

PONT VASCO DE GAMA À LISBONNE BILAN DE DIX ANS DE DÉMARCHE DURABILITÉ

Gilles MARTINET

Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux (LERM)

Lionel LINGER

Vinci Construction Grands Projets

1. INTRODUCTION

Cet article, qui traite de la démarche Durabilité adoptée depuis le début du projet de construction du Pont Vasco de Gama à Lisbonne, est le fruit d'une étroite collaboration entre un Concepteur/Constructeur (Vinci Construction Grands Projets) et un laboratoire spécialisé dans l'étude des matériaux de construction (LERM).

Il est tout d'abord nécessaire de préciser dans ce préambule que le travail présenté ici concerne seulement la problématique du matériau béton ; les aspects relatifs à la structure proprement dite, (solicitations mécaniques liées au fonctionnement de l'ouvrage, résistance aux vents, risques sismiques) ayant été pris en compte par les bureaux d'études.

Dans une première partie de cet article, le cheminement de la démarche choisie pour assurer la durabilité des bétons retenus pour la construction de l'ouvrage, ainsi que son évolution au fur et à mesure de l'acquisition des données et de l'évolution des connaissances sont exposés. Les contrôles réalisés durant la construction puis les études réalisées depuis 1998 sur l'ouvrage lui-même ainsi que les modèles de prédiction de la durée de vie utilisés, sont également présentés.

Une seconde partie est consacrée à la description des actions préventives prises sur certaines parties d'ouvrages (zones d'hétérogénéités texturales ou présentant ponctuellement un enrobage des armatures insuffisant) jugées les plus sensibles en terme de durabilité au cours des investigations successives, permettant d'anticiper des problèmes éventuels susceptibles d'intervenir au cours des 120 années de garantie.

La dernière partie de cet exposé décrit l'apport d'un logiciel développé spécifiquement pour le Pont Vasco de Gama dans le suivi de la durabilité du béton de l'ouvrage par le gestionnaire, et présente succinctement l'adaptation des programmes de suivi jusqu'en 2013 puis 2043.

2. PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET DE SON ENVIRONNEMENT

2.1 L'ouvrage

Le pont Vasco de Gama à Lisbonne, réalisé pour l'Exposition Universelle de 1998, constitue un des ouvrages d'art majeurs de la fin du siècle dernier. Son édification a eu pour but de résoudre les problèmes de trafic routier sur l'ancien " Pont du 25 avril " mais également de développer l'axe autoroutier nord – sud du Portugal.

Construit entre 1995 et 1998, il possède une longueur totale de 17,2 kilomètres dont 9 km au-dessus de l'estuaire du Tage (fig. 1). Il se compose de huit ouvrages d'architectures bien distinctes [Bernard, 1998]. Ces ouvrages, du nord au sud, sont les suivants :

- accès nord : deux échangeurs reliant le pont au réseau autoroutier constitués de deux viaducs, de six passages inférieurs et de quatre passages supérieurs ;
- viaduc nord : tablier de largeur variable en dalle nervurée, réalisé en place sur étaieement (longueur 488 mètres, onze alignements de colonnes sur pieux) ;
- viaduc de l'Exposition : tablier constitué de deux poutres caissons construites en encorbellement par assemblage de voussoirs préfabriqués (longueur 672 mètres, treize alignements de colonnes sur pieux) ;
- pont principal (fig. 2) : tablier haubané, à poutres latérales en béton précontraint et entretoises métalliques construit en place (longueur 829 mètres, deux pylônes, six alignements de colonnes sur pieux réunis par une fondation) ;
- viaduc central : tablier constitué de deux poutres caissons, préfabriquées par travées entières (longueur 6531 mètres, quatre-vingt et un alignements de deux colonnes fondées sur pieux battus) ;
- viaduc sud : tablier en dalle nervurée de largeur constante réalisé en place par travées entières (longueur 3825 mètres, quatre vingt quatre alignements de quatre colonnes fondées sur pieux) ;
- accès sud : plate-forme autoroutière de 3900 mètres de longueur et échangeur comprenant un passage inférieur et trois passages supérieurs.

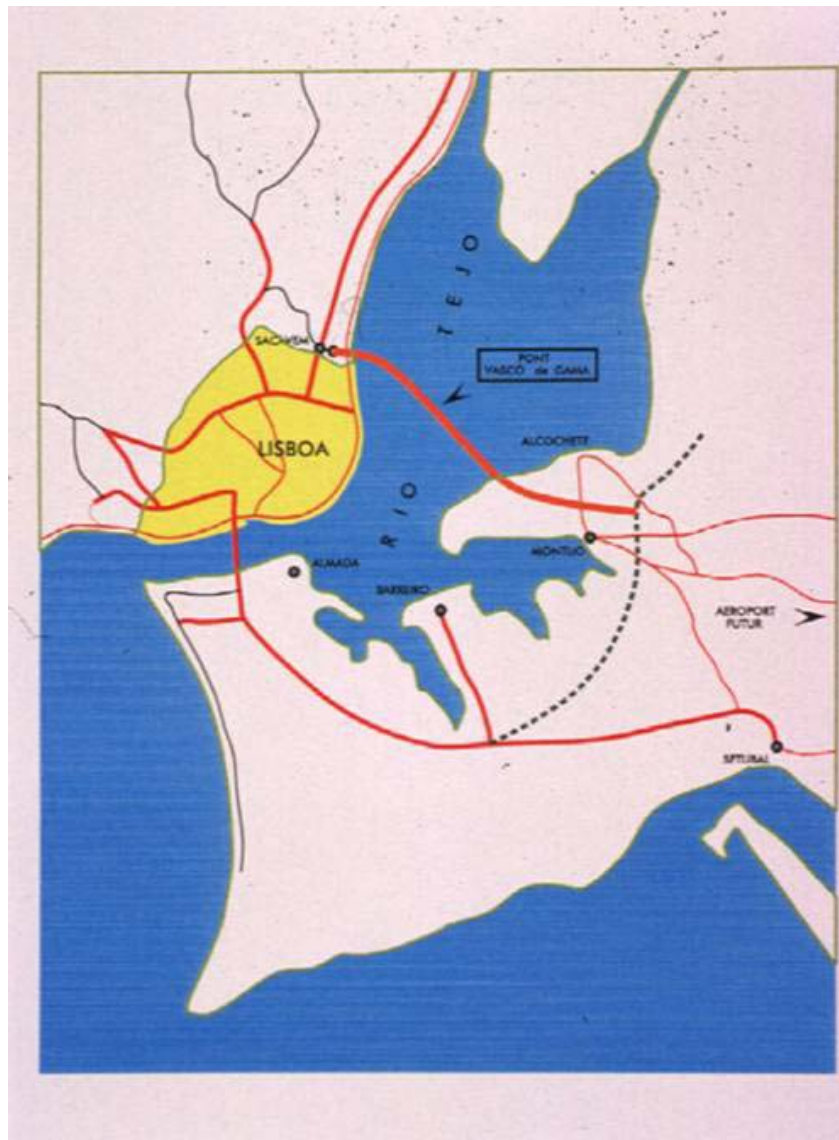


Figure 1 : Schéma général de situation de l'ouvrage



Figure 2 : Vue du pont principal à haubans

2.2 Les environnements

L'ouvrage est situé dans le contexte climatique suivant [Monachon, 1998] :

- climat local tempéré,
- températures moyennes de l'ordre de 10°C en hiver et de 22°C en été,
- humidité relative élevée, comprise entre 70% et 90%,
- fort ensoleillement de 14 jours à 25 jours par mois,
- vents généralement faibles avec des vitesses variant entre 13 et 21 km/h,
- précipitations d'environ 700 mm par an.

