

PAREXLANKO

TRAITER LA CORROSION DES OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ : UNE OPÉRATION TECHNIQUE ET INDISPENSABLE

LIVRE BLANC

Sommaire

Traiter la corrosion des ouvrages en béton armé : une opération technique et indispensable

PAREXLANKO

4	Le béton dans tous ses états	28	Réhabilitation des ouvrages en béton armé : la réparation traditionnelle
6	Présentation	32	ZOOM SUR La protection cathodique par courant galvanique
8	Les enjeux		
10	Les pathologies du béton armé	34	L'ŒIL DE L'EXPERT Stéphane Panin (R3S) : « Les campagnes traditionnelles de réparation ne permettent pas de pérenniser l'ouvrage »
16	L'ŒIL DE L'EXPERT Christian Tridon (STRRES) : « Comprendre l'origine de désordres signifie contrôler dès la conception le risque de corrosion »		
20	L'ŒIL DE L'EXPERT Arnaud Dubosc (Corten Ingénierie) : « L'importance de mener un diagnostic de corrosion du béton armé »	36	● EN DIRECT DE La résidence Eyre Merlin à Seignosse : « On a risqué la catastrophe ! »
24	Les étapes d'un diagnostic de corrosion du béton armé	40	Une gamme complète PAREXLANKO pour la protection contre la corrosion des armatures
		42	PAREXLANKO avec vous

Le béton dans tous ses états

Le béton à l'origine de grandes innovations architecturales

Le béton est partout, incontournable dans le domaine de l'habitat, du génie civil et de l'industrie. L'arche de la Défense, le viaduc de Millau, le stade de France sont autant d'exemples de son utilisation. La construction de ces structures audacieuses n'a été possible qu'en renforçant le béton par des armatures en acier.

Si le béton était initialement perçu comme un matériau inaltérable par ses inventeurs, en réalité, les ouvrages en béton armé n'échappent pas à une dégradation, à plus ou moins long terme, sous l'effet des agressions externes.

Réparer les ouvrages en béton armé, une stratégie qui répond à un défi d'ordre patrimonial

La France dispose d'un patrimoine très riche en ouvrages en béton construits après-guerre. Accroître la durée de vie de ces constructions qui vieillissent est devenu un enjeu capital pour préserver cet héritage. Il constitue aujourd'hui un défi technologique majeur pour les ingénieurs et les chercheurs.

Chez PAREXLANKO, nous en sommes convaincus : nous devons veiller à maintenir ce parc d'ouvrages dans un bon état et être capables de prévoir la manière dont il vieillira. Nous pensons qu'il est temps de se mobiliser pour faire face à ces phénomènes de corrosion qui dégradent, chaque jour un peu plus, nos infrastructures. Il est primordial d'entretenir et de réparer ce qui doit l'être.

PAREXLANKO à vos côtés

De par son savoir-faire unique dans la restauration des ouvrages de construction, PAREXLANKO s'engage entièrement dans la voie de la préservation des ouvrages en béton, qu'il s'agisse d'ouvrages d'art, de constructions classées Monuments historiques, de bâtiments publics ou de bâtiments industriels et commerciaux.

Que vous soyez en amont d'un projet de réhabilitation, à la recherche de conseils pour protéger les ouvrages dont vous avez la charge, ce livre blanc a pour ambition de vous aider à mieux comprendre le comportement du béton armé et les traitements de protection possibles. Ensemble, partageons et faisons grandir l'expérience métier des professionnels du bâtiment et des travaux publics !

Présen-tation

**Quel est le matériau de construction le plus utilisé ?
Le béton ! Avec une présence dans les deux tiers des habitations dans le monde.**

Béton et acier, un mariage fait pour durer

Si le béton est un matériau naturellement résistant à la compression, il possède en revanche une faible résistance à la traction. Dès le XIXe siècle, pour compenser ce défaut et répondre aux contraintes, les architectes ont l'idée d'introduire des armatures d'acier dans la masse. Ils inventent ainsi le béton armé permettant de concevoir de longues structures en porte-à-faux (ponts, auvents, etc.) et des dalles plus minces et moins soutenues, tout en accélérant les temps de construction. Les premiers bâtiments utilisant un tel béton sont encore visibles. Citons par exemple le Théâtre des Champs-Élysées à Paris, l'un des premiers bâtiments Art déco de la ville, et surtout, le premier théâtre parisien à être entièrement construit en béton armé (1913).



Le béton armé, matériau de prédilection d'après-guerre

Les premiers aciers performants apparaissent dès 1920 tandis que le béton armé en est encore à ses balbutiements, notamment pour des questions de mise en œuvre. C'est durant les trente glorieuses, ces années d'après-guerre où il faut tout reconstruire, que l'utilisation du béton armé décolle. Les grands ensembles périurbains érigés en un temps record en deviennent le symbole. Du fait de ses performances mécaniques et thermiques, sa robustesse, sa nouvelle esthétique qui séduit les architectes, l'usage du béton armé bouleverse les métiers de la construction. Il devient le matériau de prédilection de grandes figures de l'architecture comme Le Corbusier.

La durée de vie limitée des ouvrages en béton armé

Alors que les ingénieurs du XIXe siècle pensaient que les structures en béton armé dureraient longtemps, au moins un millénaire, et sans aucun entretien, les gestionnaires d'ouvrages font état aujourd'hui d'importants signes d'endommagement.

Si tout au long de son existence, le béton armé est soumis à de multiples phénomènes, la corrosion des armatures, raison principale d'endommagement du béton, déclenche des atteintes structurelles impactant la sécurité de l'ouvrage et des personnes. Sa durabilité s'en trouve nettement affectée pouvant conduire, à terme, à la réduction de la capacité portante de l'ouvrage et la perte de sécurité structurale.

Les enjeux

On le sait, la première cause de vieillissement des ouvrages en béton armé est la corrosion des armatures. Pour les structures de génie civil en béton armé, celle-ci représente 80% des pathologies observées¹ avec des conséquences importantes sur la capacité portante des ouvrages. Maîtriser la durée de vie des ouvrages signifie donc contrôler le risque de corrosion dès la conception.

Coût direct de la corrosion : des chiffres alarmants

D'un point de vue économique, la corrosion est d'une importance primordiale puisqu'elle consommerait chaque année près de 300 millions de tonnes d'acier avec un coût de l'ordre de 2000 milliards de US \$ par an selon l'Organisation Mondiale de la Corrosion (WCO). En outre, son coût direct est estimé à 3,5 % du PIB des pays industrialisés³, soit pour un pays comme la France, un coût d'environ 80 milliards d'euros en 2019.

Les experts estiment qu'au moins 25% de cette somme pourrait être économisée en appliquant simplement les règles et connaissances liées à la corrosion⁴.

SAVE THE DATE

Corrosion Awareness Day : 24 avril²

Sensibiliser le grand public et les pouvoirs publics, c'est l'objectif de la journée de sensibilisation à la corrosion lancée par la World Corrosion Organization, avec le soutien de la Fédération Européenne de la Corrosion et du Centre Français de l'Anticorrosion.

Des réparations et pertes de production de plus en plus nombreuses et coûteuses

La réparation des ouvrages en béton armé est une opération qui devient maintenant habituelle. Le béton reste un matériau performant et durable, mais l'explosion de la construction au sortir de la seconde guerre mondiale a été telle que le nombre d'infrastructures et de bâtiments dégradés nécessitant aujourd'hui une intervention augmente de façon exponentielle. Outre le coût exorbitant de l'estimation des coûts de réparation, il faut en effet ajouter les coûts indirects et les nuisances pour les usagers, comme la fermeture d'un pont pendant les travaux de réparation par exemple.

Des conséquences esthétiques et environnementales non négligeables

Outre le coût économique chiffrable de la corrosion, celle-ci exerce un impact très défavorable sur l'environnement : pollutions, accidents et dispersion de produits de corrosion dans l'environnement. Enfin, si dans certains cas les conséquences ne sont pas structurelles, la corrosion des bétons peut affecter l'esthétique de l'ouvrage et donc déprécier son image auprès des usagers et utilisateurs (habitants d'immeubles par exemple).

Ces divers constats montrent qu'il est aujourd'hui nécessaire, pour les différents acteurs de la construction du béton armé, d'aborder le cycle de vie des ouvrages et leur durée de vie de manière plus efficace, rationnelle et pertinente. Une telle action est aujourd'hui un passage obligé pour, à terme, optimiser leur maintenance en accord avec une stratégie de développement durable.

1. Source : Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur les Matériaux (LERM)

2. Source : The World Corrosion Organization (WCO)

3. Source : Syndicat National Des Entrepreneurs Spécialistes de Travaux De Réparation Et De Renforcement Des Structures (STRRES)

4. Source : WCO. Global Needs for Knowledge Dissemination, Research, and Development in Materials Deterioration and Corrosion Control

Les pathologies du béton armé

Aujourd’hui, le patrimoine en béton armé vieillit et subit les agressions physiques, chimiques et mécaniques. Il perd de ses qualités intrinsèques et se dégrade. Tour d’horizon des différentes pathologies pouvant affecter les bétons.

