

Pont Vasco de Gama Dix ans de démarche "durabilité"

Inauguré en 1998, à l'occasion de l'Exposition Universelle de Lisbonne, le pont Vasco de Gama constitue une des réalisations majeures de la fin du xx^e siècle. L'ouvrage est aussi le premier à bénéficier d'une démarche "durabilité". Bilan après dix années d'exploitation.

Desservant la ville de Lisbonne, capitale du Portugal, le pont Vasco de Gama vient de fêter ses dix années de service. Cet ouvrage d'exception constitue une des réalisations majeures de génie civil de la fin du siècle dernier. S'inscrivant dans le cadre de l'exposition universelle de 1998, sa construction avait pour buts de résoudre les difficultés de trafic routier – le franchissement du Tage n'étant alors assuré, à ce niveau, que par le Pont du 25 Avril – et de développer l'axe routier Nord – Sud du Portugal. Construit entre février 1995 et mars 1998, le pont Vasco de Gama présente une longueur de 17,2 km, ce qui en fait le plus long d'Europe, dont 9 km au-dessus de l'estuaire du Tage. Il se compose de huit ouvrages d'architectures distinctes qui sont, du Nord au Sud :

- **Accès Nord** : deux échangeurs reliant le pont au réseau autoroutier,
- **Viaduc Nord** : tablier en dalles nervurées réalisé en place sur étaieusement (488 m, 11 alignements de colonnes sur pieux),
- **Viaduc de l'Exposition** : tablier constitué de deux poutres caissons construites en encorbellement par assemblage de voussoirs préfabriqués (672 m, 13 alignements de colonnes sur pieux),
- **Pont Principal** : tablier haubané à poutres latérales en béton précontraint et entretoises métalliques construit en place (829 m, deux pylônes sur caissons, 6 alignements de colonnes sur pieux réunis par une fondation),
- **Viaduc Central** : tablier constitué de deux poutres caissons préfabriquées par travées entières (6 531 m, 81 alignements de 2 colonnes fondées sur pieux battus),

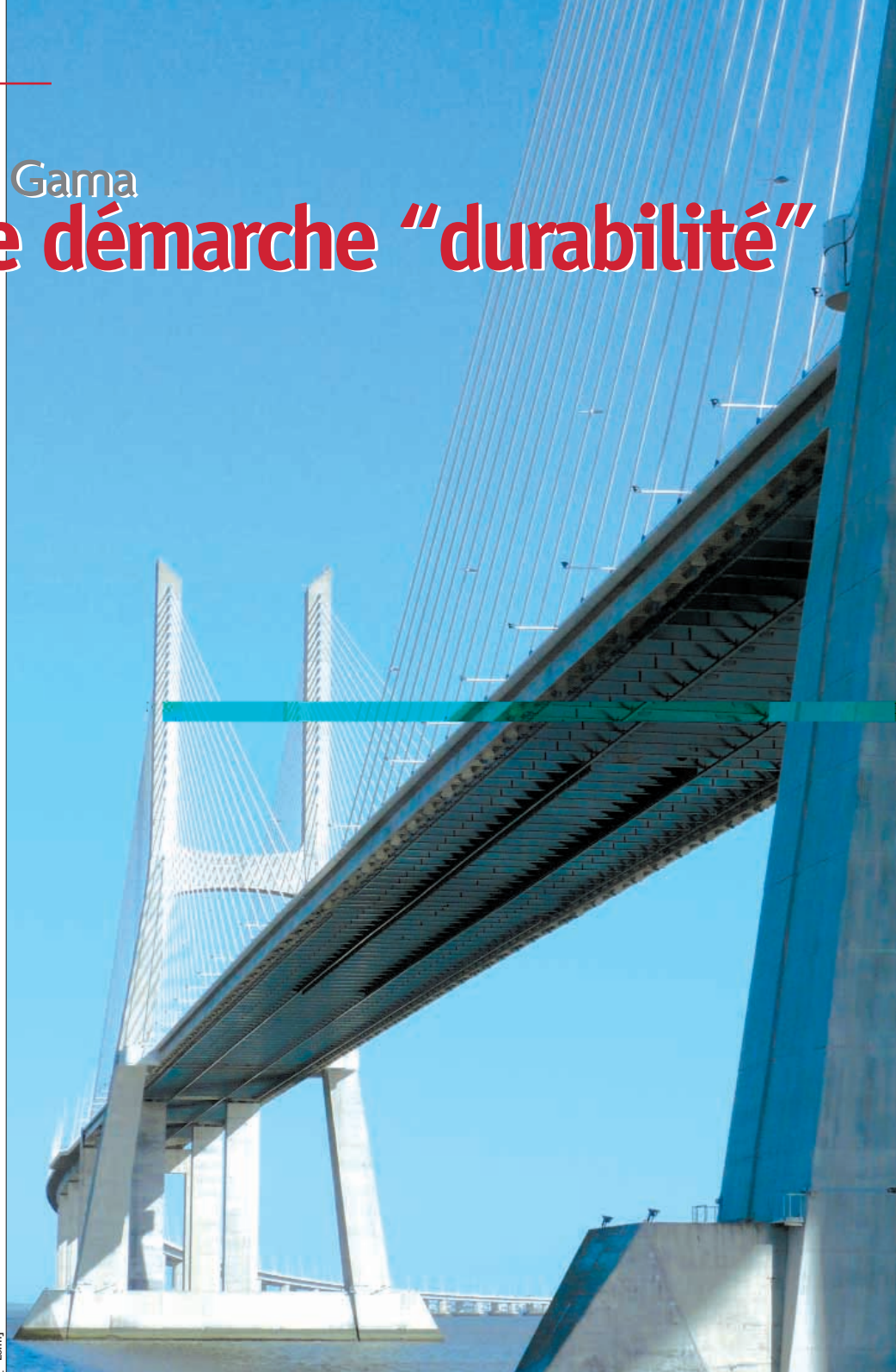
[© Lemn]