Ainsi, l'ouvrage, dans sa partie surplombant le Tage, est situé en milieu considéré comme marin. En effet, l'eau de l'estuaire est fortement chargée en sels : elle est formée d'environ 25% d'eau douce et de 85% d'eau de mer de composition identique à celle de l'Atlantique.

Cet environnement, suivant la définition des critères de durabilité proposés préalablement au chantier, a été découpé en six classes d'exposition qui sont fonction de la localisation des différentes parties de l'ouvrage et des risques auxquels celles-ci sont soumises : béton enterré, béton immergé, béton en zone de marnage et d'aspersion, béton en zone d'embruns, béton en élévation maritime et béton en élévation hors milieu maritime [Hornain et al. 1998].

2.3 Les risques

Les bétons sont soumis principalement à deux catégories de risques dont l'intensité dépend des conditions locales d'exposition : risques de corrosion des armatures par action des chlorures ou du gaz carbonique de l'atmosphère d'une part, risques d'attaque chimique du béton par l'eau de mer d'autre part.

Les mécanismes d'altération mis en jeu sont rappelés brièvement :

- Les aciers sont généralement protégés par l'alcalinité élevée de la solution interstitielle du béton dont le pH peut varier entre environ 13,7 et 12,7 respectivement pour les CEM I et les CEM III [Hornain, 1998]. Toutefois la pénétration du CO₂ atmosphérique, qui réduit la réserve alcaline du béton par transformation partielle des hydrates calciques (Ca(OH)₂ et C-S-H) en carbonates de

calcium CaCO_3 , peut provoquer une diminution de pH suffisante pour détruire le film de passivation qui protège l'acier. La pénétration du CO_2 dans le béton dépend d'un certain nombre de facteurs tels que l'état hydrique du béton, le dosage et la nature du ciment, la microstructure du matériau, la perméabilité, la diffusivité, l'environnement climatique et la cure.

- L'apport de chlorures est susceptible également de conduire à la destruction du film protecteur et à la corrosion des aciers. Les paramètres déterminants sont les mêmes que ceux cités ci-dessus auxquels il faut ajouter une concentration critique en chlorures au niveau des armatures. Cette concentration critique qui correspond au seuil d'initiation de la corrosion peut être exprimée sous forme d'un rapport Cl^-/OH^- ou d'une concentration en Cl^- dont les valeurs dépendent de la microstructure aux interfaces acier-béton, des propriétés du béton et de l'environnement extérieur. Il y a lieu également de tenir compte de la capacité de liaison des chlorures en particulier sous forme de chloroaluminates de calcium, seuls les chlorures libres étant actifs dans le processus de corrosion.

A l'époque de la construction, les classes d'agressivité retenues en fonction des risques décrits ci-dessus sont celles de la norme portugaise E 378 et du projet de norme européenne ENV 206 (1995), rappelées dans les tableaux 1 et 2 ci-après. Celles qui ont été prises en comptes pour les différentes zones de l'ouvrage sont regroupées dans le tableau 3. Par sécurité, des choix plus pessimistes que ceux prévus par les normes ont été faits.

Tableau 1 : Classes d'exposition relatives aux risques de corrosion des armatures par les chlorures

Suivant E 378	Suivant ENV 206	ENVIRONNEMENT
ECI 1	XS 1	Zones côtières ou proches des côtes
ECI 2	XS 2	Zones immergées
ECI 3	XS 3	Zones de marnages et d'aspersion

Tableau 2 : Classes d'agressivité relatives aux risques d'agression chimique par l'eau de mer

Suivant E 378	Suivant ENV 206	ENVIRONNEMENT
EQ 1	XA 1	Faiblement agressif
EQ 2	XA 2	Moyennement agressif
EQ 3	XA 3	Fortement agressif

Tableau 3 : Classes d'agressivité choisies en fonction de la localisation des bétons

Béton enterré	-	< EQ 1
Béton immergé	ECI 2	EQ 2
Zones de marnage et d'aspersion	ECI 3	EQ 2
Zones maritimes en élévation (embruns)	ECI 3	EQ 2
Zones terrestres en élévation	ECI 1	-

3. LA DÉMARCHE DURABILITÉ ADOPTÉE

3.1 La durée de vie

La spécification principale et particulière à cet ouvrage qui figurait au cahier des charges est une exigence de durée de vie de 120 ans pour le béton de structure dans le but de garantir un faible coût d'entretien et de réparation [Monachon, 1997]. La durée de vie a été définie ici comme le temps nécessaire à l'initiation de la corrosion qui correspond lui-même à un seuil de concentration en chlorures au niveau des armatures. Ce seuil a été fixé à 0,4 % pondéral de Cl^- par rapport au ciment.

Compte tenu des conditions environnementales, les recommandations concernant l'enrobage des aciers étaient les suivantes :

- 5 cm pour les bétons situés en zones d'embruns et d'aspersion,
- 7 cm pour les bétons situés en zone de marnage.

Dans le cahier des charges figuraient en parallèle, des spécifications pour les résistances mécaniques :

- un C32/40 pour les fondations et appuis des ouvrages terrestres,
- un C35/45 pour les appuis des ouvrages maritimes et les tabliers du viaduc central et du viaduc sud,
- un C40/50 pour le tablier du pont à haubans.

3.2 Le choix des constituants

3.2.1 Les ciments

Deux types de ciments adaptés aux différentes parties de l'ouvrage et aux classes d'exposition correspondantes ont été sélectionnés :

- ciment CEM I 42,5 prise mer pour les bétons situés en zone aérienne,
- ciment CEM IV 32,5 prise mer contenant 22 % de cendres volantes silico-alumineuses, pour les bétons situés en zone marine.

