



Photo : Parexianko

LES PATHOLOGIES DU **BÉTON**

Le béton est une matière vivante, donc il vieillit et se détériore. Plusieurs causes non liées à sa fabrication, le rendent vulnérable : carbonatation, chlorure, agressions chimiques, gel/dégel, accidents mécaniques, sont autant de raisons qui le fragilisent. Une fois diagnostiquées, les pathologies doivent être traitées. Un point sur les techniques existantes que l'on utilise pour réparer les bétons.

Gwénola Rolland

Le béton est souvent qualifié d'élément « vivant ». Donc par essence, il se dégrade. Et pour illustrer ce fait, les exemples sont nombreux. Miné en août 1944 par les Allemands, le pont de Térénez, dans le Finistère a été reconstruit sur les piles d'origine et achevé en 1952. Seulement, un problème de compatibilité entre le sable et le ciment employé dans les bétons

d'après-guerre le font vieillir prématurément. L'alcali-réaction, communément appelé « cancer du béton », provoque de nombreuses et irrémédiables fissures dans la maçonnerie. Les premiers travaux de réparation ont débuté en 1992, après un bilan de santé complet. Depuis 1998, l'ouvrage est sous surveillance. Pour effectuer les travaux d'entretien et vérifier la

capacité de pont à supporter le trafic routier, depuis 1992, 1 400 000 € ont été consacrés aux travaux d'entretien et de confortation.

Autre exemple, le pont de Saint-Nazaire*, situé en Loire-Atlantique, achevé en 1974, il est mis en service en 1975. Ce pont-route à haubans (pont principal) subit depuis 2003

**Source Structurae*



Le pont de Saint-Nazaire subit des réparations béton depuis 2003.



Photo : Parexianko

L'eau et l'air, les deux ennemis des armatures du béton armé.

différents types de réparations pour les bétons des poutres VIPP. De par son âge et sa situation géographique, le diagnostic va sans dire : carbonatation et chlorure.

Cinq causes de détériorations nuisent principalement au matériau : des causes mécaniques, chimiques, la carbonatation, les chlorures et les cycles gel/dégel.

Causes externes de détérioration

Il est fréquent de passer sous un pont et d'observer un béton abîmé accidentellement, certains conducteurs de PL oubliant la hauteur de leur véhicule et celle de l'ouvrage. Au sol on peut observer le même phénomène quand deux dalles se sont dégradées, soumises aux multiples passages des engins, leur joint est alors en piteux état. Ces manifestations sont ponctuelles et forcément très prévisibles.

Les désordres qui surviennent lors d'agressions chimiques sont tout autre. Dans ce cas, seul le parement est touché, mais pas l'armature (pour un béton armé). Ces problè-

mes se retrouvent la plupart du temps sur des bâtiments abritant des industries chimiques, mais aussi sur des ouvrages de génie civil de type bassins de décantation car intrinsèquement, le béton n'apprécie guère toute substance trop acide. Et pour cause ; de part sa constitution, il est très basique (12 ou 13 de pH), ceci grâce au composant ciment. De ce fait, l'acier trouve en lui un parfait protecteur et ne rouille pas. Seulement, en présence de l'air ou de l'eau, c'est le phénomène inverse qui se produit et l'acier rouille. Chimiquement ceci s'explique ainsi. Le dioxyde de carbone contenu dans l'air réagit avec la chaux (ciment) et se transforme en carbonate de calcium. Or ce dernier composé n'a pas la basicité élevée de la chaux. L'acier peut alors rouiller, c'est l'effet de carbonatation.

« Malheureusement on ne peut que retarder le phénomène, mais en rien l'éviter. » explique Eric Boullenois, directeur marketing, BASF Construction Chemicals France.

Chlorure et gel/dégel

En ce qui concerne les attaques aux chlorures, là encore ce sont les armatures qui sont touchées. La plupart du temps il s'agit de sels marins qui pénètrent la structure ou de sels de résultant du salage des routes dans des zones montagneuses (parking souterrain). De la même façon que pour l'effet de carbonatation, l'acier rouille en contact avec l'eau ou l'air (Fe devient $Fe(OH)$). Le stade suivant est un gonflement des aciers qui engendre des fissurations dans le béton. Une fois que l'acier n'adhère plus au béton, celui-ci perd de son intérêt.