Vue générale du pont Vasco de Gama. Dans sa globalité, l'ouvrage se développe sur 17,2 km.

- **Viaduc Sud** : tablier en dalles nervurées réalisé en place par travées entières (3 825 m, 84 alignements de 4 colonnes fondées sur pieux),
- **Accès Sud** : plate-forme autoroutière et échangeurs (3 900 m).

La démarche "durabilité" adoptée. En concession pour une période de trente-trois ans après la mise en service, ce pont sera ensuite géré et administré par l'état portugais. Au-delà de ses dimensions et des contraintes environnementales (notamment sismiques), l'ouvrage se distingue des autres projets déjà réalisés par une démarche "durabilité", adoptée depuis

le début du projet jusqu'après la mise en service (des études sont encore en cours). C'est le premier ouvrage pour lequel une telle approche a été mise en place. En effet, une des spécifications principales et particulières, qui figurait au cahier des charges, est une exigence de durée de vie de 120 ans pour le béton de structure. Le but : garantir un faible coût d'entretien et de réparation. Dans cette optique, le critère majeur de durabilité retenu a été une concentration en chlorures $\leq 0,4\%$ pondéral au niveau des armatures après 120 ans d'exposition, la profondeur d'enrobage de ces dernières variant de 5 cm dans les zones



échéances ont non seulement pour but de vérifier que l'objectif de durabilité est effectivement atteint, mais aussi de valider la pertinence du modèle utilisé en comparant les résultats des simulations numériques avec ceux obtenus en laboratoire sur des prélèvements in situ.

Un suivi à long terme.

A – Mesures initiales et en phase de construction de l'ouvrage

Au total, une trentaine de formulations de béton ont été testées et validées en laboratoire, en regard des différents seuils fixés pour les indicateurs de durabilité. Les quelques formulations, correspondant à des classes d'exposition de faible agressivité, ne

satisfaisant pas les critères demandés ont été adaptées puis validées, ou remplacées par des formulations déjà validées. A ce stade, les résistances à la compression des bétons étaient par exemple supérieures à 60 MPa à 28 j, et pouvaient atteindre des valeurs supérieures à 100 MPa à 1 an. En particulier pour les bétons formulés avec le ciment CEM IV pour lesquels la réaction pouzzolanique permet, au-delà de 28 j, d'améliorer de manière significative la compacité des bétons.

B – Mesures réalisées sur le béton de l'ouvrage entre 1998 et 2001

Pendant cette période, des campagnes d'investigations ont été réalisées chaque année afin de déterminer



©Lerm

immergées ou exposées aux embruns, à 7 cm dans les zones de marnage.

Les principaux risques identifiés, en terme de durabilité, sont donc en relation avec la corrosion des armatures sous l'action des chlorures marins, véhiculés par l'eau du Tage, ou du dioxyde de carbone atmosphérique, ainsi qu'avec l'agressivité chimique de l'eau de mer. A l'époque de la construction, plusieurs classes d'exposition ont donc été retenues en fonction des risques identifiés sur les différentes parties de l'ouvrage, en se rapportant à la norme portugaise E378 et au projet de norme européenne ENV 206 (1995), future norme béton EN 206-1. Sur ces bases, les dosages en ciment (CEM I ou CEM IV PM ES) ont tous été supérieurs

ou égaux à 400 kg/m³ et les rapports Eau efficace / Liant équivalent, compris entre 0,33 et 0,42, inférieurs à ceux préconisés par les deux normes. En parallèle, plusieurs indicateurs de durabilité ont été retenus :