3.2.2 Les granulats

Les gravillons sont des calcaires durs concassés issus de roches massives. Le sable est un mélange de 50% des mêmes calcaires et de 50% de sable alluvionnaire silico-calcaire. Ces granulats ont été contrôlés selon les normes en vigueur et ont fait l'objet d'une caractérisation vis-à-vis des risques d'alcali-réaction (LCPC, 1994). Des examens pétrographiques visant à rechercher et quantifier les espèces minérales réactives vis-à-vis des alcalins, accompagnés de tests de stabilité dimensionnelle en milieu alcalin ont été réalisés. Ces études ont classé ces granulats comme non réactifs vis à vis des alcali-réactions, ce qui a permis de s'affranchir de ce risque.

3.2.3 Les formules de bétons

La formulation des bétons est en conformité avec la norme portugaise E 378 et le projet de norme européenne ENV 206 (1995). Les dosages en ciment utilisés sont tous supérieurs ou égaux à 400 kg/m³ et dans un souci de sécurité, les rapports eau/ciment effectifs sont généralement inférieurs à ceux qui sont préconisés par les deux normes : ils sont compris entre 0,33 et 0,42 suivant la classe d'exposition de la partie d'ouvrage concernée.

Les dosages en ciment ainsi que les rapports E/C pour chaque classe d'environnement considérée sont récapitulés dans le tableau 4.

3.3 Les indicateurs de durabilité

Les ciments utilisés contribuent fortement à la durabilité des bétons mis en oeuvre. En effet, le choix d'un ciment prise mer (CEM I et CEM IV) permet de se prémunir, de par leur faible teneur en C₃A, des combinaisons éventuelles avec les sulfates de l'eau de mer et donc de la néoformation d'ettringite due à une attaque sulfatique. De plus, dans les zones réellement en contact avec l'eau du Tage, la présence de cendres volantes silico-alumineuses permet d'une part, la réduction de production de Ca(OH)₂, composé vulnérable vis-à-vis de la lixiviation, et d'autre part, permet une densification progressive de la microstructure de la matrice cimentaire par réaction différée de ces additions pouzzolaniques.

Pour atteindre et quantifier l'objectif de durée de vie requis, des indicateurs de durabilité ont été sélectionnés :

- Indicateurs généraux : perméabilité à l'oxygène (AFREM, 1997), coefficient de diffusion des ions chlore par un essai de migration sous champ électrique selon la méthode Tang et Nilsson (1992).
- Indicateurs secondaires : résistance à la pénétration des ions chlore suivant la procédure AASHTO T277-93 (1993), porosité accessible à l'eau (AFREM, 1997), profondeur de carbonatation d'éprouvettes conservées en atmosphère de CO₂ (50 % en volume), à 20°C et 65 % d'humidité relative (AFREM, 1997).

Les seuils retenus pour ces 5 indicateurs sont indiqués dans le tableau 4.

Tableau 4 : Dosages en ciment (type IV ou type I), rapports E/C et seuils de durabilité retenus

Classe d'exposition	Dosage en ciment (kg/m ³)	Rapport E/C	Perméabilité m ²	AASHTO 28 jours en Coulomb	AASHTO 6 mois en Coulomb	Diffusivité m ² .s ⁻¹	Carbonatation mm
Enterré	≥ 400 (IV)	0,42	≤ 10 ⁻¹⁷	< 5000	-	-	≤ 10
Immergé	≥ 430 (IV)	0,35	-	-	-	-	-
Marnage	≥ 430 (IV)	0,33	≤ 10 ⁻¹⁷	< 5000	< 1500	≤ 10 ⁻¹²	≤ 10
Embruns	≥ 430 (IV)	0,33	≤ 10 ⁻¹⁷	< 5000	< 1500	≤ 10 ⁻¹²	≤ 10
Aérien mer	≥ 400 (I)	0,40	≤ 10 ⁻¹⁷	< 5000	-	-	≤ 10
Terrestre	≥ 400 (I)	0,42	≤ 10 ⁻¹⁷	< 5000	-	-	≤ 10

Le contrôle du respect des seuils définis pour chacun des indicateurs de durabilité a d'abord été réalisé sur des bétons de laboratoire lors des études préalables des différentes formulations, 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 mise en œuvre de la procédure de cure du béton définie par le chantier.

Les mesures ont été réalisées à des échéances de 28 jours et 90 jours dans le cas des bétons de laboratoire et des bétons de centrale, et à des échéances allant de 6 mois à 30 mois pour les bétons carottés dans l'ouvrage. Pour ces derniers, elles ont été complétées par des déterminations chimiques des profils de concentration en chlorures libres et en chlorures liés dont l'exploitation a permis de valider les calculs effectués à l'aide d'un modèle prédictif de pénétration des chlorures. Par ailleurs, des examens microstructuraux des bétons et des mesures de potentiel sur site ont très utilement complété l'ensemble des mesures physico-chimiques.

3.4 La modélisation : un outil pour la prédiction de durée de vie

L'ensemble de ces données a permis d'alimenter un modèle de prédiction de durée de vie déjà utilisé au LERM [Houdusse et al. 1998 ; Houdusse et al. 2000]. 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 échéances ont non seulement pour but de vérifier que l'objectif de durabilité est effectivement atteint mais également de valider la pertinence du modèle utilisé en comparant les résultats des simulations numériques avec ceux obtenus en laboratoire sur des prélèvements in situ.

Une des hypothèses principales émise, dans notre cas, correspond à une estimation logique de l'évolution du coefficient de diffusion D_x dans le temps. Cette évolution qui se produit essentiellement entre 1 mois et 6 mois en raison de la réaction différée des cendres volantes, a été confirmée par les résultats d'essais en laboratoire (tab. 5). Pour les échéances supérieures à 36 mois, les simulations ont été réalisées en faisant l'hypothèse de différents coefficients de diffusion constants entre 36 mois et 120 ans.

Tableau 5 : Coefficients de diffusion aux différents âges

Coefficient de diffusion				
	Avant 28 jours	De 28 jours à 6 mois	De 6 mois à 36 mois	Supérieur à 36 mois
Estimation pour les différentes formulations	$D_1 = 6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$D_2 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$D_3 = 0,7 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$D_4 = 0,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

Il a ainsi et par exemple été démontré lors des études que la progression la plus importante des chlorures s'était essentiellement déroulée dans les premières semaines ayant suivi la mise en place des bétons. Par la suite, en raison de l'évolution des caractéristiques microstructurales des bétons, la progression devient très faible.