LES PATHOLOGIES MÉCANIQUES

Les désordres structurels liés aux surcharges de service

Les désordres structurels ont pour origine une mauvaise conception ou un défaut de mise en œuvre. Les symptômes se caractérisent par l’apparition de fissures, de déformations, de poinçonnement, de compressions, de flexions ou d’efforts tranchants.

Les désordres structurels liés à un sinistre

Ces désordres structurels ont pour origine un incendie, un dégât des eaux ou une catastrophe naturelle (tempête, séisme). Les symptômes se caractérisent par l’apparition de fissures mécaniques, de flexions, d’efforts tranchants à la suite de surcharges ou d’actions mécaniques supérieures à celles de la capacité portante.



Caractéristiques physico-chimiques du béton :

Le béton est un matériau hétérogène présentant les propriétés suivantes :



Porosité plus ou moins élevée (maximum admissible : 15 %).



Caractère fortement basique : la pâte de ciment contient 15 à 20 % d’une base forte, la portlandite Ca(OH)_2 .



La solution interstitielle présente dans les pores du béton est enrichie en alcalins (Sodium & potassium) et son pH initial varie entre 12,6 et 13,7.

LES PATHOLOGIES PHYSICO-CHIMIQUES DU BÉTON

La corrosion des armatures est une réaction électrochimique comprenant les caractéristiques suivantes :

- L'anode - l'endroit « actif » sur lequel apparaît la rouille, et où le béton commence à se fissurer et à s'effriter sous l'effet de gonflement des armatures corrodées.
- La cathode - là où l'acier est protégé cathodiquement et où des ions d'hydroxyde sont produits, ce qui améliore la protection contre la corrosion.
- Un flux d'électrons le long de l'armature à travers le béton, de la cathode à l'anode.

Attaque par les ions chlorures

La corrosion des aciers peut aussi être provoquée par la pénétration des ions chlorures. Les ions chlorures présents dans l'eau de mer, dans certains sols et dans le sel utilisé pour traiter le verglas sur les routes peuvent pénétrer à travers le réseau poreux du béton et provoquer l'amorce de la corrosion.

Le phénomène qui affecte plus particulièrement les ouvrages marins prend alors la forme de corrosion des armatures avec présence de fissures dans le béton, réduction de la section des aciers, éclatement local du béton et apparition de rouille à la surface du béton sous forme de taches non esthétiques.

ORIGINES

Les ions chlorures peuvent pénétrer à travers le réseau poreux du béton et provoquer l'amorce de la corrosion.

SYMPTÔMES

Corrosion des armatures avec présence de fissures dans le béton, réduction de la section des aciers, éclatement local du béton et apparition de rouille à la surface du béton sous forme de taches non esthétiques.

Les cycles du gel / dégel

Les cycles du gel et du dégel fragilisent le béton. Si l'eau pénètre dans le réseau de fissures et de pores du béton, un phénomène de fissuration interne peut apparaître par gonflement du béton à cœur et écaillage du béton en surface. Ces cycles conduisent à une diminution des propriétés mécaniques du béton (résistance à la compression, à la traction, à la flexion, et modification du module d'élasticité dit module de Young) réduisant ainsi la durée de vie des ouvrages affectés. Des solutions préventives existent, permettant d'éviter au béton de subir les températures inférieures à zéro, notamment l'emploi de granulats non susceptibles de se fendre sous l'action du gel.

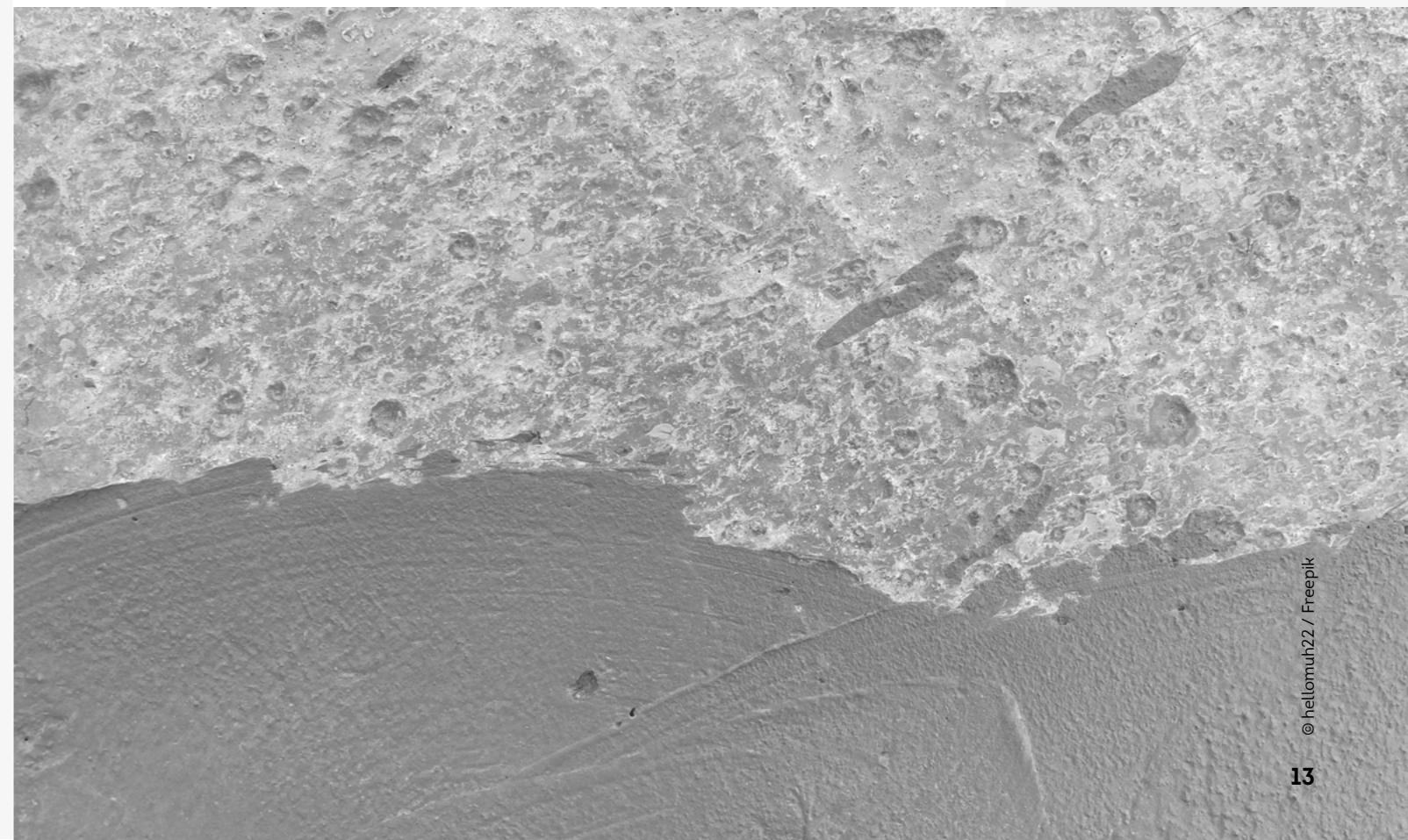
Les pathologies peuvent être moins préjudiciables, voire esthétiques, avec la présence de fissures de retrait, un aspect rugueux, des coulures de calcites, etc. L'expert relève ces désordres lors de son audit afin de les consigner et les signaler comme des pathologies ne remettant pas en cause la stabilité de l'ouvrage.

ORIGINES

Lorsque la température du béton descend en dessous de 0°C, l'eau contenue dans les pores les plus grands peut geler avec une augmentation de volume (9%) et mettre en pression le béton avec un risque de rupture.

SYMPTÔMES

Microfissuration de la pâte de ciment dans la masse du béton. Écaillage du béton en surface (délitage) se traduisant par le décollement de petits éléments superficiels.



Silices l'alcali-réaction

Le béton peut aussi être sujet à une autre pathologie grave : l'alcali-réaction. Il s'agit d'une dégradation endogène du béton plus connue sous le nom de RAG (Réaction Alcali-Granulats). Le phénomène résulte d'une incompatibilité entre les granulats et le ciment générée par l'action des alcalins solubles (oxyde de sodium Na₂O et oxyde de potassium K₂O) contenus dans le béton avec une certaine forme de silice réactive, en présence d'eau.

Il correspond à un ensemble de réactions chimiques complexes qui peuvent se déclencher lorsque plusieurs conditions sont réunies simultanément. Il s'agit de réactions internes au béton mettant en jeu essentiellement les éléments présents à l'origine dans le béton et un apport d'eau externe.

En l'absence de précaution, cette pathologie peut apparaître dans les parties d'ouvrages les plus sévèrement exposées à l'humidité, en général au bout de quelques années, voire plusieurs dizaines d'années. Les ouvrages affectés par cette pathologie sont plus communément les ouvrages d'art.

La carbonatation

Un des phénomènes les plus fréquents est la carbonatation du béton due à la réaction entre le dioxyde de carbone (CO_2) et les hydroxydes du ciment, et surtout la chaux (CaO). Celle-ci provoque une neutralisation du béton, dont le pH passe ainsi de 12,5 environ à 9 environ. Dans la pratique, c'est cette diminution du pH qui est suivie et sert de détecteur de la carbonatation.

