valeurs obtenues ne permettent habituellement pas de conclure directement sur l'activité de corrosion des armatures et doivent être corrélées avec d'autres mesures et observations, notamment des « autopsies » des armatures.

Concernant le cas plus spécifique des réalcalinisations, plusieurs auteurs indiquent que la repassivation des aciers se manifeste généralement par une remontée significative des potentiels vers des valeurs moins négatives. Ils

ajoutent que l'évolution des cartographies vers une plus grande homogénéité des valeurs est généralement considérée comme une indication forte de repassivation [8, 10-12].

Dans le cadre des présents essais, des cartographies de potentiels ont été réalisées régulièrement après réalcalinisation. Sur chacun des sites et pour toutes les séries de mesures, une homogénéité des valeurs de potentiel a été constatée avant et après traitement ne permettant pas de mettre en évidence d'évolution de gradient caractéristique d'une repassivation. Par ailleurs, concernant les valeurs obtenues, la figure 5 présente à titre d'exemple les évolutions des valeurs

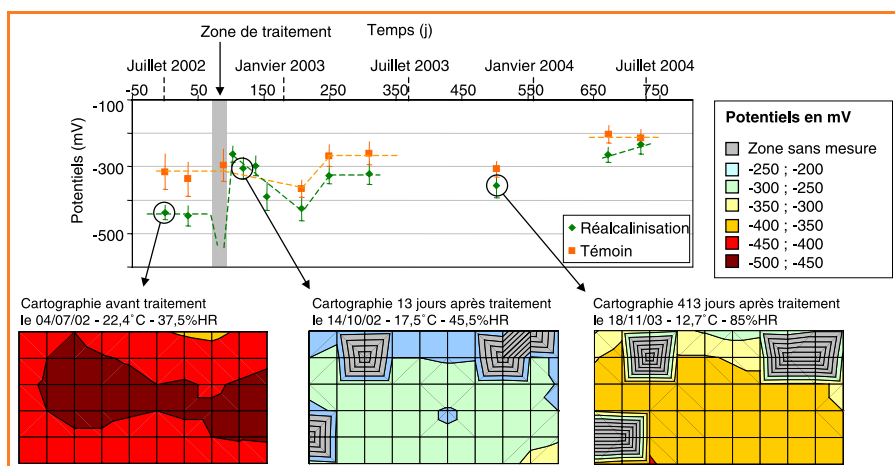


Figure 5 - Évolution des valeurs moyennes de potentiel après l'application d'un traitement de réalcalinisation par courant imposé sur les dalles de la Maison du Brésil (électrode de référence au cuivre/sulfate de cuivre) et exemples de cartographies de potentiel enregistrées sur les dalles traitées.

Ces cartographies présentent des valeurs homogènes de potentiel ne permettant pas de mettre en évidence d'évolution de gradient qui serait significatif d'une repassivation.

moyennes de potentiel calculées à partir des mesures réalisées sur la dalle de la Maison du Brésil traitée par courant imposé. Après l'application du traitement, les valeurs, très négatives en raison de la polarisation des aciers, remontent progressivement, indiquant une probable efficacité. Toutefois, les potentiels ne se stabilisent pas et, peu de temps après, diminuent de façon importante pour retrouver des valeurs semblables à celles enregistrées avant traitement. Par la suite, les courbes obtenues pour la dalle témoin et la dalle traitée montrent des évolutions similaires. Il est probable que ces évolutions soient essentiellement liées aux variations de température et d'humidité relative, masquant ainsi un possible effet positif du traitement. Des phénomènes similaires ont été retrouvés dans le cas des autres essais. Ils n'ont pas permis de conclure de façon satisfaisante à une repassivation des armatures à partir des mesures électrochimiques.

Impact sur le béton

Les observations MEB et les analyses EDS menées après l'application des deux types de traitements ont révélé la formation de nombreuses cristallisations silico-potassiques ou silico-sodiques dans les éprouvettes provenant de l'église du Raincy. Pour certaines, ces formations présentent des caractères expansifs (figure 6).

Dans le cas de la Maison du Brésil, des cristallisations silico-potassiques et silico-sodiques ont également été observées. Celles-ci semblaient cependant beaucoup moins nombreuses. Toutefois, des mesures de module d'Young dynamiques réalisées sur des échantillons de béton issus de cet édifice ont montré une diminution de l'ordre de 30 % de la rigidité des bétons réalcalinisés comparativement aux échantillons témoins. Cette évolution montre un impact très négatif du traitement sur les propriétés mécaniques du matériau.