4. LE PROGRAMME DE SUIVI DE LA DURABILITÉ DU BÉTON DE L'OUVRAGE

4.1 Les mesures réalisées initialement et lors de la construction de l'ouvrage

Les résultats obtenus sur plus de trente formulations testées en laboratoire (tableau 6) ont indiqué que :

- toutes les valeurs de perméabilité mesurées ont satisfait le seuil maximum fixé à 10^{-17} m^2 à 28 jours,
- les coefficients de diffusion mesurés suivant la méthode Tang et Nilsson sont tous proches de $10^{-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ à 28 jours, malgré le fait qu'à cette échéance l'action pouzzolanique des cendres volantes soit faible,
- sauf dans le cas des formulations à base de ciment CEM I, le critère AASHTO de résistance à la pénétration des ions chlorés est satisfait. Les écarts entre les ciments CEM IV et CEM I sont dus à des différences de microstructure mais aussi à des différences de concentrations ioniques dans la solution interstitielle des bétons, plus riche en OH^- et de résistivité plus faible dans le cas des ciments CEM I,
- les valeurs de porosité correspondent à celles de bétons relativement compacts ; compacité confirmée par l'obtention de résistances mécaniques (sur cubes) supérieures à 60 MPa à 28 jours et pouvant, dans certains cas, dépasser 100 MPa à un an,
- les essais de carbonatation accélérée en laboratoire à partir de bétons âgés de 28 jours ont montré que la profondeur de carbonatation était inférieure à 1 mm.

Tableau 6 : Quelques résultats représentatifs des différents contrôles

Série	Echéance	Perméabilité en 10^{-17} m^2	Porosité en %	AASHTO en Coulombs	Coefficient de diffusion $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Ciment CEM IV					
Haut des caissons du viaduc central	28 j	0,4	13,0	2800	1,2
	90 j	-	-	1500	1,0
Parois des caissons du viaduc central	28 j	0,5	10,9	2800	1,3
	90 j	-	-	900	0,8
Ciment CEM I					
Tablier du pont principal	28 j	0,9	12,5	6400	3,2

Néanmoins, de manière ponctuelle, quelques bétons ont donné des résultats hors des limites de conformité. Bien que la plupart du temps, ces résultats ne concernaient que des bétons situés en zone faiblement agressive, les formulations correspondantes ont fait l'objet soit de remplacement par des formulations de caractéristiques confirmées, soit d'une adaptation par modification du rapport E/C par le biais de l'adjuvantation.

Il a été observé que les bétons préparés en laboratoire suivant une procédure plus stricte avaient des caractéristiques physico-chimiques globalement plus homogènes que celles des bétons prélevés lors du coulage sur chantier.

4.2 De 1998 à 2001 : les premières études sur l'ouvrage

Les résultats de dépouillement de l'étude de bétons prélevés sur l'ouvrage, pendant le déroulement du chantier [Martinet, 1999] ont confirmé les tendances mesurées lors des études en laboratoire et sur les bétons de contrôle sur chantier :

- la perméabilité du béton d'ouvrage atteint des valeurs de l'ordre de 10^{-19} m^2 , limite de détection avec le dispositif CEMBUREAU,
- les valeurs du coefficient de diffusion suivant la méthode de Tang et Nilsson sont souvent très inférieures au seuil prescrit confirmant ainsi la densification importante de la microstructure des bétons à base de cendres volantes au-delà de 28 jours.

Les différentes campagnes d'investigations, réalisées annuellement pendant cette période, ont inclus une phase d'inspection et de mesures sur site. Les principaux résultats obtenus sont détaillés ci-après :

- aucun désordre majeur directement en relation avec une influence du milieu marin n'a été relevé. En effet, les parements examinés présentent, pour la quasi-totalité de l'ouvrage, un aspect sain, exempt d'altérations macroscopiques. De plus, les carottes extraites des parties de l'ouvrage directement exposées à l'eau de mer présentent une texture très cohérente avec une porosité très faible,
- les mesures de potentiel d'électrodes montrent, pour toutes les zones auscultées, que les risques de corrosion active étaient quasi-nuls. Le suivi régulier des mêmes zones lors des futures campagnes constituera un élément de diagnostic très important,
- les porosités mesurées sont indicatives d'une bonne compacité. A titre d'exemple, les bétons du viaduc central possèdent des porosités globalement comprises entre 9 et 11 % ; celles des bétons des pieux colonnes du viaduc sud sont entre 13 et 14 %,
- les perméabilités à l'oxygène des bétons testés sont généralement faibles (inférieures à $1 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$) et nettement en deçà du seuil fixé à $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$,
- les coefficients de diffusion mesurés sont également faibles à très faibles. Ils sont inférieurs ou égaux à la limite fixée ($1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) :
 - de l'ordre de $0,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ de pour les bétons du viaduc central,
 - de l'ordre de $1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ pour les bétons du viaduc sud,
- la détermination des profils en chlorures (fig. 3) montre que l'évolution des concentrations en chlorures est faible et confirme qu'une quantité non négligeable de chlorures est fixée par la matrice. La profondeur maximale de pénétration est comprise entre 20 et 25 millimètres,
- la microstructure de l'ensemble des bétons examinés (fig. 4) est globalement saine, compacte et très faiblement microfissurée. Les contacts pâte-granulats sont très étroits et la matrice cimentaire est constituée d'assemblages d'hydrates denses. Les points particuliers à retenir sont :
 - la faible frange d'altération des bétons directement exposés à l'eau du Tage : signes de dissolution et de pollution par les composés de l'eau (Mg, S, Cl, Na) visibles uniquement sur une épaisseur inférieure au millimètre,
 - la forte capacité de fixation des chlorures par la matrice cimentaire des bétons situés en zone de marnage : néoformation de chloro-aluminates dans les deux premiers centimètres.

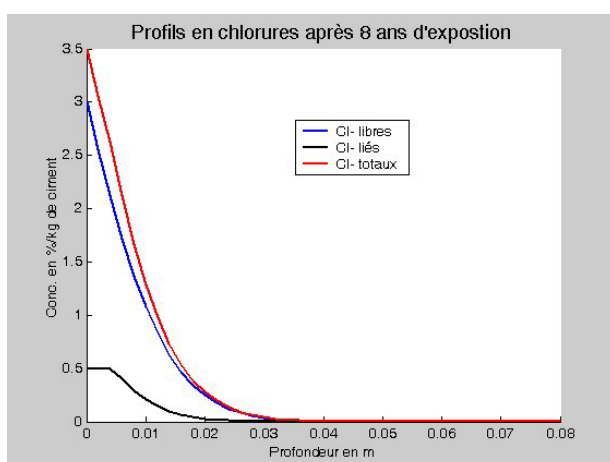


Figure 3 : Exemple de profils en chlorures obtenus après 8 ans d'exposition

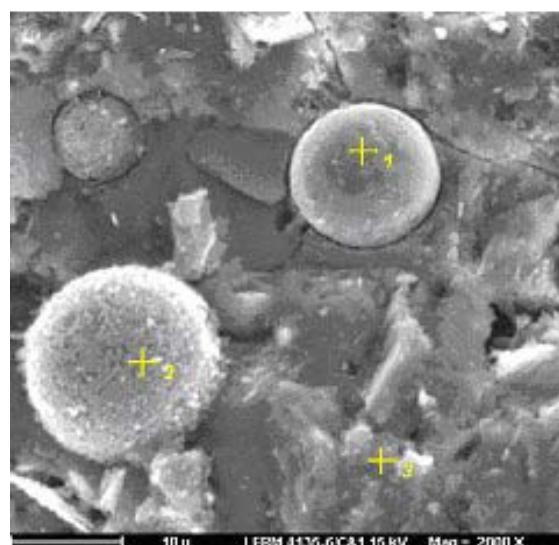


Figure 4 : MEB. Microstructure dense de la matrice contenant des cendres volantes (1,2)