Si ce phénomène naturel n'est pas nocif pour le béton, la réaction chimique est, en revanche, à l'origine d'importants dommages : corrosion des aciers qui sont alors dépassivés, éclatement du béton sous l'effet du gonflement des armatures atteintes...

ORIGINES

Le phénomène d'alcali-réaction est la conjugaison de 3 facteurs : des alcalins dans la phase liquide interstitielle du béton, des granulats réactifs et de l'eau ou un environnement humide.

SYMPTÔMES

Déformations et microfissurations au cœur du béton, décollement à l'interface pâte-granulats et microfissures à l'interface béton/armatures.

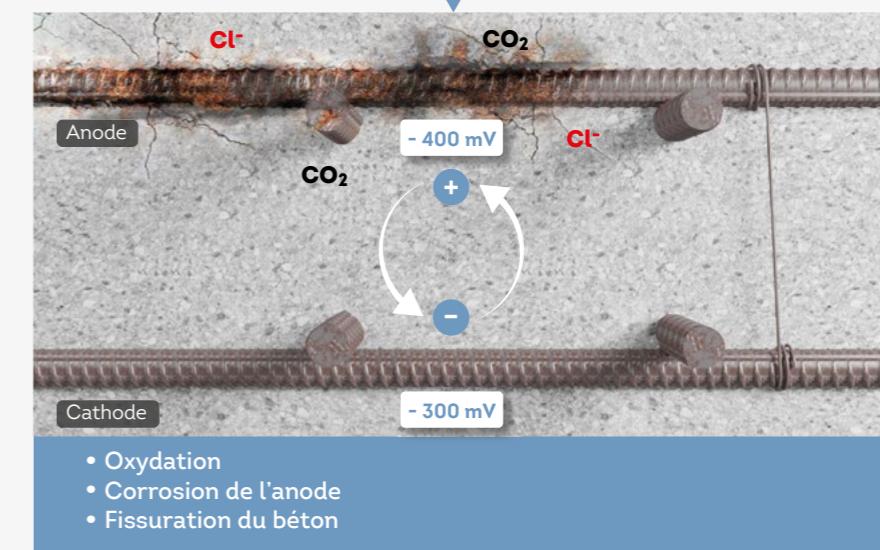
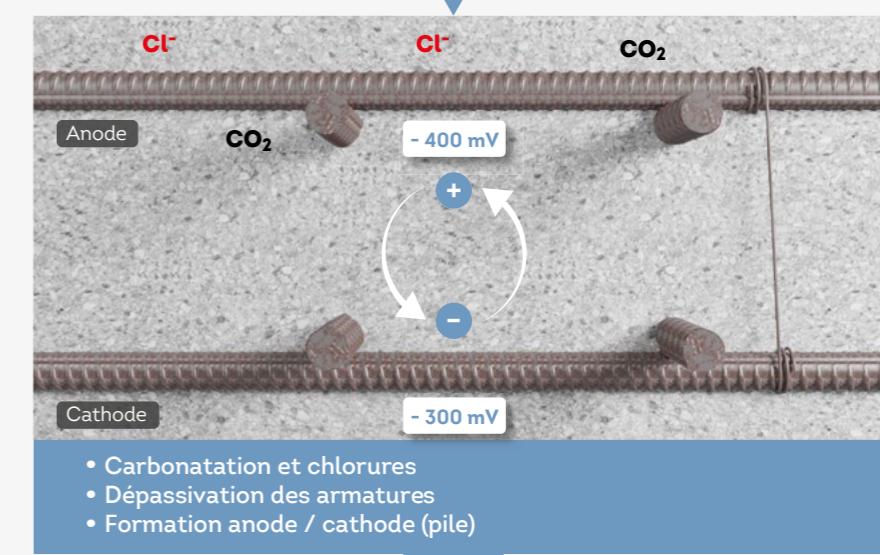
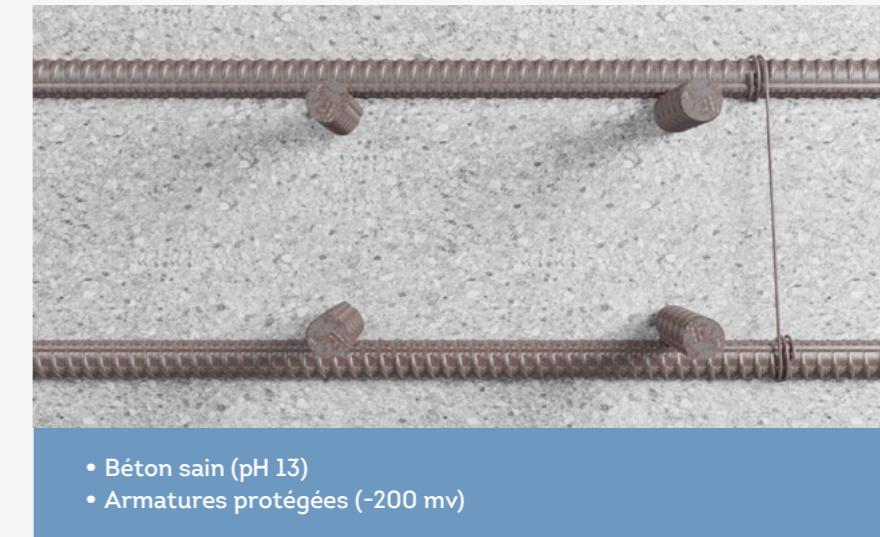
ORIGINES

La portlandite du ciment hydraté réagit petit à petit avec le CO₂ de l'air. Cette réaction réduit donc le pH du béton de 13 à 9 environ.

SYMPTÔMES

Corrosion des armatures entraînant le gonflement voire l'éclatement du béton.

Phénomène de carbonatation conduisant à la corrosion des armatures



CHRISTIAN TRIDON (STRRES)

« Comprendre l'origine de désordres signifie contrôler dès la conception le risque de corrosion »



Le béton est un formidable matériau de construction qui, au cours du temps, peut être amené à se dégrader. Christian Tridon, expert STRRES explique les pathologies du béton d'aujourd'hui et ses espérances pour celui du futur.

Quels sont les désordres courants des ouvrages en béton ?

C-Tridon : Le béton est, certes, un corps inerte, mais il n'en évolue pas moins dans le temps. Les éléments en béton armé, très présents dans nos vies, sont soumis à de multiples phénomènes (climatiques, physico-chimiques, mécaniques, etc.). Ils subissent des changements constants : fissures, gonflement voire éclatement du béton et d'autres encore !

Ils sont le résultat du vieillissement de l'ouvrage, de causes accidentelles (chocs, incendies, surcharges, etc.), mais aussi d'erreurs de conception et de calcul ou d'exécution lors de leur construction. Ce sont les ouvrages de 70 ans qui posent de gros problèmes aujourd'hui et qui nécessitent des travaux de maintenance et de réparation.

Qu'appelle-t-on pathologies du béton ?

C-Tridon : Les pathologies du béton pouvant remettre en cause sa stabilité peuvent être différencierées de deux façons : les pathologies liées à un désordre dans les matériaux et les défauts liés à une insuffisance structurelle. Si le béton armé présente une grande solidité et une résistance à toute épreuve, le béton, en revanche, est un matériau poreux comme le sucre. Plusieurs agents extérieurs peuvent s'attaquer à la protection naturelle assurée par le béton. L'eau par exemple, en excès, augmente la porosité du béton et diminue sa résistance mécanique et sa résistance aux agents agressifs (CO_2 , chlorures, sulfates, etc.).

La pathologie la plus connue des ouvrages construits après-guerre est la carbonatation. Ce phénomène chimique est responsable de l'oxydation et du gonflement des armatures métalliques. Il génère la fissuration des couches de béton, puis l'infiltration d'eau dans les murs, pour finalement conduire à une dégradation lente et certaine de la structure toute entière.

Quels sont les points de vigilance ?

C-Tridon : La meilleure protection contre ces pathologies se situe souvent en amont de la construction, dans le choix, la qualité et la formulation du béton en fonction du milieu environnant. Concrètement, lors de la mise en œuvre du béton, plus celui-ci est compact, plus le dosage en ciment est élevé, plus le rapport eau / ciment est faible et la résistance du béton élevée, et plus la progression du front de carbonatation est lente.

De fait, comprendre l'origine de désordres apparents sur une structure en béton signifie contrôler le risque de corrosion dès la conception. Tout ce qui conduit à diminuer la porosité du béton retarde l'échéance de dépassivation des armatures. Il s'agit donc de bien choisir les ingrédients et leurs différents dosages pour éviter les défauts de fabrication (par exemple, pas assez de granulats ou des ingrédients qui interagissent). Plus le béton sera fermé et moins l'eau aura de facilité à le pénétrer.

BIO

Christian TRIDON / STRRES
Président du STRRES jusqu'en 2022, Christian Tridon poursuit ses activités liées à la FNTP. Il organise le colloque « Le Pont » qui se déroule tous les ans à Toulouse (400 participants) dont le thème générique est la maintenance des ouvrages de génie civil et plus précisément des ponts. Il organise également l'événement « La sécurité des ponts en Europe » à Bruxelles. Il participe à des formations et donne des conférences sur l'histoire des ponts et la pathologie des matériaux à l'international.