Enfin dernière cause externe de détérioration des bétons, le gel/dégel, qui se manifeste comme suit : lors de la fabrication du béton, de petits réseaux de vides se créent parfois. Quand il pleut, l'eau entre dans ces canaux sur une certaine épaisseur. En gelant, elle va pousser, et donc s'expanser. Après plusieurs cycles de ce type apparaissent là aussi de petites fissurations.



Trois questions à Guy Chatila, ingénieur expert judiciaire, près la Cour d'Appel de Colmar, agréé par la Cour de Cassation

Forum Chantiers : Qu'avez-vous le plus souvent constaté, des désordres liés à la fabrication du béton ou au contraire plutôt des pathologies résultant de causes externes ?

Guy Chatila : Il n'y pas une cause vraiment prépondérante. Les bétons issus de centrale sont en général de bons bétons, les problèmes sont plutôt la conséquence d'une mauvaise mise en œuvre. Par exemple si le béton est mal vibré ou au contraire hyper vibré. Ensuite la disposition des armatures pour un béton armé est une étape primordiale. Elle est pourtant parfois négligée, soit par inattention, soit parce qu'il y a des difficultés d'exécution (les armatures se déplacent lors du bétonnage pour des voiles de grande hauteur).

Mais on peut y remédier au moment du décoffrage. Par exemple lorsqu'on découvre une ségrégation en pied de voile ou de poteau. Il faut alors immédiatement faire opérer un ragréage.

Forum Chantiers : En Alsace, quelles pathologies avez-vous le plus fréquemment remarquée ?

Guy Chatila : J'ai surtout observé des conséquences de carbonatation aggravées par des phénomènes de pollution type brouillards salins par exemple. On

retrouve fréquemment cette manifestation dans des régions continentales et à proximité d'industries. Mais le phénomène est connu. Par exemple, durant l'exploitation des mines de potasse, même si aucune norme légiférait en ce sens, les maîtres d'ouvrage prenaient en compte le contexte environnemental et imposaient à leurs réalisations, les mêmes règles qu'aux ouvrages situés en zone maritime. Seulement, ces éventuelles dispositions, à prendre en amont du chantier, sont à l'appréciation du décideur, donc souvent ignorées. Rien n'est clairement zoné canton par canton dans l'Hexagone ou délimité suivant des critères précis comme cela existe, par exemple, pour les risques sismiques. Mais il y a des limites à cela car étudier le contexte environnemental d'un site est aussi très variable dans le temps, les usines étant mouvantes et les normes, elles, constantes.

Forum Chantier : Quel est votre avis concernant la cause de détérioration gel/dégel ?

Guy Chatila : Cette conséquence ne devrait pas exister. Ce phénomène se produit lorsque le béton n'est pas suffisamment compact voire poreux car il a été mal vibré. Des fissures se forment et

l'eau pénètre, le gel provoque un gonflement puis des éclats en surface. De proche en proche, les armatures ne sont plus protégées et vont se corroder.

Un « bon » béton ne doit pas réagir au gel/dégel, sauf à être particulièrement exposé aux intempéries, sans protection.



Pour pallier ces désordres du matériau, il faut avant tout bien analyser leur cause et parfois ne pas oublier que plusieurs phénomènes peuvent s'additionner. Par exemple, il n'est pas exceptionnel qu'un ouvrage soit à la fois atteint de carbonatation et de chlorure.

Diagnostic

Pour opérer correctement sur l'ouvrage atteint, il faut faire le bon diagnostic. Il y a pour cela plusieurs étapes. L'ouvrage susceptible d'avoir des désordres est premièrement ausculté. En fonction des résultats obtenus, il est parfois nécessaire d'imposer une surveillance renforcée, voire d'employer des mesures de sécurité immédiate ou de sauvegarde. Cette auscultation se fait sur les deux éléments du béton armé : le matériau et la structure. Concernant le parement, une fois la zone identifiée, on source l'état de dégradation. Pour la structure, on fait des tests mécaniques et on observe le comportement de l'armature. Les premières conclusions sont alors tirées et s'ensuit une ébau-

che de solution. Pour mener à bien ce diagnostic, les bureaux d'études utilisent divers outils spécifiques. Si parfois certains sont couramment utilisés, d'autres sont onéreux et difficiles à mettre en œuvre.