4.3 De 2001 à 2004 : l'orientation vers une approche plus axée sur des analyses localisées sur des parties représentatives de l'ouvrage

A partir de 2001, le bureau d'études portugais A2P spécialiste des travaux sur ouvrages d'art a été intégré à l'équipe de suivi afin d'être en mesure de pouvoir envisager des mesures préventives sur certaines parties d'ouvrage. Ainsi, les études ont été réorientées vers une démarche plus « contrôle sur ouvrage », axée sur 67 zones plurimétriques choisies sur l'ensemble de l'ouvrage et considérées comme caractéristiques et représentatives.

Sur chacune des zones sélectionnées il a été établi un état initial, notamment sur la position des aciers par réflectométrie radar. Des investigations annuelles consistant en des mesures de potentiel et vitesses de corrosion, des mesures de profondeur de carbonatation naturelle et de pénétration des chlorures ont ensuite été réalisées (fig. 5). Ce suivi sur une durée de trois ans correspond à 1500 m² auscultés, plus de 200 mesures non destructives et de profondeur de carbonatation et à environ 1200 dosages en chlorures

A l'issue de la dernière campagne, datant de fin 2004, il ressort globalement de l'ensemble de ces visites et diagnostics :

- un très bon état général de l'ouvrage,
- l'absence d'anomalie importante pour l'ensemble des zones étudiées,
- une évolution peu significative des paramètres mesurés,

Il a cependant été constaté pour environ 15 % de la surface auscultée la présence d'anomalies locales dues à des défauts d'enrobage et à des hétérogénéités de texture :

- l'enrobage des armatures d'un ouvrage de type « Passage Supérieur » situé en zone terrestre est faible et irrégulier (15 à 45 mm), par ailleurs, la profondeur de carbonatation y est relativement élevée (8 à 10 mm),
- la vitesse de corrosion d'une zone du Viaduc Nord semble relativement élevée (25 à 30 µm/an) et devra être confirmée dans le cadre des futures investigations,
- les caissons du Viaduc Central devront faire l'objet d'une attention particulière en raison de vitesses de corrosion notables et d'enrobages faibles,
- six zones du Viaduc Sud devront faire l'objet d'une attention particulière en raison de vitesses de corrosion relativement élevées, d'enrobages faibles et de teneurs en chlorures élevées.

Compte tenu de leur exposition directe à l'eau du Tage, certaines de ces zones localisées sur le Viaduc Central et du Viaduc Sud ont été considérées comme plus « sensibles » et sont examinées régulièrement afin que des traitements préventifs puissent être programmés et réalisés à des périodes choisies en fonction des évolutions éventuellement constatées.

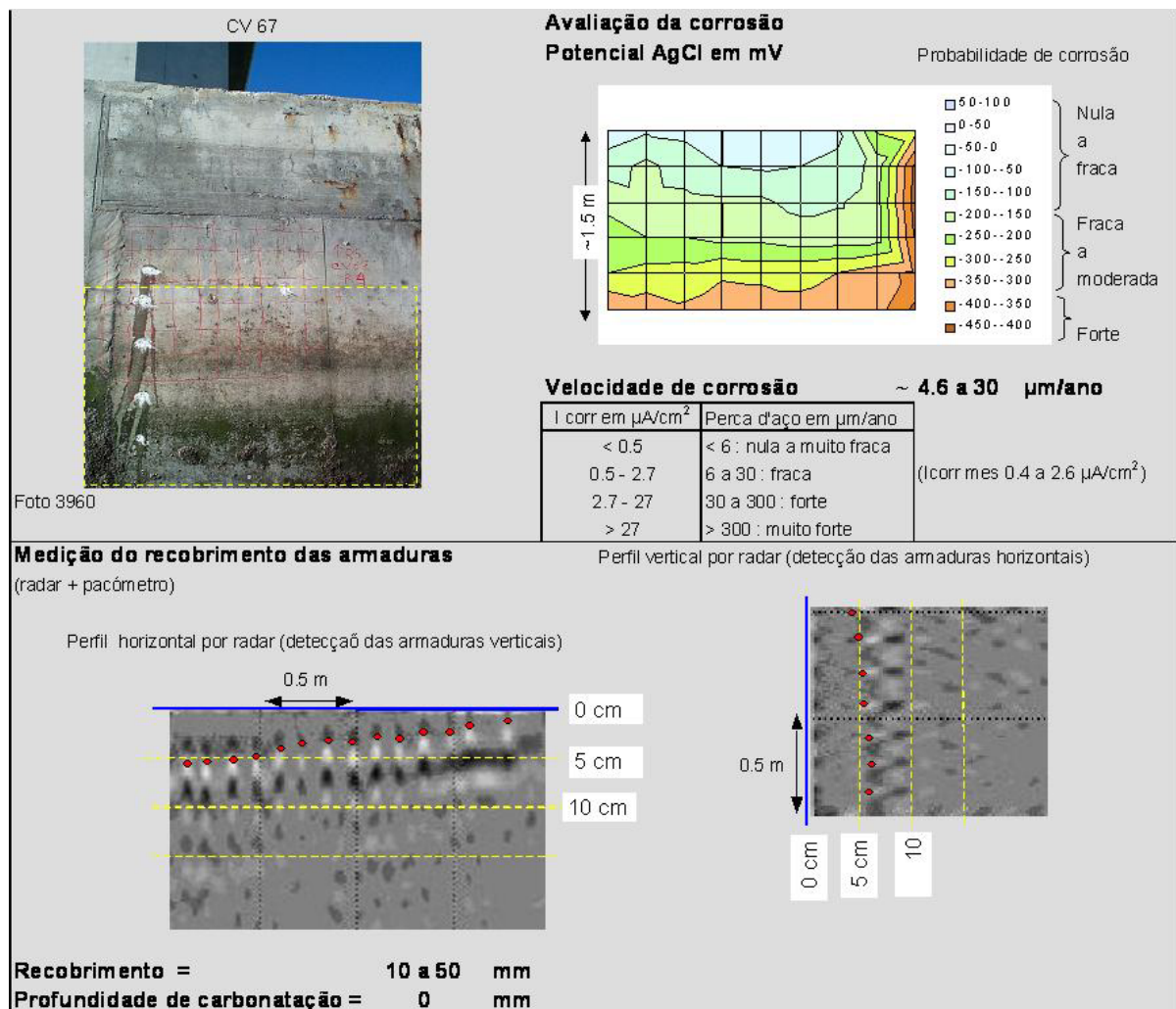


Figure 5 : Exemple de fiche de résultat établie pour chacune des zones auscultées

5. LES ACTIONS PRÉVENTIVES PRISES SUR CERTAINES PARTIES D'OUVRAGE

Cette démarche préventive a également consisté à mener une série d'essais très complets visant à tester différents produits et procédés de réparation envisageables pour assurer la durabilité au niveau de 14 alignements du viaduc sud : produits inhibiteurs, minéralisants ou produits dits bouche pores, béton projeté, chemisage,... (fig. 6).

