

APPROCHE PERFORMANTIELLE DE LA DURABILITÉ DES OUVRAGES D'ART EN BÉTON : PRÉSENTATION ET EXEMPLES D'APPLICATION SUR LE RÉSEAU DE LA DIR CENTRE EST

**Bruno GODART¹, Brigitte MAHUT¹, Didier BRAZILLIER²,
Christophe AUBAGNAC³, Bruno BOULET³**

¹ IFSTTAR (LCPC) – ² DIR Centre Est – ³ CETE de Lyon

1. PRÉSENTATION DE L'APPROCHE PERFORMANTIELLE

Maîtriser la durée de vie d'un ouvrage représente un enjeu économique majeur pour les investisseurs, les gestionnaires et les usagers. La durabilité des ouvrages d'art en béton s'obtient par une conception soignée prenant en compte non seulement les aspects liés à l'évacuation des eaux, la maîtrise de la fissuration, les enrobages des aciers, mais aussi un choix approprié des matériaux, une bonne qualité d'exécution, des contrôles adaptés, une maintenance régulière et une utilisation conforme aux hypothèses du projet.

Le guide technique publié par le LCPC en mars 2010 [1] (Figure 1) présente les recommandations provisoires pour mettre en œuvre une approche performantielle innovante, globale et prédictive de la durabilité des structures en béton armé. Celle-ci est basée sur la notion d'indicateurs de durabilité qui permet d'aborder rationnellement et efficacement les exigences liées au matériau béton vis-à-vis de cet objectif de durabilité. Ce document a été élaboré par un

groupe de travail formé de représentants du Réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées et a été soumis à un groupe de relecteurs issus de la Profession.

Ce guide technique qui s'inscrit dans le cadre défini par la norme européenne EN 206-1 (article 5.3.3 et son annexe J), l'Eurocode 2 (NF EN 1992-1-1/NA, tableau 4.3NF) et le fascicule 65 du CCTG (article 8.1.2.2), et qui s'inspire fortement du guide publié par l'AFGC en juillet 2004 [2], décrit une démarche comportant 6 étapes que nous allons à présent examiner. Cette démarche qui s'applique aux ouvrages d'art, est normalement de l'initiative du maître d'œuvre en accord avec le maître d'ouvrage.

1.1. Étape 1 : Choix de la durée d'utilisation du projet

Le maître d'ouvrage est responsable de la définition de la durée d'utilisation de projet de son ouvrage, durée pendant laquelle l'ouvrage doit présenter les performances attendues, sous réserve d'un entretien normal. Pour les ponts et

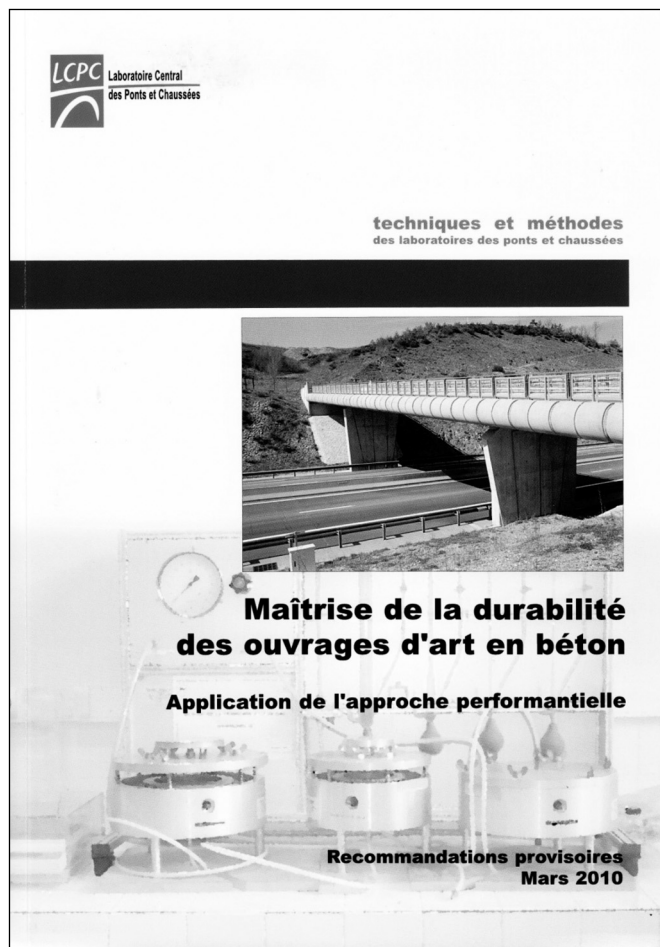


Figure 1 : Le guide technique du LCPC sur l'approche performantielle

autres ouvrages de génie civil, l'annexe nationale de la norme NF EN 1990 (Tableau 2.1 NF) préconise une durée indicative de 100 ans. Pour des ouvrages exceptionnels, une durée supérieure à 100 ans peut être souhaitée ; dans ce cas, l'ensemble de la démarche décrite par le présent guide s'applique, sous réserve d'adapter les seuils et les niveaux de prévention en application du guide AFGC [2] et des recommandations correspondantes.