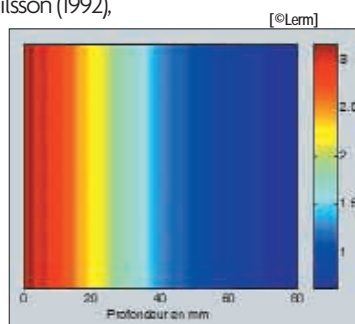
- **Indicateurs généraux** : perméabilité à l'oxygène (Afrema, 1997), coefficient de diffusion des ions chlore par un essai de migration sous champs électrique selon la méthode Tang et Nilsson (1992),

- **Indicateurs secondaires** : résistance à la pénétration des ions chlore suivant la procédure AASHTO T277-3 (1993), porosité accessible à l'eau (Afrema, 1997), profondeur de carbonatation accélérée (Afrema, 1997).

Dans un premier temps, le contrôle du respect des seuils fixés pour chacun des indicateurs de durabilité a été effectué sur des bétons de laboratoire au cours des études préalables des différentes formulations de béton, puis sur les bétons prélevés en centrale avant le coulage. Ces mesures ont ensuite été validées par des tests sur des carottes extraites de l'ouvrage lui-même après la mise en œuvre de la procédure de cure du béton définie par le chantier.

Ces contrôles ont été réalisés à des échéances de 28 et 90 j dans le cas des bétons de laboratoire et des bétons de centrale. Et à des échéances allant de 6 à 30 mois pour les bétons carottés sur l'ouvrage. Pour ces derniers, ils ont été complétés par des mesures de profils de concentration en chlorures, dont la connaissance a permis de valider les calculs réalisés avec un modèle prédictif de pénétration des chlorures développé au Lerm. Les simulations numériques réalisées en intégrant les mesures de profondeur de pénétration des chlorures et les valeurs des coefficients de diffusion déterminées sur l'ensemble des bétons à différentes

Sous-face et alignement des piles d'appui du viaduc central.

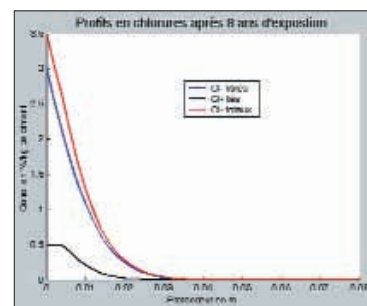


Simulation numérique de l'état de pénétration des chlorures, après 120 ans d'exposition

Sous-face du tablier du pont principal à haubans.



©Lerm



Profils chlorures après 8 ans d'exposition.

©Lerm

Le concept de "Béton à haute durabilité"

Les résultats obtenus après dix ans de suivi du pont Vasco de Gama, au Portugal, montrent que la démarche "durabilité" mise en place sur l'ouvrage est pertinente et qu'elle permet d'espérer, avec un taux de risque satisfaisant, que les objectifs de durabilité fixés pour le matériau seront atteints. Les recalages mineurs réalisés sur le modèle prédictif ont permis en parallèle de constituer une base de données utile, non seulement pour l'amélioration des connaissances en matière de durabilité des bétons armés en ambiance marine, mais aussi pour le développement de nouvelles approches tenant compte d'exigences de plus en plus grandes en ce qui concerne la durée de vie des ouvrages.

Une des conclusions importantes de cette démarche est la synergie fructueuse entre les différents intervenants du projet (gestionnaire – constructeur – laboratoires). Celle-ci a permis, dès la phase de conception et pendant la phase de réalisation, de faire le choix de solutions rationnelles et adaptées prenant en compte les résultats les plus récents de la recherche en matière de durabilité des bétons, en particulier en matière de prédiction de la pénétration des ions chlore. Cette démarche constitue un exemple de collaboration et de transfert technologique entre un laboratoire et une grande entreprise. Et une approche unique des problèmes relatifs aux matériaux faisant appel à un concept nouveau de "Béton à haute durabilité" dont l'usage devrait se systématiser dans l'avenir. Plus près de nous, une démarche similaire a été suivie dans le cadre de la construction du pont de Rion-Antirion, en Grèce.

les caractéristiques des bétons de différentes parties de l'ouvrage, et de mesurer in situ les premiers effets de leur exposition au milieu marin agressif. Les principaux résultats obtenus ont confirmé la similitude entre les caractéristiques des bétons confectionnés en laboratoire et celles des bétons extraits de l'ouvrage. A la faveur de l'avancement de la réaction pouzzolanique, les bétons de l'ouvrage présentent même, après quelques dizaines de mois de mûrissement, des valeurs d'indicateurs de durabilité très inférieures aux différents seuils fixés dans le cadre du projet.