Ainsi les premières démarches de traitement en laboratoire et sur site ont débuté dès l'année 2000. En plus de maquettes réalisées en laboratoire, certaines colonnes de l'ouvrage ont été traitées et suivies durant un peu plus de trois ans. Ce suivi périodique et rapproché (sept campagnes) a été basé sur des mesures de potentiel d'électrodes et de vitesse de corrosion accompagnées de dosages des chlorures à différentes profondeurs et différentes hauteurs par rapport au niveau du Tage.

Pour ce qui est de la mesure d'activité de la corrosion, les valeurs de potentiel mesurées avant et après application des procédés de traitement sont restées globalement faibles. Par conséquent, aucun important signe de corrosion active n'a été mis en évidence hormis la corrosion de certaines cales dont l'enrobage était inférieur à 1 cm environ. Les variations de potentiels d'électrodes dans le temps, sont comprises entre 0 et - 200 mV environ et peuvent être attribuées aux variations de conditions environnementales (humidité, température). Elles ne semblent pas significatives d'une évolution réelle de la corrosion. De plus, dans les zones où les différences de potentiel sont les plus élevées, les vitesses de corrosion restent dans des fourchettes de valeurs faibles (moins de 5 $\mu\text{m/an}$).

Par ailleurs, l'évolution de la pénétration des chlorures pendant ces trois années de suivi est également très faible. Les teneurs mesurées sont du même ordre de grandeur pour les différentes échéances et sur les différents alignements.

Les simulations numériques (fig. 7), réalisées à partir de ces résultats, ont mis en évidence qu'un traitement par un produit bouche pore ou par un hydrofuge pouvait permettre de ralentir à moyen terme la pénétration des chlorures pour les armatures situées entre 3 et 5 cm. Le modèle indique que la pénétration des chlorures entre 3 et 5 cm est fortement réduite et reste très acceptable jusqu'en 2013 : diminution d'un facteur 3 à 4.

Les colonnes traitées à l'aide de béton projeté et celles protégées par chemise inox sont les seules à montrer une absence complète et indiscutable de corrosion active.

A la suite de cette démarche « grandeur nature » et malgré l'absence d'évolution des signes pathologiques ou des paramètres de corrosion active sur les trois ans de suivi, il a néanmoins été décidé de prendre la précaution de protéger quelques colonnes de ces 14 alignements et de réaliser dès l'année 2004 un chemisage de ces dernières afin de bloquer le processus de pénétration des chlorures dans les zones les plus sensibles situées en zone de marnage.



*Figure 6 : Zone d'étude et de traitements préventifs
Viaduc sud - Exemple d'une colonne « chemisée »*

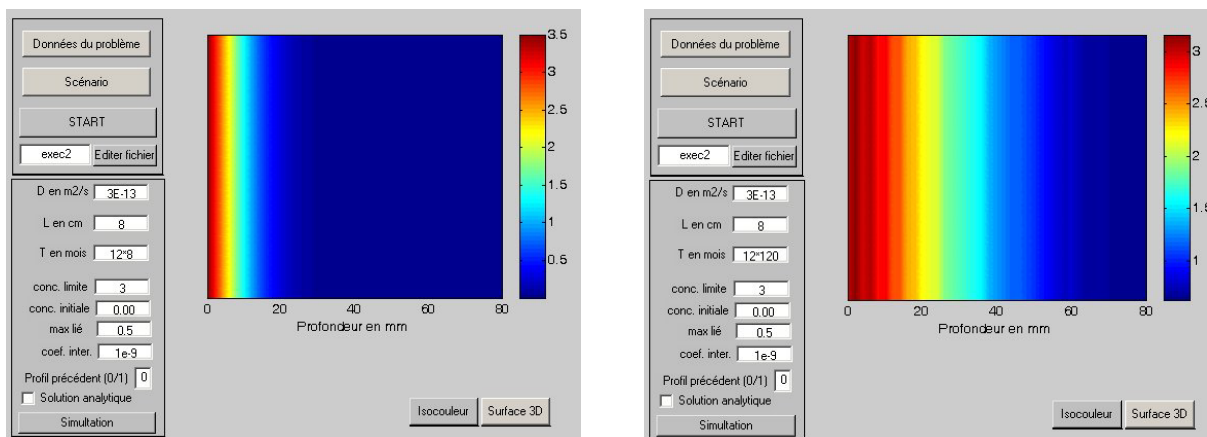


Figure 7 : Simulations de pénétration des chlorures après 8 ans d'exposition (gauche) et à 120 ans

6. UN LOGICIEL DEVENU NÉCESSAIRE

La gestion d'ouvrages tel que le pont VASCO de GAMA, est une tâche complexe et laborieuse. Elle requiert le suivi de plusieurs aspects de l'ouvrage dont notamment le suivi de l'évolution du béton dans le temps qui est un des facteurs déterminants permettant d'assurer la durabilité à long terme de l'ouvrage. Ce suivi est délicat et nécessite de nombreux échantillonnages et expertises, lesquels génèrent une masse très importante d'informations :

- nombreux essais et analyses effectués chaque année sur l'ensemble des différentes structures de l'ouvrage,
- nombreux rapports d'évaluation concernant des aspects allant de la fissuration à l'évaluation esthétique,
- suivi de toutes les interventions effectuées sur l'ouvrage afin de suivre son évolution.

Devant cette grande quantité d'informations très différentes, un logiciel de suivi baptisé GAMABETAO a donc été créé et développé par le LERM spécifiquement pour le pont VASCO de GAMA afin d'aider le Gestionnaire à prendre des décisions éclairées et optimisées du point de vue du budget d'intervention et d'entretien de l'ouvrage, et de permettre ainsi d'anticiper l'entretien et les réparations jugées nécessaires en fonction des caractéristiques des bétons évoluant au cours du temps (fig. 8).