Conclusion

Les phénomènes de corrosion des armatures apparaissant à la suite d'un processus de carbonatation des phases hydratées du ciment correspondent aux principaux mécanismes d'altération des édifices anciens en béton armé. Dans ce cadre, l'objectif de cette étude était d'évaluer l'efficacité et la durabilité de traitements de réalcalinisation, représentant une alternative intéressante aux techniques de restauration traditionnelle. Au cours de ce projet, trois séries d'essais ont été menées sur des bétons présentant des formulations très différentes. Deux techniques de réalcalinisation ont été testées, l'une utilisant un courant imposé et l'autre une anode sacrificielle.

Les résultats de ces essais ont montré que l'application de ces traitements sur les bétons anciens permet généralement d'assurer un accroissement du pH autour des armatures à court terme. Toutefois, le suivi des échantillons dans le temps a mis en évidence de faibles durabilités pouvant être liées à la présence de certains composés dans la formulation du béton (laitiers...). Ils soulignent également la difficulté des mesures électrochimiques de terrain, soumises à une forte

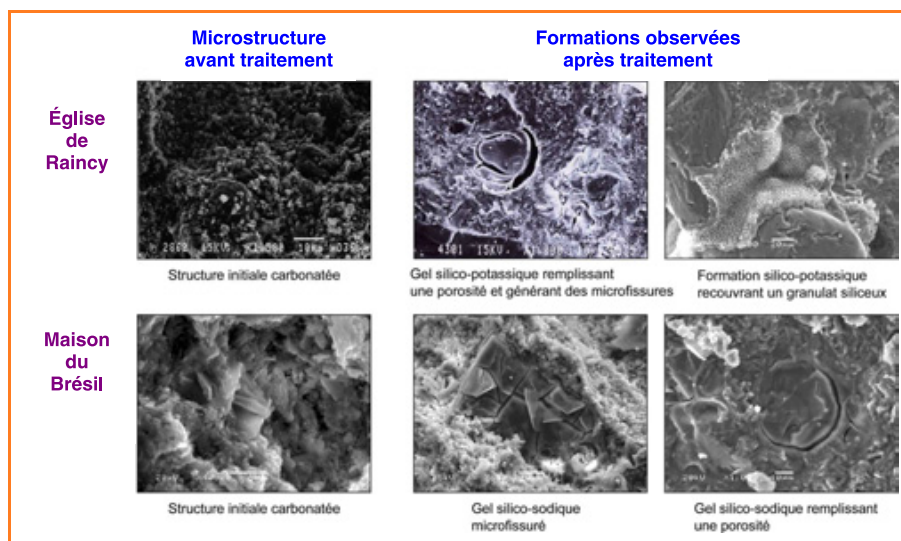


Figure 6 - Formations silico-potassiques et silico-sodiques apparues après traitement.

influence des conditions climatiques et qui n'ont pas permis de conclure sur la repassivation des aciers. Enfin, la formation de composés silico-potassiques ou silico-sodiques présentant des caractères expansifs a été observée ainsi qu'une diminution des propriétés mécaniques des bétons.

Plusieurs questions demeurent donc concernant notamment la durabilité et l'impact des réalcalinisations. Celles-ci devront être éclaircies avant une utilisation plus large de ces traitements pour la conservation des bétons anciens. Des essais complémentaires sont actuellement en cours afin de confirmer les hypothèses avancées durant ces recherches, de mieux comprendre les mécanismes de la réalcalinisation et de définir les paramètres permettant d'en valider l'efficacité et d'en assurer une meilleure durabilité.

Remerciements

Les auteurs remercient la société Ciments Calcia pour le soutien financier apporté à ces études. Ils remercient également les distributeurs français des traitements de réalcalinisation ainsi que le Laboratoire d'étude et de recherche sur les matériaux (LERM) qui a contribué aux opérations préalables de diagnostic des différents édifices en béton armé. Enfin, ils remercient les architectes en chef des monuments historiques et les nombreuses personnes qui leur ont permis d'accéder aux sites d'essais et qui leur ont apporté leur aide.

Notes et références

- (1) *Laitiers* : hauts fourneaux issus de l'industrie sidérurgique. Il s'agit de sous-produits de l'élaboration de la fonte qui rassemblent la gangue du minéral, la cendre du coke et le « fondant ». Ils sont principalement constitués de chaux, de silice, d'alumine et de magnésie. On y trouve également des oxydes de fer et des sulfures.
- (2) *Efflorescence* : dépôt formé de sels qui apparaît en surface des matériaux de construction suite à l'évaporation d'eau.
- [1] Bosc J.L., Chauveau J.M., Clément J., Degenne J., Marrey B., Paulin M., *Joseph Monier et la naissance du ciment armé*, Editions du Linteau, Paris, 2001.
- [2] Marie-Victoire E., Analyse et conservation de bétons anciens, International conference Architecture culture by 1900: critical reappraisal and heritage preservation, Buenos Aires, 1999.
- [3] Duval R., La durabilité des armatures et du béton d'enrobage, *La durabilité des bétons*, Presse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 1992, p. 173-225.
- [4] *Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton*, Guide technique édité par le Laboratoire Central des

Ponts et Chaussées et le Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes, **1996**.