Ces mesures ont permis de conduire les premières simulations numériques sur les bétons d'ouvrage et de valider le

Repères

Maître d'ouvrage : Lusoponte (pilote par Campenon Bernard SGE [Vinci], et Trafalgar House)

Maîtrise d'œuvre : Novaponte (pilote par Campenon Bernard SGE [Vinci])

BET Structure : Proponte, Coba, Trafalgar, EEG

Construit entre février 1995 et mars 1998

Montant du marché : 897 M€

Bétons : 730 000 m³

Armatures : 100 000 t

Main d'œuvre : 3 300 personnes

modèle prédictif utilisé en mesurant les premiers profils de concentration en chlorures. Ces simulations ont montré que le critère de durabilité était satisfait avec les caractéristiques des bétons d'ouvrage. A savoir, une teneur en

chlorures inférieure à 0,4 % au droit des armatures, après 120 ans d'exposition à l'environnement marin.

C – Approche suivie depuis 2001

L'approche s'est ensuite axée sur le suivi de zones caractéristiques et représentatives de l'ouvrage dans son ensemble, en considérant aussi bien les différentes parties du pont que les conditions d'exposition des bétons. Au total, soixante-quatorze zones ont fait l'objet, en 2001, d'un état initial visant à mesurer l'enrobage des armatures, à caractériser les bétons, à mesurer la pénétration des chlorures, à mesurer l'activité et la vitesse de corrosion...

Depuis cet état initial, plusieurs campagnes de mesures ont été effectuées, permettant de disposer d'une base de données très riche, aussi bien par le nombre et la nature des mesures effectuées, que par leur



(© Lerm)

évolution dans le temps. Cette base de données et le modèle numérique constituent un outil de prévision fiable sur lequel le maître d'ouvrage peut s'appuyer afin de prendre, le cas échéant, des mesures préventives dans des zones pour lesquelles un risque de vieillissement accéléré est possible. En parallèle du suivi global de ces zones planifié sur plusieurs années,

Pont Vasco da Gama depuis le haut du pylône ouest du pont principal à haubans.

zones de défauts, afin d'y mettre en œuvre des mesures préventives permettant de garantir le critère de durabilité du projet.

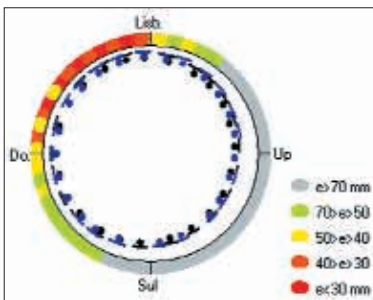
D – Adaptation des programmes de suivi à long terme

Les informations collectées depuis maintenant dix ans sur les bétons ont permis d'adapter les programmes de suivi de la durabilité et de réaliser une projection jusqu'en 2013. Les études prévues pour l'avenir par le gestionnaire, en accord et en complète concertation avec les correspondants techniques (Lerm et bureau d'études A2P), consistent à poursuivre la démarche générale de suivi des soixante quatorze zones. Et à réaliser, au cas par cas, des études ciblées ponctuelles sur certaines parties plus sensibles de l'ouvrage.

Ce retour d'expérience unique a d'ores et déjà permis au gestionnaire de définir les principes généraux de suivi de la durabilité de l'ouvrage jusqu'à la fin de la période de concession, après laquelle il sera géré et administré par l'état portugais.

Christophe Carde et Gilles Martinet, directeur technique et directeur général du Laboratoire d'études et de recherches sur les matériaux (Lerm)

Résultat de mesures d'enrobage d'une colonne du Viaduc Sud (vue en coupe) montrant un excentrement de la cage d'armatures.



(© Lerm)

des études plus ponctuelles sont menées pour répondre à d'éventuelles interrogations du gestionnaire. Telle une campagne de vérification systématique de l'enrobage des colonnes du viaduc sud, réalisée fin 2007, par auscultation radar. Au total, près de trois cents colonnes ont été auscultées, le résultat permettant au gestionnaire de cibler d'éventuelles

Mise en œuvre d'un revêtement de protection à titre préventif sur une colonne du viaduc sud.



(© Lerm)

Pensées et remerciements

La démarche "durabilité" du pont Vasco da Gama est un travail d'équipe dans lequel différents ingénieurs du Lerm et de Vinci Construction Grands Projets sont beaucoup impliqués. Il faut y associer Michel Salomon, aujourd'hui décédé, Hugues Hornain, Olivier Houdusse, Jean-Luc Garciaz, Alex Reynaud, Pierre Monachon, Marc Wastiaux et Lionel Linger. Par ailleurs, cette fructueuse collaboration n'aurait pu avoir lieu sans la rigueur et l'intérêt de Teresa Mendes, de Gestiponte, aujourd'hui gestionnaire de l'ouvrage.