Quels sont vos conseils pour entamer une réparation des bétons dégradés ?

C-Tridon : Dans un premier temps, comprendre les causes du vieillissement des ouvrages en béton est primordial pour augmenter ses performances et sa durabilité. Sans quoi et faute d'anticipation, les maîtres d'ouvrage jouent le rôle du pompier. Ils procèdent à des maintenances curatives alors qu'une gestion préventive permettrait de prolonger la durée de vie des ouvrages et de réduire les coûts associés.

Il est nécessaire également, pour les différents intervenants de la construction, d'établir les causes de la corrosion du béton armé avant de réparer. Cela signifie aborder en amont le cycle de vie et la durée de vie des ouvrages de manière plus efficace et rationnelle afin de définir les réponses adaptées permettant de réparer et de pérenniser les structures. Un effort accru de recherche scientifique et technologique et une meilleure prise en compte dans la formation sont donc indispensables.

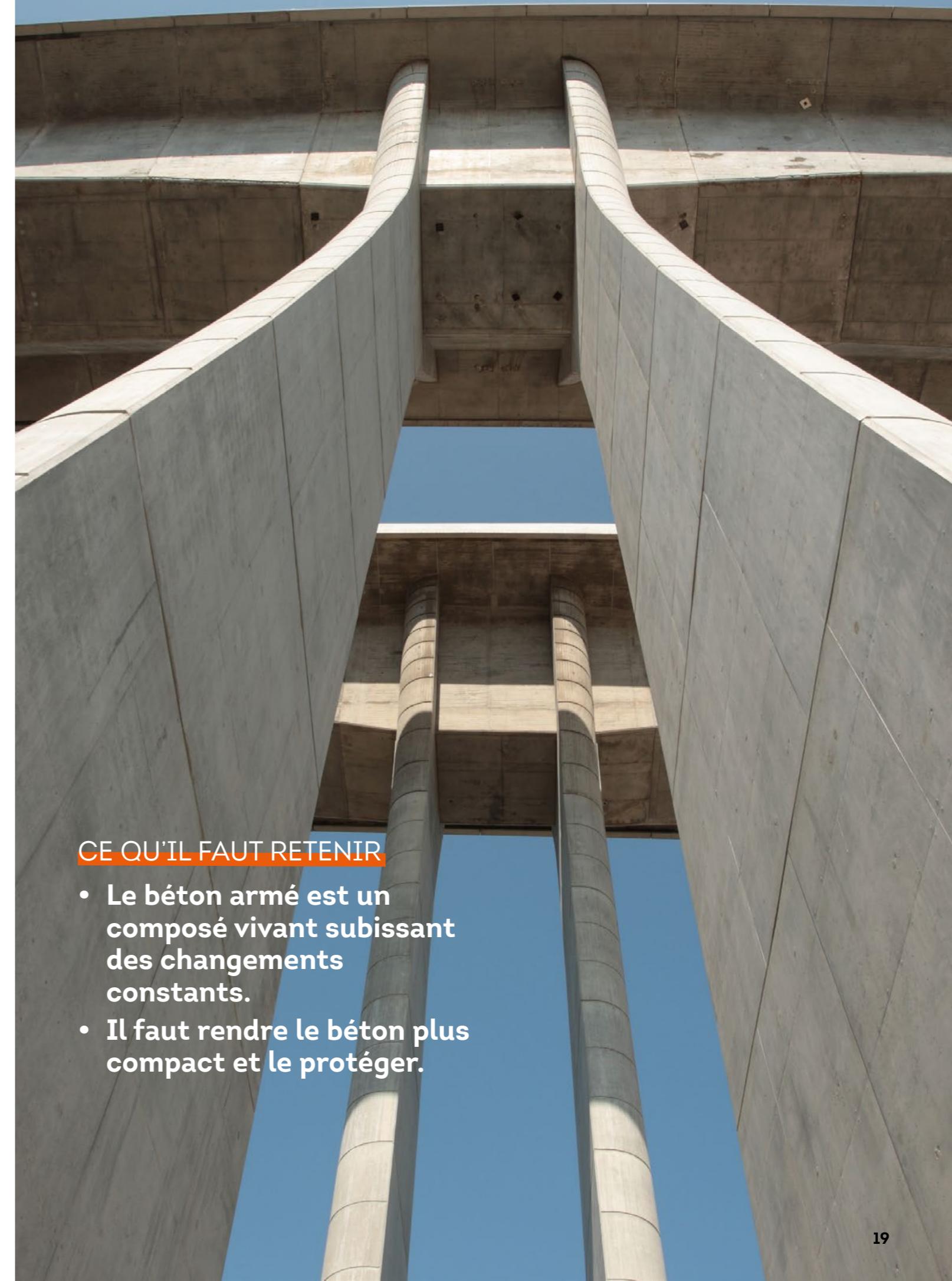
Aujourd'hui, les pathologies qui affectent le béton armé, notamment, nous sont bien connues. Leur progression est (à l'échelle du temps) très rapide. Nous maîtrisons les techniques d'entretien et de protection qui permettent de prolonger la vie des ouvrages. Il faut que leur gestionnaire en prenne conscience afin de conserver ce patrimoine clé.

INFOS PRATIQUES

STRRES (Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et de renforcement des structures) :
<https://www.strres.org/>

FIEC (Fédération Européenne de l'Industrie de la Construction) :
<https://www.fiec.eu/>

Colloque Le Pont :
<https://www.le-pont.com/>



CE QU'IL FAUT RETENIR

- **Le béton armé est un composé vivant subissant des changements constants.**
- **Il faut rendre le béton plus compact et le protéger.**



ARNAUD DUBOSC (CORTEN INGENIERIE)

« L'importance de mener un diagnostic de corrosion du béton armé »



La corrosion des armatures est la principale cause de dégradation des ouvrages en béton. Pour réparer durablement, enrayer les phénomènes de dégradation et éviter l'apparition de nouveaux désordres, il convient de choisir la bonne méthode. Éléments de réponses avec Arnaud Dubosc de Corten Ingénierie, qui souligne l'importance de réaliser en amont un diagnostic du béton armé.

Pourquoi réaliser un diagnostic spécifique du béton ?

A-Dubosc : Qu'il s'agisse des charges exercées sur lui ou des agressions extérieures pouvant le dégrader, les phénomènes de corrosion impactent la fiabilité et la solidité d'un ouvrage en béton. Effectuer un diagnostic du béton armé est une étape essentielle avant de lancer les travaux de réparation d'une structure en béton détériorée. Il permet non seulement de localiser précisément les dégradations, mais aussi d'identifier les causes.

Pourquoi est-il essentiel de faire un diagnostic corrosion du béton armé ?

A-Dubosc : Le diagnostic corrosion est une étape essentielle dans le processus de réhabilitation d'un ouvrage, car il permet de définir le niveau d'activité de la corrosion et de voir notamment s'il y a une stagnation du phénomène ou une dégénérescence. L'étude permet également de déterminer la gravité et l'impact des désordres, de les classer par degré d'urgence. L'analyse des fissures, du gonflement des bétons ou des armatures corrodées dues à la corrosion permettra d'identifier les solutions de réparation adaptées pour traiter les pathologies rencontrées. Le diagnostic apporte donc tous les éléments permettant au maître d'ouvrage de décider des futurs travaux pour traiter la corrosion du béton armé.

BIO

Arnaud DUBOSC /
Corten Ingénierie
Entreprise de maîtrise
d'œuvre spécialisée
dans le traitement de
la corrosion du béton
armé.

Arnaud DUBOSC accompagne les maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, entreprises et diagnostiqueurs dans le traitement des pathologies du béton armé. Certifié N3 en protection cathodique secteur béton par le CEFRACOR, Corten Ingénierie apporte ses compétences pour des missions d'AMO et/ou de maîtrise d'œuvre.



Quelles sont les finalités d'un diagnostic corrosion du béton armé ?