Parmi les outils fréquemment employés, il y a par exemple le ferroskan qui permet de quantifier l'épaisseur de l'enrobage du béton. La limite de cette technique c'est qu'elle donne de bonnes informa-



Photo : Parexkanko

Le diagnostic est une étape décisive pour déterminer la cause de détérioration du matériau béton.

tions concernant la 1ère nappe d'armatures, mais informe peu pour celles qui sont situées derrière. Autre méthode pour mesurer la carbonatation, l'utilisation de phénolphthaléine dont le but est de colorer les zones de bétons carbonatés. Une carotte du béton est alors prélevé et on vient pulvériser dessus cet indicateur coloré. Si le béton apparaît rose, cela signifie qu'il est sain.

Quand on suspecte une attaque par chlorures, on peut effectuer des « prélèvements poutres ». Pour ce faire, à l'aide d'une scie à cloche on enlève, en profondeur, 3 cm de béton et avec un foret on récupère la poudre laissée et ensuite on analyse son dosage en chlorure.

Enfin dernière option, la méthode dite « par demi-pile » qui consiste à déplacer une électrode sur le parement béton et mesurer sa tension, cela permet de connaître l'état de corrosion des aciers. Les critères sont les suivants : si l'électrode indique une tension inférieure à 200 mV, le risque de corrosion est en dessous de 10 %. Toutefois là encore il y a des limites car cela impose que l'ouvrage aie un ferrailage continu, une absence de revêtement de surface et que le béton ne soit pas trop sec.

Trois techniques moins usitées

Lors d'un colloque à l'initiative de Parexlanko le 22 février dernier, sur le thème « *Entretien et réparation des ouvrages en béton, une approche globale pour une protection durable.* »,



Le bateau porte sur le chantier d'Aker Yards, en cale sèche, subit des réparations béton.

Bruno Godart, du LCPC, a évoqué trois techniques assez particulières. La première est la gammagraphie, utilisée uniquement dans le cas de bétons précontraints, elle apporte une connaissance sur l'état des structures. Il s'agit d'une source radioactive qui permet de lire profondément « dans le béton ». En fonction du rayonnement choisi, on pénètre plus ou moins dans le béton.

Deuxième solution, l'auscultation par radar qui renseigne uniquement sur l'état des armatures. L'objectif est de générer des impulsions électromagnétiques. Les ondes en

retour sont ensuite enregistrées. Un écho est capté par antenne réceptrice. En cas d'obstacles, il y a absence ou atténuations de celui-ci. Les limites à cette technique sont nombreuses. Pour commencer il n'est pas possible de mesurer le diamètre des armatures. Ensuite, on ne peut pas ausculter l'intérieur des gaines métalliques, enfin il est difficile d'interpréter les données quand le ferrailage est très dense (mailles inférieures à 8 ou 10 cm).

Enfin dernière technique connue, la thermographie infrarouge. Ici, une caméra détecte le proche infrarouge. On tire alors des conclusions en fonction de la couleur et de la température des éléments (détection des fuites thermiques). Intéressantes, ces techniques n'en sont pas moins coûteuses et complexes à utiliser.

Solutions

Une fois le bon diagnostic élaboré, il faut réparer. Là aussi, il existe plusieurs techniques.

En cas de carbonatation ou de chlorure le principe est de casser les parties du parement qui n'adhèrent plus et ensuite, si la structure métallique est touchée, on vient passer les aciers. Puis, on applique un mortier de réparation. Pour ôter les parties endommagées, plusieurs solutions sont possibles, tout dépend de l'ampleur des dégâts sur la zone à traiter. On peut utiliser par exem-



Photo : Aker Yards

Si la structure métallique est touchée, on vient passer les aciers.