- [5] Mietz J., Isecke B., Investigations on electrochemical realkalization for carbonated concrete, *Corrosion* **94**, **1994**, paper 297, p. 1.
- [6] Polder R., Electrochemical maintenance methods, *COST521: corrosion of steel in reinforced concrete structures – Prevention – Monitoring – Maintenance*, R. Waydert (ed), **2002**, p. 155-164.
- [7] Page C.L., Ngala V.T., Page M.M., Corrosion inhibitors in concrete repair system, *Magazine of Concrete Research*, **2000**, **52**, p. 25.
- [8] Van Den Hondel A.J., Polder R.B., Electrochemical realkalisation and chloride removal of concrete, *Construction Repair*, **1992**, p. 19.
- [9] Demars P., Re-alkalinisation and withdrawal of chlorides in concrete by means of electro-osmosis, 2nd International conference on bridge management, University of Survey, J.E. Harding, G.A.R. Parke, M.J. Ryall (eds), **1993**, p. 643.
- [10] Pollet V., Electrochemical maintenance methods – Specific information on realkalisation, *COST 521: corrosion of steel in reinforced concrete structures – Prevention – Monitoring – Maintenance*, R. Waydert (ed), **2002**, p. 155.
- [11] Odden L., The repassivation effect of electro-chemical realkalisation and chloride extraction, *Proceedings of international conference Corrosion and corrosion protection of steel in concrete*, R. Narayan Swamy (ed), University of Sheffield, **1994**.
- [12] Elsener B., Zimmermann L., Bürchler D., Böhni H., Repair of reinforced concrete structures by electrochemical techniques – Field experience, corrosion of reinforced concrete – Monitoring, prevention and rehabilitation, *Eurocorr'97*, J. Mietz, B. Elsener, R. Polder (eds), **1997**, p. 125.
- [13] Mattila J.S., Pentti M.J., Raiski T.A., Durability of electrochemically realkalised concrete structures, *Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction*, C.L. Page, P.B. Bamforth, J.W. Figg (eds), **1996**, p. 481.
- [14] Cailleux E., Marie-Victoire E., Influence of the concrete composition on the efficiency and the durability of realkalisation treatment, *Concrete Solutions, Proceedings of the 2nd International conference on concrete repair*, M.G. Grantham, R.M. Jauberthie, C. Lanos (eds), **2006**, p. 271.
- [15] Sergi G., Walker R.J., Page C.L., Mechanisms and criteria for the realkalisation of concrete, *Proceedings of the 4th International symposium on corrosion of reinforcement in concrete constructions*, C.L. Page, P.B. Bamforth, J.W. Figg (eds), Society of Chemical Industry, **1996**, p. 491.
- [16] PREN 14038-1, *Réalcalinisation électrochimique et traitements d'extraction des chlorures applicables au béton armé – Partie 1 : réalcalinisation*, Projet de norme européenne, **2000**.

Emmanuel Cailleux

est ingénieur de recherche au Cercle des Partenaires du Patrimoine (CPP)*.

Élisabeth Marie-Victoire

est ingénieur de recherche au Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH)**.

* Cercle des Partenaires du Patrimoine, Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, 29 rue de Paris, 77420 Champs-sur-Marne.

Courriel : emmanuel.cailleux@bbri.be

** Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, 29 rue de Paris, 77420 Champs-sur-Marne.

Courriel : elisabeth.marie-victoire@culture.gouv.fr



Innovater les énergies

L'IFP est un organisme public de recherche et de formation, à l'expertise internationalement reconnue, dont la mission est de développer les énergies du transport du XXI^e siècle. Il apporte aux acteurs publics et à l'industrie des solutions innovantes pour une transition maîtrisée vers les énergies et matériaux de demain, plus performants, plus économiques, plus propres et durables.

IFP
1 et 4 avenue de Bois-Préau
92852 Rueil-Malmaison Cedex – France
Tél. : +33 1 47 52 60 00 – Fax : +33 1 47 52 70 00 – www.ifp.fr



IFP-Lyon
BP 3
69390 Vernaison – France
Tél. : +33 4 78 02 20 20 – Fax : +33 4 78 02 20 15 – www.ifp.fr