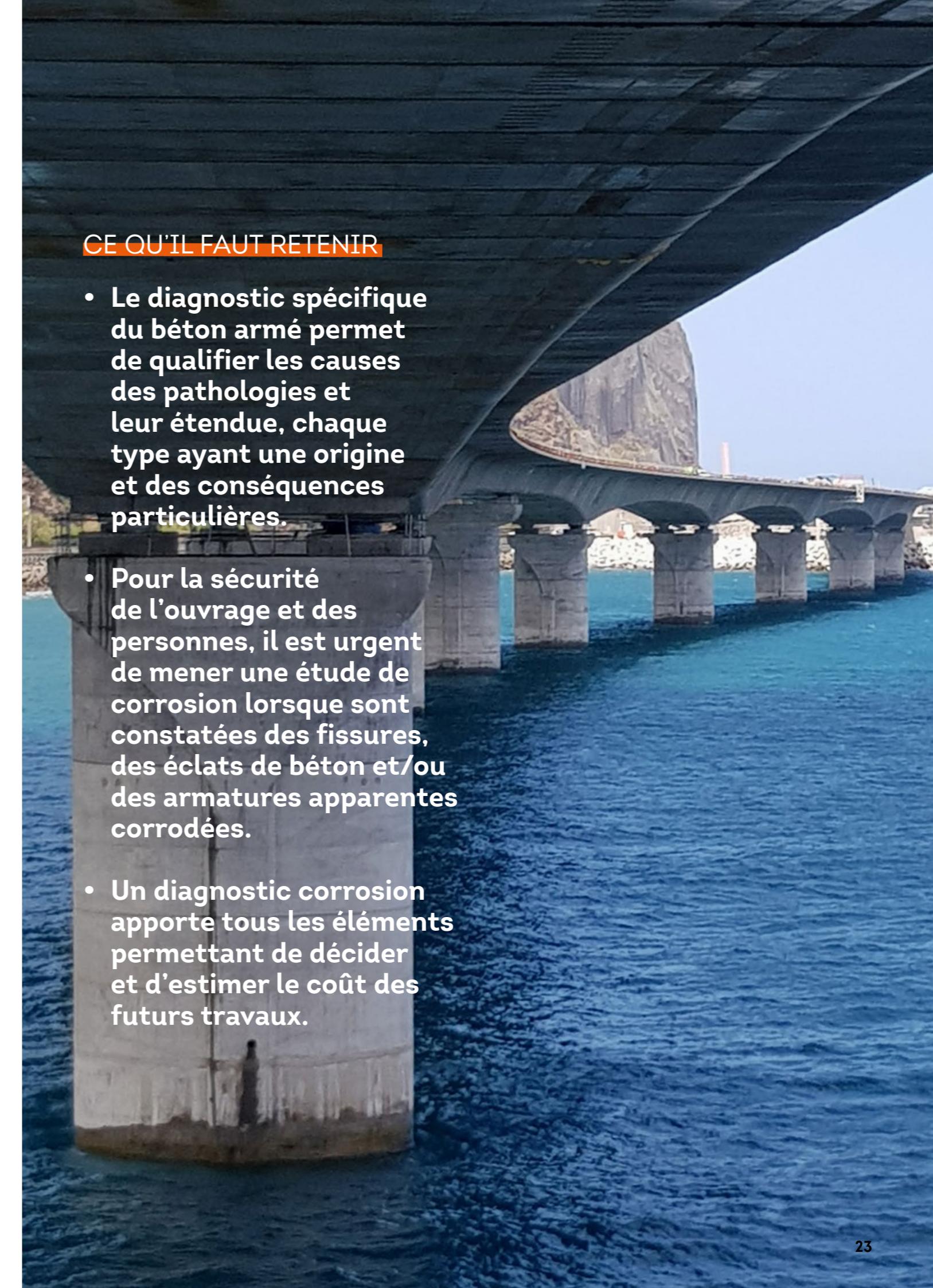
A-Dubosc : Un diagnostic poussé sur la corrosion des armatures dans le béton est préconisé lorsque l'on cherche à identifier les causes de la corrosion et prédire leur évolution probable dans l'espace et dans le temps. A ce stade, les objectifs du diagnostic sont de mettre en évidence les zones nécessitant une protection anticorrosion tout en excluant les parties de l'ouvrage qui peuvent l'être. Les investigations sur site permettent de définir plus spécifiquement les caractéristiques des éléments en béton armé (reconnaissance du ferraillage ou mesure de l'épaisseur d'enrobage des armatures par exemple) et leur état pathologique. Une fois l'origine des désordres déterminée, et sur la base des différentes mesures, vient l'étape de la préconisation des solutions de réparation adaptées à la problématique.

À quel moment faut-il mener un diagnostic corrosion du béton armé ?

A-Dubosc : Il est rare qu'un pont ou qu'un balcon s'effondre. Néanmoins, des épisodes tragiques comme celui d'Angers (quatre personnes sont décédées dans l'effondrement d'un balcon, le 31 mai 2022), ou celui de l'effondrement de l'immeuble de Miami ou du viaduc de Gênes, nous rappellent qu'il faut réagir sans attendre lorsque les premiers stigmates apparaissent. Pour la sécurité de l'ouvrage et des personnes, il est urgent de réaliser une étude de la structure lorsque l'on constate des traces de rouille qui s'écoulent, des épaufures sur le parement ou l'arête d'un élément de béton. Une fissuration, un décollement du béton ou des armatures apparentes corrodées trahissent souvent des pathologies profondes et étendues.

CE QU'IL FAUT RETENIR

- **Le diagnostic spécifique du béton armé permet de qualifier les causes des pathologies et leur étendue, chaque type ayant une origine et des conséquences particulières.**
- **Pour la sécurité de l'ouvrage et des personnes, il est urgent de mener une étude de corrosion lorsque sont constatées des fissures, des éclats de béton et/ou des armatures apparentes corrodées.**
- **Un diagnostic corrosion apporte tous les éléments permettant de décider et d'estimer le coût des futurs travaux.**



Les étapes d'un diagnostic de corrosion du béton armé



1

L'ÉTUDE DOCUMENTAIRE, PREMIÈRE ÉTAPE DU DIAGNOSTIC CORROSION

Le diagnostic d'un ouvrage commence par l'étude documentaire et historique de l'ouvrage. Lorsqu'ils sont disponibles, les plans, cahier des charges, etc. de la construction originale permettent d'obtenir des informations utiles sur l'ouvrage et l'historique de travaux de réhabilitation et/ou de renforcement.

2

L'INSPECTION VISUELLE : SECONDE ÉTAPE D'UN DIAGNOSTIC CORROSION

En outre, une inspection visuelle du bâtiment constitue généralement la seconde étape d'un diagnostic corrosion. Elle permet d'établir une première évaluation du niveau de service de la construction, de détecter et prévoir l'évolution probable des désordres et, le cas échéant, de préconiser des mesures d'urgence de sécurisation. À l'issue de l'inspection menée, un rapport de synthèse est alors établi.

3

LE DIAGNOSTIC STRUCTUREL

Il est essentiel ensuite de mener un diagnostic structurel par sondage destructif et non destructif.

Différents types de sondages destructifs et non destructifs permettent d'obtenir des paramètres utiles à la conception :

a. Carottage du béton

Il est important de mesurer la résistance mécanique du béton en place. Le prélèvement par carottage permet de déterminer l'enrobage des armatures, ce qui, en association avec le test de profondeur de carbonatation, permettra d'avoir une idée sur la probabilité que l'armature soit ou non corrodée.

b. Teneur en chlorure et sulfate par prélèvement

De surcroît, les prélèvements servent également à examiner le taux de chlorures et sulfates dans le béton. Il est en effet important de connaître la teneur en chlorures du béton au droit des armatures, car cela pourra conditionner le traitement approprié dans l'opération de réparation.



c. Mesure de la profondeur de carbonatation par test à la phénolphthaléine

L'épaisseur de la zone carbonatée est appelée profondeur de carbonatation. Elle se détermine à l'aide d'un indicateur coloré, qui permet de matérialiser aisément la profondeur de carbonatation et de mettre en évidence d'éventuels risques vis-à-vis de la corrosion. L'indicateur qui est le plus courant est la phénolphthaléine, qui est incolore lorsque le pH est inférieur à 9,5 environ et qui a une teinte rose pour les valeurs de pH plus élevées.

d. Zones anodiques et cathodiques

L'analyse des anodiques et cathodiques fait également partie des sondages destructifs pouvant être effectués lors d'un diagnostic corrosion. L'état de corrosion de l'ouvrage n'est pas nécessairement le même sur la totalité de la surface : il peut se trouver des zones corrodées (zones anodiques) et des zones non corrodées (zones cathodiques).

e. Mesures de résistivité du béton

Les mesures de résistivité sont utilisées pour évaluer le risque de corrosion des ouvrages en béton armé situés notamment en zone côtière. La résistivité du béton a une influence importante sur la corrosion, plus le béton (électrolyte) est résistant au passage du courant, plus les phénomènes de corrosion des aciers seront lents. À l'inverse, un béton peu résistant favorisera le passage du courant et donc la corrosion, en particulier sur les zones humides.

f. Rapport de synthèse

Un diagnostic de structure se termine par un rapport de synthèse permettant de reprendre tous les éléments recueillis sur site et en laboratoire.



Réhabilitation des ouvrages en béton armé : la réparation traditionnelle

Comment préserver un ouvrage en béton armé dégradé par la corrosion ? Différents systèmes et méthodes existent pour réparer et prolonger la durée de vie des bâtiments en béton armé.

1

RÉPARER LE BÉTON DE MANIÈRE TRADITIONNELLE ET LOCALISÉE

Si la corrosion est modérée, une réparation de surface dite traditionnelle peut être effectuée. Il s'agit tout simplement de remplacer le béton d'enrobage endommagé par zones localisées.

Le processus de réparation traditionnelle débute par l'enlèvement du béton d'enrobage endommagé et/ou contaminé.

Le dégarnissage doit permettre la mise à nu des armatures corrodées, dans toute leur circonférence.