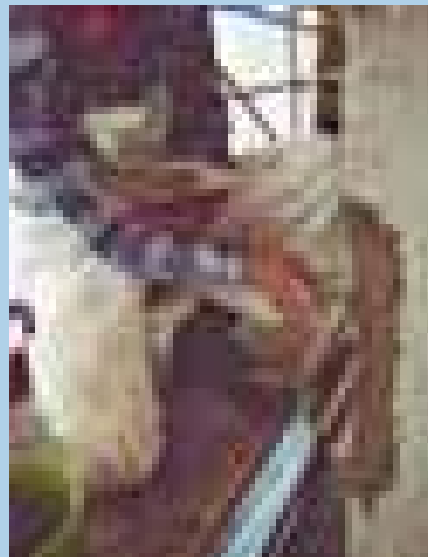
ple un outil dit « d'hydrodémolition » ou simplement casser la surface avec un marteau-piqueur. Par exemple, Christian Dupin, Freyssinet, agence ouest, a dû s'adapter aux circonstances des travaux de réparation du bateau-porte à Saint-Nazaire (44), « *On avait prévu au départ de décaper avec une lance à 200 bar et ensuite de réparer à l'aide d'une machine à projeter, mais ce chantier ne nécessite que des réparations ponctuelles. La plupart des opérations sont faites à la main.* ». Pour ce marché de 150 000 €, l'entreprise, chargée à la fois des opérations de sondages et de réparations, travaille pour le compte d'Aker Yards (propriétaire des Chantiers de l'Atlantique depuis le 1er juin 2006). Les ouvriers interviennent sur une face à l'aide d'un échafaudage et sur les trois autres avec des nacelles. Une fois les zones identifiées et avalisées par le client, les bétons sont purgés. Ensuite, si la structure est attaquée à plus de 60 %, elle est remplacée, sinon, les aciers sont nettoyés (par hydrosablage par exemple) puis passivés. Pour l'étape de passivation, Freyssinet utilise le produit 760 Lanko Passiv de la gamme Parxlanko et pour la phase de réparation, le mortier 731 Lankorep Structure. Sondages et réparations ont été effectués en 4 semaines.



On peut donc travailler sur la compacité et l'imperméabilité du béton pour le protéger d'un environnement agressif.

Nanostructure : un choix BASF Construction Chemicals

Pour la rénovation d'une résidence à Vélizy (78), la société REIP, après avoir effectué un diagnostic préalable ainsi qu'un sondage, opère deux types



La nouvelle norme qui va entrer en vigueur dès 2008 est encore plus drastique en terme de tenue et de performance.

Pour les zones immergées, les entreprises de BTP utilisent fréquemment la protection cathodique par anode superficielle ou par courant imposé. Le principe est le suivant : on dispose sur la structure une anode constituée d'un matériau qui rouille plus facilement que

de réparation. La 1^{ère} concerne celle des façades nez de balcons. Pour la passivation l'équipe a utilisé le Masterseal® 300 MC, un enduit de protection contre la corrosion qui assure la liaison entre l'acier et le mortier. Ensuite une barbotine a été appliquée à la brosse avec le mortier de réparation EMACO R 317, thixotrope, sans fluage. Dernière étape : sur barbotine fraîche, REIP serre le mortier et procède au lissage et à la réparation avant peintures.

La réparation des sous-faces s'avère atteinte beaucoup plus profondément. Le choix est alors orienté vers une nouvelle technologie introduite fin 2006 dans les mortiers de réparation : la nanostructure. « *Le procédé est le suivant : on cristallise à l'état nanométrique au moment de l'hydratation du mortier, en fait on vient créer une nanostructure* », explique Jean-Claude Nicita, responsable chimie de la construction, IDF, BASF Construction Chemicals. Les Emaco Nanocrète, gamme visant à assurer la pérennité des réparations, répondent d'ores et déjà aux exigences de la nouvelle norme européenne de 2008.

l'acier. Résultat : elle va rouiller à la place de l'armature. Cette méthode est correcte à la condition d'avoir un taux d'humidité constant sur l'ouvrage, sinon il est difficile de savoir quand il faut remplacer l'anode.

Norme NF EN 206-1

Mais avant de réparer, il est plus judicieux de prendre les précautions nécessaires en amont. Or, depuis l'entrée en vigueur de la norme NF EN 206-1 le 1er janvier 2005, c'est chose faite. « *Cette norme est la suite logique de la norme française que l'on avait précédemment, XPP 18 305, qui reprenait déjà des notions de plastifications des bétons par rapport aux types d'agressions qu'ils pouvaient avoir à supporter durant leur vie.* » précise Patrice Verschaeve, directeur produits et qualité national, Cemex France. Pour la France on ne note pas de gros changements, hormis peut-être que tous les bétons de structures sont concernés et plus seulement les PBE...