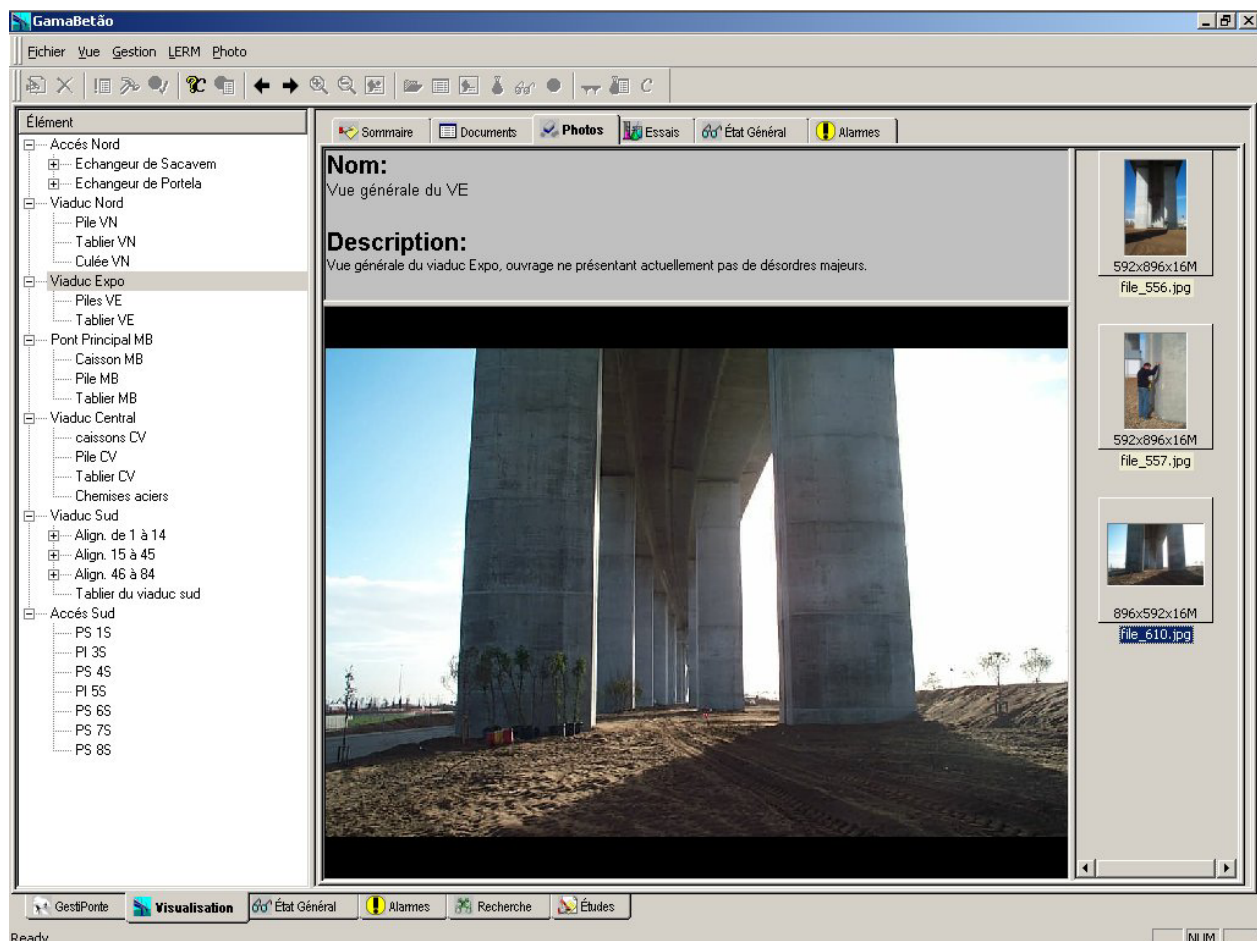


Figure 8 : Exemple de visualisation obtenue grâce au logiciel Gamabetao

Le Gestionnaire de l'ouvrage peut ainsi naviguer efficacement à travers la masse d'informations et se voir ainsi faciliter son suivi de la durabilité des bétons :

- visualisation des différentes caractéristiques des différentes parties de l'ouvrage : types de béton, exposition, durabilité de l'ouvrage et/ou des sous-sections, photos, etc ...,
- accès rapide aux données, présentation schématique des résultats,
- identification rapide des zones nécessitant une intervention préventive ou curative afin de limiter les coûts de réparation. Par ailleurs, les problèmes de natures différentes (fissuration, concrétion, étanchéité, esthétique, etc.) peuvent aussi être suivis à travers tout l'ouvrage,
- recoupement des informations obtenues par l'intermédiaire des différentes études : état actuel d'une section, interventions (réparation préventive ou curative), rapports et essais (sur site et en laboratoire), photos (suivi des photos numériques, année après année et ouvrage par ouvrage), etc ...,
- visualisation de l'évolution des caractéristiques de durabilité du béton dans la structure,
- alerte en fonction de différents critères (réparation, rappel, etc ...),

GAMABETAO permet une grande économie de temps, d'effort mais également d'argent par le fait que le gestionnaire peut optimiser l'entretien de l'ouvrage. Ce logiciel est évolutif et pourrait permettre, dans des versions ultérieures, d'incorporer de nouveaux outils permettant d'effectuer des calculs prédictifs tel que l'évolution de la corrosion des aciers et de la dégradation du béton en fonction du temps.

7. L'ADAPTATION DES PROGRAMMES DE SUIVI À LONG TERME

Les informations collectées depuis 10 ans sur les bétons utilisés pour la construction de cet ouvrage exceptionnel ont permis d'adapter régulièrement les programmes de suivi de la durabilité depuis 1996 et permis leur projection précise jusqu'en 2013.

Les études prévues pour l'avenir par le gestionnaire en accord et en concertation avec ses correspondants techniques (LERM et bureau d'études A2P) consistent en la poursuite de la démarche générale ainsi qu'à des investigations de diagnostic, soit de manière plus espacée dans le temps, soit en « zoomant » sur les zones comme étant identifiées comme plus sensibles

- poursuite de la démarche de suivi des 67 zones tous les 4 ans auxquelles vont s'ajouter 7 nouvelles zones localisées lors des différentes visites et considérées comme importantes (viaduc central et viaduc sud). En 2005 et 2009, seules 27 de ces 74 zones feront l'objet des mesures et analyses habituelles, à savoir, potentiel et vitesse de corrosion, profondeurs de carbonatation et de pénétration des chlorures. En plus des examens microstructuraux seront repris afin de réévaluer l'état de conservation des bétons exposés en zone de marnage et en zone d'aspersion. En parallèle sur ces mêmes zones, de nouvelles mesures de coefficient de diffusion seront réalisées pour vérifier l'évolution positive de celui-ci dans le temps. Enfin en 2013, une campagne exhaustive telle que celle réalisée en 2003 sera effectuée ;
- poursuite des études particulières en cours : suivi des caissons et des chemises aciers du viaduc central. Ces études visent respectivement à contrôler de manière exhaustive les enrobages des caissons et à mesurer tous les deux ans l'avancement de la corrosion des aciers des pieux en zone immergée. Ces investigations sont toutes les deux basées sur des mesures non destructives : par réflectométrie radar pour l'une, par mesures ultrasoniques pour l'autre ;
- étude la plus exhaustive possible de l'évolution du viaduc central et notamment du viaduc sud et ce surtout dans les zones des salines (marais salins) jusqu'ici insuffisamment auscultée et pourtant en zone très exposée aux agents agressifs : chlorures et sulfates ;
- suivi particulier de certaines zones ayant présenté des fissurations précoces pour le viaduc nord et pour les caissons du pont principal.