En fonction du niveau de la profondeur de contamination du béton, le dégarnissage peut être réalisé par burinage, bouchardage ou hydro-décapage UHP (Ultra Haute Pression). La rouille des surfaces métalliques est éliminée par brossage ou sablage. Pour redonner à l'ouvrage toute sa capacité structurelle, il est parfois nécessaire de remplacer certaines armatures, ou d'en ajouter en soutien complémentaire. Une fois la corrosion éliminée, la passivation des aciers sera faite par l'application d'un produit conforme à la norme EN 1504-7 puis recouvert d'un mortier de réparation conforme à la norme EN 1504-3.

2

LES TRAITEMENTS ÉLECTROCHIMIQUES DU BÉTON

La corrosion est une réaction électrochimique. Il est possible d'agir directement sur les propriétés du béton pour restituer au ferraillage son milieu protecteur d'origine. Deux types de traitement existent : la réalcalinisation et la déchloruration.

a. La réalcalinisation : augmenter le pH du béton pour protéger le fer de la corrosion

Le traitement de réalcalinisation du béton est un traitement qui s'applique sur un béton carbonaté dont la valeur pH est trop faible. Il vise à restaurer son pH basique (13) autour des aciers afin de recréer un milieu passif. Cette technique met en œuvre une pâte électrolytique chargée en alcalins, associée à un courant électrique qui favorise une migration de la solution. L'électrolyse de l'eau va également générer des ions, formant autour de l'acier une couche protectrice contre la corrosion. La réussite de la réalcalinisation peut être contrôlée à l'aide de phénolphthaléine, un réactif coloré.

b. La déchloruration : un traitement adapté à l'atmosphère marine

La déchloruration du béton est une méthode dérivée de la réalcalinisation à la différence qu'ici, il ne s'agit pas d'introduire des alcalins dans le béton, mais des ions hydroxydes. Il a pour objectif d'extraire les ions chlorures du béton d'enrobage dus au sel marin ou au sel de déverglaçage, pour diminuer le risque de corrosion des armatures.

Le traitement de réalcalinisation et le traitement d'extraction des ions chlorures peuvent être réalisés simultanément. Pendant les travaux, les tensions sont contrôlées et des échantillons de béton sont prélevés au droit des aciers pour analyser l'alcalinité et la teneur en ions chlorures. Des mesures électriques indirectes (cartographie de potentiel ou de résistance de polarisation), peuvent également démontrer une application correcte du traitement puis une diminution (plutôt qu'arrêt) de l'activité de corrosion. La complémentarité de ces résultats de mesures détermine la poursuite ou non du traitement.

3

LA PROTECTION CATHODIQUE

La protection cathodique est une approche prédictive du comportement des ouvrages. Elle permet de protéger les armatures contre la corrosion, mais aussi de contrôler la corrosion en agissant directement sur les pièces métalliques. Très répandu dans le secteur maritime pour protéger la coque des bateaux, ce traitement électrochimique est destiné à l'ensemble des ouvrages en béton : ponts, colonnes, poutres, tunnels, parkings et même les bâtiments d'habitation quand ceux-ci sont particulièrement exposés (front de mer par exemple).

La protection cathodique consiste à porter le potentiel électrochimique du métal à un niveau dit de passivation pour que sa vitesse de corrosion devienne négligeable. Cette technique peut être appliquée soit en préventif sur des ouvrages neufs ou existants qui ne présentent aucune corrosion, soit en protection lors de la phase de propagation de la corrosion. Lorsque l'ouvrage est déjà attaqué, la protection cathodique installée de manière durable sur l'ouvrage a pour objectif de limiter, voire annihiler la corrosion des armatures.

DEUX TYPES DE PROTECTION CATHODIQUE

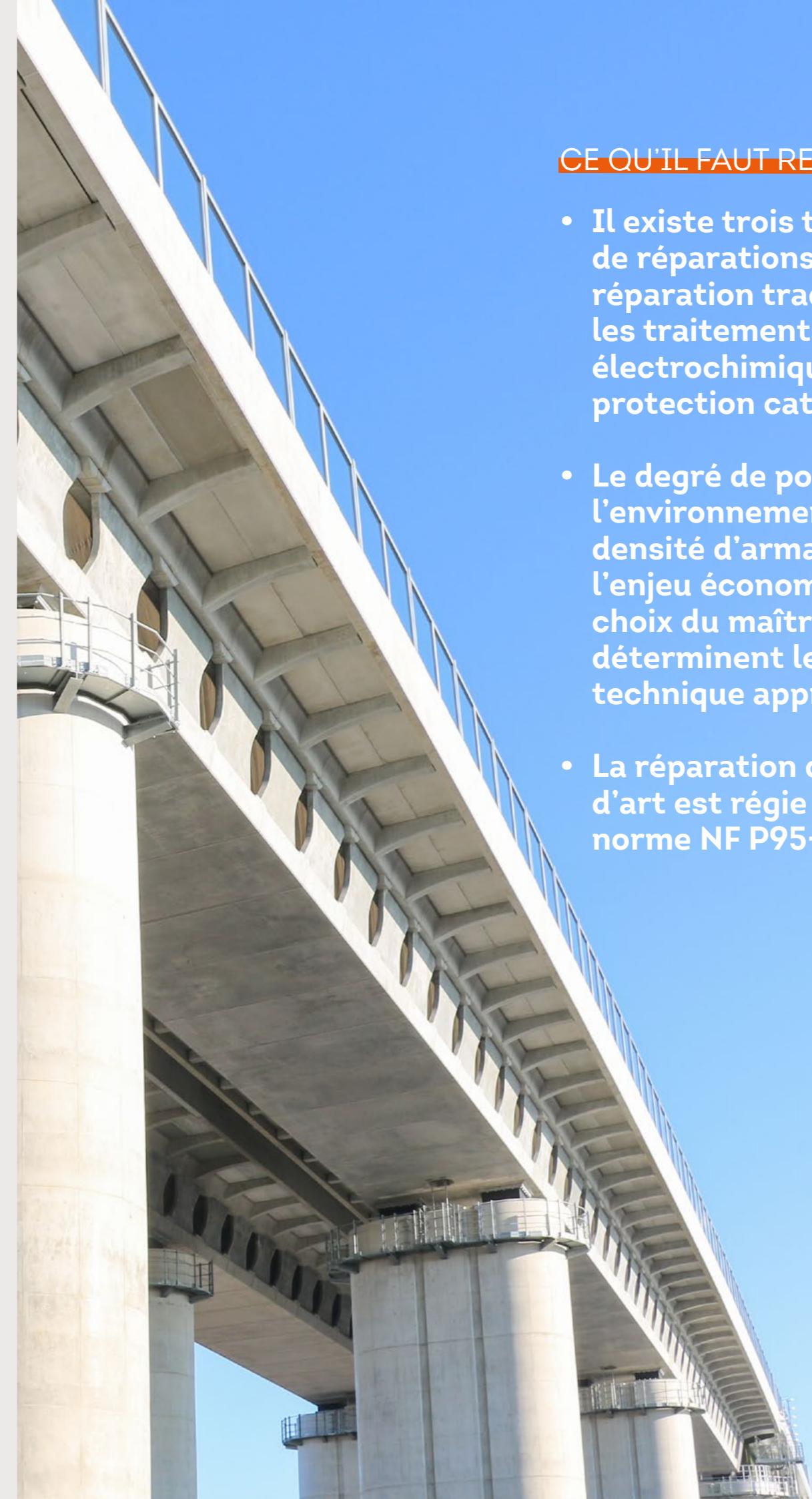
La protection cathodique peut être réalisée de deux manières.

- **La protection cathodique par courant imposé (PCCI)** consiste à injecter du courant dans le béton entre la structure à protéger (cathode) et une anode auxiliaire, (du titane en règle générale).

- **La protection cathodique par courant galvanique (PCCG)** est réalisée par couplage galvanique entre l'acier de la structure béton à protéger et des anodes constituées d'un métal ou alliage moins noble que le métal que l'on veut protéger (du zinc en général).

Quel que soit le système, l'efficacité de la protection dépend de la densité de courant cathodique échangé à la surface du métal que l'on veut protéger. C'est la différence de potentiel électrique ainsi obtenue qui sert de critère pour estimer l'efficacité de la protection.

Ce processus ne reconstitue pas l'acier, mais diminue significativement voire annule les risques en stoppant la progression de la corrosion. Sa durabilité dans le temps dépend des travaux. Il est généralement dimensionné pour prolonger la durée de vie de l'ouvrage de 10, 15 ou 30 ans.