La norme NF EN 206-1 est donc une norme européenne complétée par des annexes nationales qui la rendent plus exhaustive et contraignante.



La norme NF EN 206-1 concerne tous les bétons de structure.

En revanche elle ne prend en compte que le contexte dans lequel va être utilisé le béton et non son contexte de fabrication (même si le chantier dure 3 ans...). La norme classe l'environnement des bétons en plusieurs catégories de X0 (aucun risque de corrosion ou d'attaque) à XA3 (environnements chimiques agressifs). D'après ces paramètres, les quantités des composants du béton changent. Par exemple, quand on sait qu'un béton va subir des attaques de chlorures parce qu'il est situé en zone maritime, on va réduire le E/C (la quantité d'eau sur ciment) et le doser davantage en ciment. Dans le cas d'éventuelles attaques chimiques on fera très peu d'additions, hormis avec des fumées de silice et on dosera très fortement en liant.

Caractéristiques intrinsèques

Tous les composants sont étudiés en fonction des paramètres environnementaux : teneur en ciment, résistance minimum du béton, on joue aussi sur la teneur minimale en air dans le béton, sur la teneur en cendres volantes, fumées de silice, laitier moulu, addition calcaire, addition siliceuse et enfin sur la nature même du ciment. Concernant les granulats,

ils n'entrent pas en compte parmi les causes externes de détérioration du béton, en revanche des recommandations GRA (Groupe Rhône-Alpes) donnent des recommandations sur les caractéristiques des granulats quand il y a des risques de gel/dégel. Mais comme le spécifie Patrice Verschaeve, « Il n'y a pas de mauvais granulats en soi, mais des granulats dont les caractéristiques sont meilleures que d'autres. ». Or même si on peut en théorie utiliser toutes sortes de granulats pour



Les bétons d'aujourd'hui sont deux fois plus durables qu'il y a 20 ans.

Le Strres

Pas de mauvais jeux de mots... le Strres signifie syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement de structures. Depuis sa création en 1982, il est affilié à la Fédération des Travaux Publics. Sa vocation est de regrouper les entreprises appartenant aux Syndicats Départementaux et Régionaux d'Entrepreneurs de Travaux Publics qui exercent, à titre principal ou secondaire, une activité spécialisée dans la réparation et/ou le renforcement des structures de Génie Civil.

Ces objectifs principaux sont : l'élaboration de recommandations techniques précisant les règles de l'art des métiers de la réparation et renforcement, la participation active aux travaux de normalisation, tant français qu'europeens, pour les documents relatifs à l'exécution des travaux de réparation et de renforcement des structures en béton armé ou béton précontraint, l'étude et la définition des responsabilités et enfin la formation professionnelle ainsi que la qualification du personnel, pour la réalisation de travaux de haute technicité. Le Strres est également affilié à l'Association Française de Génie Civil (AFGC) qui regroupe entre autres : institutionnels ou organismes des principales administrations et sociétés nationales, maîtres d'ouvrages en travaux publics et bâtiment.

faire un béton, les meilleurs ont une absorption inférieure à 1 %. On peut donc travailler sur la compacité et l'imperméabilité du matériau en vue de le protéger d'un environnement agressif. Seulement la norme donne des valeurs minimales, mais au final, seul le maître d'ouvrage a à la fois le choix et la responsabilité d'opter pour un béton parfaitement adapté à son contexte ou non. De leur côté les Bétonniers offrent une palette de produits pour répondre à des contraintes très particulières, c'est par exemple le cas de Cemex avec sa gamme Advanci Génie Civil qui dépasse les contraintes de la norme en vigueur en offrant en plus la facilité de mise en œuvre d'un BAP.

Une chose est tout de même certaine, les bétons d'aujourd'hui ont une durabilité évaluée à 50 ans. Or il y a seulement 25 ans, au bout de 20 ans tous les ouvrages en béton armé étaient atteints de carbonatation. ■

Photo : Patexlank