Ce retour d'expérience accumulé a donc permis d'établir les programmes sur le thème de la durabilité par le gestionnaire de l'ouvrage jusqu'en 2013. Cette nouvelle période de suivi d'une période de 10 ans va

permettre en parallèle de définir les prochains principes de poursuite de cette démarche qui est déjà programmée dans le temps ; ce sera de 2013 à 2043 et les nouveaux résultats qui seront obtenus constitueront la base pour l'élaboration de cette future troisième phase de suivi.

8. CONCLUSIONS ET RÉFLEXIONS

Il ressort des éléments rassemblés dans ce présent article plusieurs constats importants :

- Un premier constat est relatif à la bonne corrélation des résultats obtenus in situ et par ceux déterminés au moyen du modèle numérique prédictif. Les simulations réalisées sur le modèle ont permis de confirmer la pertinence des matériaux, des formulations de béton, et des épaisseurs d'enrobage retenues par rapport à l'exigence de durée de vie de 120 ans escomptée. En effet, les résultats obtenus après 10 ans d'investigations montrent que la démarche durabilité adoptée 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 ont permis en parallèle de constituer une base de données extrêmement utile d'une part pour l'amélioration des connaissances en matière de durabilité des bétons armés en ambiance marine, mais d'autre part 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.
- Un suivi ciblé de l'ouvrage a permis au Gestionnaire d'anticiper des réparations dans des parties plus affectées que d'autres avant que le mécanisme et la cinétique d'altération observés ne conduisent à une dégradation trop importante de ces parties d'ouvrage pouvant remettre en cause leur durabilité à long terme.

Une des conclusions importantes de cette démarche est relative à la synergie fructueuse entre les différents intervenants du Projet (Gestionnaire / Constructeur / Laboratoires) qui a permis, dès la phase de conception et pendant la phase de réalisation d'un ouvrage 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 et notamment en matière de prédiction de la pénétration des ions chlore. La démarche décrite dans la présente communication constitue donc un exemple de collaboration et de transfert technologique entre un laboratoire et une grande entreprise dans la construction d'un ouvrage de prestige. Mais elle constitue également une approche unique des problèmes relatifs aux matériaux faisant appel à un concept nouveau de " Béton de Haute Durabilité " dont l'usage devrait se systématiser dans l'avenir.

PENSÉES ET REMERCIEMENTS

Il est nécessaire de rappeler que le travail présenté est un travail d'équipe dans lequel différents ingénieurs du LERM et de VINCI Construction Grands Projets sont fortement impliqués. Il faut associer à ce travail : Michel Salomon, aujourd'hui décédé, Hugues Hornain, Olivier Houdusse, Jean-Luc Garciaz, Alex Reynaud, mais également Pierre Monachon et Marc Wastiaux.

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.

BIBLIOGRAPHIE

Normes et documents de référence

- Norme portugaise E378-93, "Bétons. Guide d'utilisation des liants hydrauliques"
- Projet de norme européenne ENV 206, "Bétons. Performances, production, mise en œuvre et critères de conformité", version de juin 1995
- LCPC, "Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction", (1994), 51 p.
- AFREM, Durabilité des bétons, "Mesure de la perméabilité aux gaz des bétons", Mode opératoire (1997)
- AFREM, Durabilité des bétons, "Mesure de la porosité accessible à l'eau des bétons", Mode opératoire (1997)
- AFREM, Durabilité des bétons, "Procédure de carbonatation accélérée des bétons", Mode opératoire (1997)
- AFREM, Durabilité des bétons, "Mesure de la profondeur de carbonatation des bétons par la méthode de la phénolphthaléine", Mode opératoire (1997)
- AASHTO T277-93 "Standard method of test for electrical indication of concrete ability to resist chloride", (American Association of State Highway and Transportation Officials, Standard specifications for transportation materials and method for sampling and testing, 16th edition, (1993), Part II, -Tests, Washington, DC, pp 876-881
- AFGC, "Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion" (Documents scientifiques et techniques), 2003.
- AFGC, "Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages. Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction" (Documents scientifiques et techniques), 2004.

Articles et Ouvrages

- BERNARD M., "La construction du pont Vasco de Gama", Travaux n° 743 – 1998, pp. 18-20
- DELAGRAVE, A., "Etude des mécanismes de pénétration des ions chlore dans les bétons conventionnels et haute performance", Thèse de l'Université Laval, Québec, Canada, 1995, 310 p.
- HORNAIN H, MONACHON, P., MARTINET, G., DUBOIN, C. "Durée de vie des ouvrages en béton. De la recherche aux applications. Du laboratoire au chantier". Science des matériaux et propriétés des bétons : premières rencontres internationales de Toulouse, 5-6 mars 1998, pp. 309-316
- HORNAIN H., "La microscopie comme moyen de diagnostic des ouvrages en béton armé" Journées Cefracor – octobre 1998
- TANG L., NILSSON L.O., "Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field", ACI Journal, n 89-M6, 1992
- MARCHAND, J., GERARD, B., DELAGRAVE, A., "Ion transport mechanisms in cement -based materials", Materials Science of Concrete, American Ceramic Society, 1995, 90 p.
- MONACHON P., "Durabilité du pont Vasco de Gama sur le Tage à Lisbonne", Durabilité des bétons, En hommage à Michel SALOMON, Paris 26 juin 1997, CATED, 1997. pp.27-34
- MONACHON, P., "Durabilité des bétons : la démarche suivie", Travaux n° 743, 1998, pp. 58-61
- HOUDUSSE O, MARCHAND J, HORNAIN H, "Prédiction de l'évolution de la concentration des ions présents dans les matériaux cimentaires : modélisation du transport ionique par la méthode des éléments finis", Science des matériaux et propriétés des bétons : premières rencontres internationales de Toulouse, 5-6 mars 1998, pp.151-158.
- MARTINET G., "Le pont Vasco de Gama – la démarche durabilité", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, vol. 58, n° 1, pp. 61-70 - 1999
- HOUDUSSE O., HORNAIN H., MARTINET G., "Prediction of long-term durability of Vasco Da Gama Bridge in Lisbon, 5th CANMET/ACI Conference on Durability of Concrete, Barcelone, 5-9 juin 2000, pp. 1037-1051