CE QU'IL FAUT RETENIR

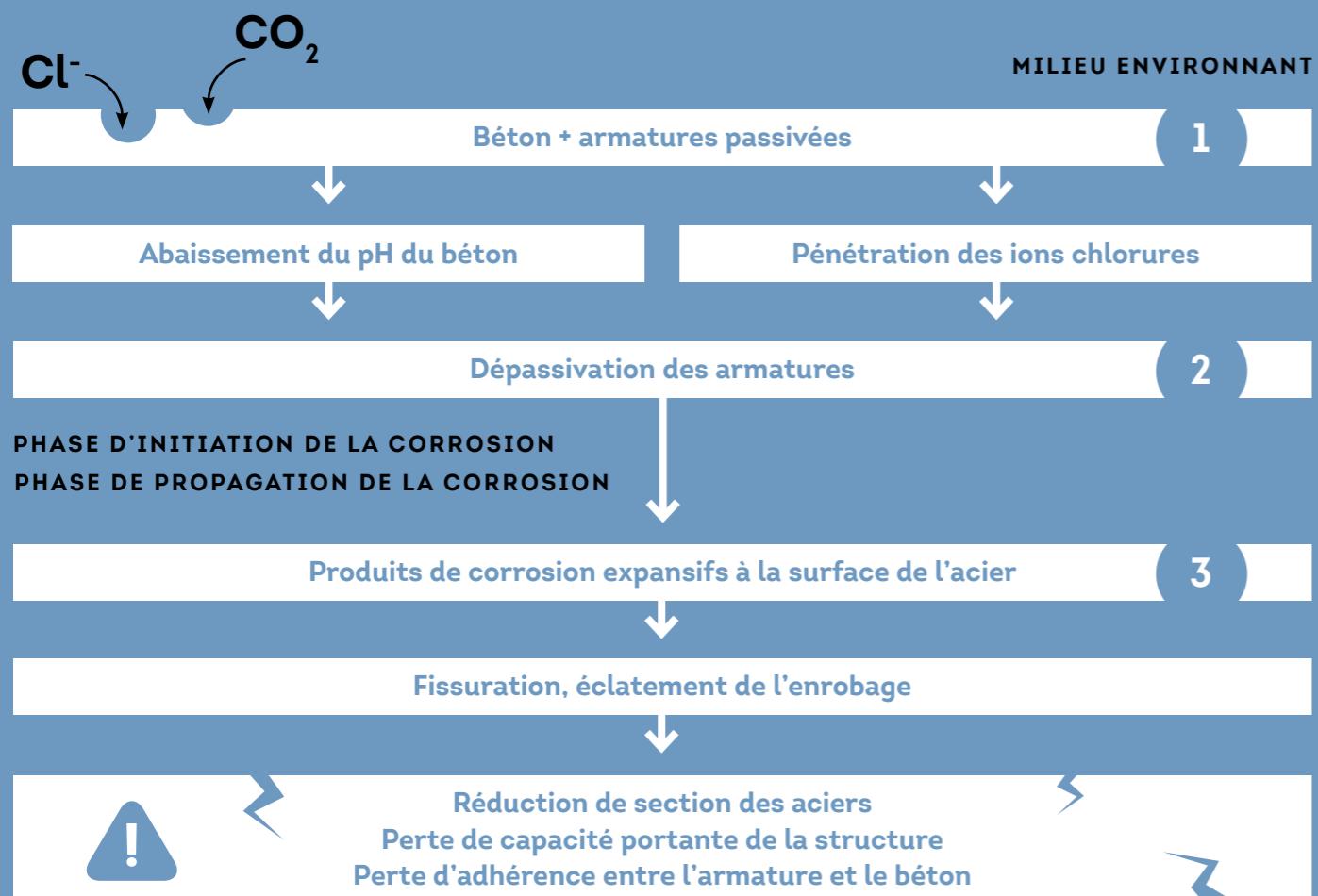
- Il existe trois types de réparations : la réparation traditionnelle, les traitements électrochimiques et la protection cathodique.
- Le degré de pollution, l'environnement, la densité d'armature et l'enjeu économique allié au choix du maître d'ouvrage déterminent le choix de la technique appropriée.
- La réparation des ouvrages d'art est régie par la norme NF P95-101.

La protection cathodique par courant galvanique

La protection cathodique par courant galvanique, également appelée protection par anodes sacrificielles, est un procédé de stabilisation de la corrosion des armatures dans un béton.

Principe de la protection galvanique

Le principe général de la protection galvanique est de ralentir la vitesse de corrosion en faisant passer un courant continu de protection de l'anode vers la surface du métal à protéger. Concrètement, il s'agit d'introduire des anodes (composées d'un noyau sacrificiel de zinc activé dans un mortier spécialement formulé) autour des armatures.



Mode opératoire

La protection galvanique fait intervenir deux métaux au potentiel de corrosion E différent. Dans ce cas, le couple est constitué du fer (acier des armatures) et du zinc (métal d'apport), avec potentiel $E_{\text{Zn}} < E_{\text{Fe}}$. Lorsque le fer et le zinc sont plongés dans une même électrolyte, les réactions propres à la corrosion de chaque métal se déroulent à leurs surfaces :

- Oxydation du métal à l'anode : $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2e^-$ et $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2e^-$
- Réduction des espèces oxydantes à la cathode : $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^- \rightarrow 4\text{OH}^-$

Lorsque les deux métaux sont également reliés électriquement, l'équilibre des réactions est bouleversé. Puisque le zinc possède le potentiel de corrosion le plus faible, cela signifie que son oxydation libère davantage d'ions et d'électrons dans le milieu. Les électrons produits par la dissolution du zinc vont ainsi se déplacer naturellement dans le circuit jusqu'au fer, pour maintenir l'équilibre électrique. Cela change l'équilibre des réactions d'oxydo-réduction : le zinc s'oxyde toujours davantage tandis que le fer devient essentiellement le siège des réactions de réduction. Si l'on accepte la dégradation du zinc, le fer se trouve ainsi protégé.

À la différence de la protection cathodique par courant imposé, les systèmes galvaniques sont autonomes et n'exigent aucune alimentation électrique externe en général. Leur utilisation autonome réduit considérablement le besoin d'entretien continu. Une telle installation a une durée de vie calculée en fonction du contexte : l'effet de protection galvanique est étroitement lié à la résistivité du béton et donc, notamment, à son taux d'humidité, sa compacité, etc...

STEPHANE PANIN (R3S)

« Les campagnes traditionnelles de réparation ne permettent pas de pérenniser l'ouvrage »



La réparation des bétons nécessite non seulement une bonne connaissance du support à réparer, des matériaux de réparation et de l'environnement dans lequel ils vont être mis en œuvre, mais également une compréhension des mécanismes à la base de l'adhésion. C'est le défi que relève chaque jour Stéphane Panin expert en corrosion. Selon lui, la technique de réparation traditionnelle du béton armé est efficace, mais a ses limites.

Face à la corrosion des bétons armés, faut-il démolir pour mieux reconstruire ?

S-Panin : Il nous faut revenir 70 ans en arrière pour bien comprendre les enjeux. L'utilisation du béton dans la construction était alors massive, intensive et quasi systématique. L'urbanisme moderne d'après-guerre se basait sur des solutions constructives conçues pour durer 50 ans, tout au plus. Concrètement, lorsqu'un ouvrage arrivait en fin de vie, il était prévu qu'il soit démolи pour reconstruire quelque chose de nouveau. C'était le postulat de l'époque et le dénouement le plus économiquement viable, les pathologies du béton n'étaient pas connues.

L'option démolition-reconstruction est clairement à l'exact opposé des préoccupations environnementales actuelles du grand public. Sans compter que l'appauvrissement des ressources naturelles, la pénurie mondiale de sable, les problèmes d'alimentation en eau potable, la forte augmentation du prix de l'énergie, la réglementation, la prise en compte de la gestion des déchets... ne nous permettent pas de détruire pour reconstruire indéfiniment. Aujourd'hui, il est possible d'agir directement sur les propriétés du béton pour restituer au ferraillage son milieu protecteur d'origine et ainsi donner une seconde vie aux ouvrages.

BIO

Stéphane PANIN / R3S

R3S est une entreprise indépendante spécialisée dans le diagnostic, les travaux de réparation et le renforcement structurel. Depuis sa création en 2011, Stéphane Panin et ses équipes multiplient les chantiers sur l'ensemble du territoire afin de réhabiliter les ouvrages et leur donner une seconde vie. L'entreprise ariégeoise conçoit et met en œuvre des solutions innovantes et durables répondant à des pathologies complexes affectant les structures. Les équipes R3S sont formées et certifiées Cefracor.

www.r3s-france.fr

Les campagnes de réparation traditionnelles seraient-elles arrivées à leurs limites ?

S-Panin : En effet, si les méthodes de réparation classiques du béton endommagé sont efficaces, elles ne garantissent pas toujours de bons résultats sur le long terme. Par exemple, vouloir continuer à sauver les bâtiments en béton construits en front de mer, aujourd'hui en fin de vie, par des campagnes de réparation traditionnelles, est pour moi de l'acharnement thérapeutique.

Le fait est que, malgré de nombreuses campagnes traditionnelles, la corrosion subsiste et continue à se propager dans l'ouvrage. La partie visible du problème a certes été traitée, mais la corrosion n'a pas été éliminée. De nouvelles dégradations apparaissent sur le pourtour de la zone réparée par effet d'anode induite, intensifiant l'activité de corrosion autour d'elle.

Traiter les symptômes qui affectent la structure du bâtiment ne fait que conduire à de nouvelles opérations, de plus en plus importantes et coûteuses. C'est d'autant plus vrai dans un environnement à forte salinité où l'acidité des chlorures accroît le risque et la vitesse de corrosion des métaux.

Ce type d'opérations très localisé ne permet pas de répondre à un objectif essentiel qui est de pérenniser l'ouvrage dans sa globalité.

Que signifie donner « une seconde vie » aux bâtiments ?

S-Panin : Il s'agit de faire des opérations de réhabilitation lourdes qui permettraient de traiter en profondeur la pathologie des bétons et ainsi donner une seconde vie aux ouvrages. La stratégie proposée ici suppose que les ouvrages sont suivis régulièrement et, en particulier, que l'état initial de l'ouvrage est connu.

Aujourd'hui, nous vivons une étape charnière, nous doublons la durée de vie de ces bâtiments grâce à des solutions qui permettent à la fois de traiter des symptômes et de réparer les parties de l'ouvrage déjà affectées par la corrosion. Lorsque le béton est contaminé au-delà du premier lit d'armature, appliquer une protection cathodique par courant imposé fait partie des solutions d'une efficacité redoutable.

Quels conseils donnez-vous ?

S-Panin : Nos clients sont aujourd'hui à la recherche de solutions durables. Cela passe par une prise en compte du phénomène de la corrosion qui a déjà fait son œuvre sur les bâtiments sans aucun stigmate. C'est à partir de là que l'on peut choisir la solution la plus pérenne, adaptée à l'ouvrage et éviter que de nouveaux problèmes persistent.

La résidence Eyre Merlin à Seignosse : « ON A FRÔLÉ LA CATASTROPHE ! »

Le 15 septembre 2020 la tranquillité de la résidence l'Eyre Merlin (220 logements) à Seignosse dans le département des Landes, a été troublée par un garde-corps d'un balcon se décrochant d'une des façades. Heureusement, cette chute depuis le deuxième étage n'a occasionné que des dégâts matériels. En cause ? Les ferraillages supportant les garde-corps sont corrodés par le sel des embruns et de l'air marin. C'est alors que PAREXLANKO entre en jeu ! Le système d'anodes Galvashield® a été appliqué pour la protection cathodique permettant de stopper le phénomène de corrosion due à la présence de chlorures dans les bétons.

Traces de rouille, fissures, épaufures sur le parement, faible enrobage des aciers... Les cinq bâtiments en béton construits après-guerre en front de mer trahissaient des pathologies profondes et étendues, en particulier des phénomènes de contamination par les chlorures.

La dégradation des bétons en bord de mer souvent peu visible

« L'environnement joue un rôle primordial dans les phénomènes de corrosion. La dégradation des bétons par pénétration des sels marins est inexorable. Rares sont ceux qui y résistent ! Et il est normal qu'au bout d'un certain nombre d'années, ces contaminants atteignent les armatures, explique Arnaud Dubosc de Corten Ingénierie ([voir bio p.21](#)), en charge de la maîtrise d'œuvre.

La résidence l'Eyre Merlin comme d'autres sur le littoral a été construite à la fin des années 70. Elle n'est pas la seule à connaître ce genre de mésaventure ».

L'étape essentielle du diagnostic sur la corrosion des armatures dans le béton

Réaliser une campagne de diagnostic poussée des cinq bâtiments est donc indispensable pour mesurer l'état des structures, caractériser plus spécifiquement le phénomène de corrosion et établir ainsi les travaux à mettre en œuvre d'urgence.

« Dans un premier temps, il était nécessaire de déterminer les zones où les armatures se corrodaient. Des prélèvements et analyses ont donc été effectuées dans les parties endommagées », souligne le maître d'œuvre spécialisé en traitement de la corrosion du béton armé. Cela a permis à l'expert de mesurer la profondeur de pénétration des chlorures dans l'enrobage du béton et d'arbitrer les éléments trop dégradés pour recevoir une protection.

Dans cette optique, chaque ouvrage a fait l'objet d'une étude et d'un dimensionnement particulier. Les garde-corps ont fait l'objet d'un test spécifique appelé la technique de marteau dynamique CORRODYN. Elle permet d'analyser le comportement dynamique des garde-corps grâce à un accéléromètre fixé sur l'ouvrage, sous l'impact d'un marteau dynamique, les deux éléments étant reliés à une centrale d'acquisition.

Les conclusions de sondages ont révélé des dégâts structurels majeurs et des risques en divers endroits des façades. « Les ferraillages supportant les garde-corps sont pour beaucoup corrodés. Sur les 500 garde-corps que compte la résidence, près de 10 allaient se décrocher de la façade. On a frôlé la catastrophe », souligne Arnaud Dubosc.

« Si des fissures étaient apparues ici et là, les résidents et syndics de copropriété ne se doutaient pas des risques cachés. La question de la vétusté des bâtiments est encore trop souvent sous-estimée », remarque le maître d'œuvre.



Réhabilitation des façades et protection Cathodique par Courant Galvanique (PCCG)

« Sur le reste des ouvrages en béton armé affectés par la contamination par les chlorures, compte tenu du stade avancé de dégradation et pour assurer la sécurité des personnes, nous avons été obligés de prévoir le sciage de tous les garde-corps béton et de mettre en sécurité les balcons.

La solution par protection cathodique par courant galvanique (anodes sacrificielles) a été proposée aux propriétaires avec un double objectif : traiter la corrosion sur l'ensemble des bâtiments et pérenniser les réparations envisagées afin d'éviter un nouveau sinistre. C'est dans ce cadre que les entreprises R3S et BTPS ont été missionnées pour la réalisation de travaux de traitement anticorrosion dans le cadre du ravalement de la résidence. »

9000 anodes sacrificielles contre la corrosion des bétons

9000 anodes sacrificielles PAREXLANKO (Anodes Galvashield® CC4) ont été fixées aux armatures par les équipes de Stéphane Panin (R3S)

Ce système est basé sur l'utilisation d'anodes sacrificielles PAREXLANKO (Anodes Galvashield® CC4) capables de créer une protection galvanique de l'acier qui se passive, grâce à la différence de potentiel électrochimique entre les deux métaux connectés. Les anodes, composées de zinc, se consumeront dans le temps, assurant à la structure une longue protection contre la corrosion (jusqu'à 40 ans en comptant l'effet décontaminant de la protection cathodique en plus de la protection immédiate).

La protection cathodique par anodes galvaniques représente une gamme complète contre la corrosion de l'acier simple et facile à installer, qui ne nécessite aucune source d'énergie extérieure ni entretien pendant toute la durée de vie des anodes.



Une gamme complète pour la protection contre la corrosion des armatures

PAREXLANKO

PAREXLANKO dispose d'une gamme complète d'anodes pour la prévention et la protection cathodique par courant galvanique, destinée à l'ensemble des ouvrages en béton potentiellement soumis à la corrosion.

Une gamme complète PAREXLANKO pour la réparation et la protection des ouvrages en béton armé

PAREXLANKO propose une gamme complète d'anodes dédiées à la PCCG. Suivant la typologie de la réparation, le type d'ouvrage, la densité de courant souhaitée et durée de vie, le choix se portera sur des anodes Galvashield® XP, Galvashield® CC ou Galvashield® DAS (cf. tableau ci-contre).

Les anodes PAREXLANKO sont réparties sur une large gamme d'anodes sacrificielles :

Anodes	GALVASHIELD® XP	GALVASHIELD® CC	GALVASHIELD® DAS
Rôle	Empêcher la formation d'anodes induites en périphérie des réparations ponctuelles	Maîtriser la corrosion active et empêcher le développement de nouveaux sites de corrosion	Protéger les ouvrages fortement sollicités par la corrosion (forte capacité en zinc)
Domaines d'application	Zones de réparations ponctuelles des ouvrages soumis à la carbonation des bétons et/ou à la présence de chlorures	Traitement généralisé des parements bétons soumis à une corrosion dont les effets ne se font pas encore sentir (ponts/parkings/bâtiments)	Structures en environnement marin Armatures des joints de chaussée Ouvrages en béton armé en condition sévère d'emploi

Ces anodes ont la spécificité d'avoir la partie en zinc enrobée dans un mortier spécifique, la maintenant dans un environnement fortement alcalin favorisant son fonctionnement et la rétention des résidus de combustion du zinc (anodes alcalines). Elles présentent aussi l'avantage par rapport à d'autres systèmes de ne pas apporter de chlorures supplémentaires dans le béton (anodes salines).

PAREXLANKO

avec vous

Qui sommes-nous ?

Depuis plus de 40 ans PAREXLANKO, acteur de tout premier plan, propose des solutions pour les professionnels du bâtiment et du génie civil.

Les domaines d'application de ses gammes couvrent :

- **La protection et la décoration** des façades neuves et anciennes
- **L'isolation Thermique par l'Extérieur**
- **La préparation des sols et la pose de carrelage** des ouvrages en béton.

Ce qui nous anime au quotidien, c'est de partager avec vous notre expertise et notre savoir-faire. Comprendre les matériaux, respecter les supports et anticiper les évolutions de vos métiers : tels sont nos objectifs pour concevoir des solutions adaptées à toutes les conditions de vos chantiers.

PAREXLANKO c'est aussi une protection française, au plus près de vos chantiers :



660
collaborateurs



6 sites de
production



3 plateformes
logistiques



1 centre
de R&D



1 centre
de formation

PAREXLANKO

conseil

Votre contact



Philippe MONTERRAT
INGENIEUR PRODUIT

philippe.monterratt@parex-group.com

PAR EXPÉRIENCE. PAREXLANKO.



PAREXLANKO

PAR EXPÉRIENCE. PAREXLANKO.