1.2. Étape 2 : Conditions environnementales et principales dégradations

C'est de nouveau le maître d'ouvrage qui définit pour chaque partie d'ouvrage les classes d'exposition à prendre en compte, en fonction de l'environnement auquel seront exposées ces différentes parties. L'annexe 3 du guide fournit des indications pour l'aide au choix des classes d'exposition appropriées.

Trois risques principaux de dégradations potentielles sont actuellement pris en compte dans le guide :

1. la corrosion des armatures (due à la carbonatation et à la pénétration des chlorures),
2. les effets du gel (écaillage, gel interne),
3. les réactions de gonflement interne (alcali-réaction, réaction sulfatique interne).

1.3. Étape 3 : Choix des indicateurs de durabilité et spécifications associées

Pour chaque partie d'ouvrage et pour chaque risque de dégradations identifié à l'étape précédente, le maître d'œuvre définit les indicateurs de durabilité pertinents ainsi que les valeurs de seuil à respecter et est aidé pour cela par un certain nombre de tableaux figurant dans le guide. A titre d'exemple, nous ne présenterons par la suite que la démarche relative aux risques de corrosion.

Les indicateurs de durabilité retenus pour le risque de corrosion des armatures sont :

- la porosité accessible à l'eau (P_{eau}), par absorption sous vide exprimée en % (Figure 2) ;
- la perméabilité au gaz (K_{gaz}), exprimée en 10^{-18} m^2 (Figure 3) ;
- le coefficient de diffusion apparent des chlorures (D_{app}), exprimé en $10^{-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ (Figure 4).

auxquels s'ajoute, en complément, dans la perspective des épreuves d'étude, de convenance et de contrôle, la mesure de la résistivité électrique (ρ) exprimée en ohm.m (Figure 5).



Figure 2 : Cloche à vide pour la mesure de la porosité à l'eau



Figure 3 : Appareillage pour la mesure de la perméabilité au gaz

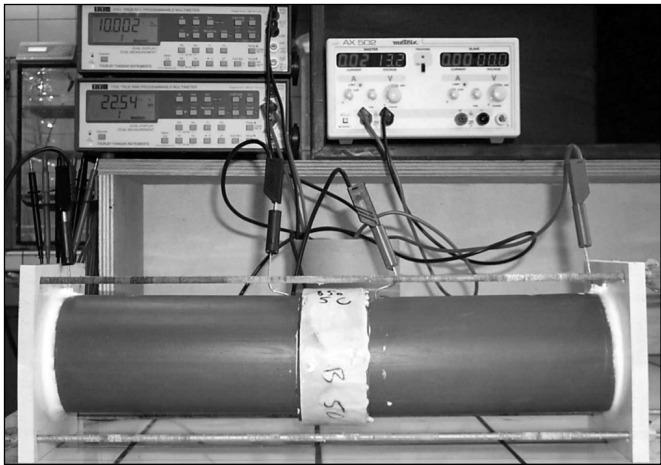


Figure 4 : Dispositif de mesure du coefficient de diffusion apparent des chlorures

Les seuils des indicateurs figurant au tableau 1 s'appliquent à des valeurs moyennes mesurées sur un béton âgé de 90 jours, pour des ouvrages dont la durée d'utilisation de projet est de 100 ans, et pour des enrobages de 30 mm vis-à-vis de la carbonatation (XC) et de 50 mm vis-à-vis de la pénétration des chlorures (XD, XS). Pour des enrobages différents, il convient d'adapter les seuils en se référant au guide AFGC « Conception des bétons pour une durée de vie des ouvrages » [2].

Il est à noter que pour les classes XD3 et XS3, dans le cas des BAP et des bétons à base de CEM III, compte tenu de l'état actuel des connaissances, il est admis de substituer



Figure 5 : Dispositif de mesure de la résistivité

aux exigences mentionnées dans le tableau 1, les exigences suivantes : $P_{\text{eau } 90j} \leq 13$ et $K_{\text{gaz } 90j} \leq 100$ et $D_{\text{app } 90j} \leq 3$. Pour les autres pathologies (alcali-réaction, RSI, gel-dégel), des indicateurs de durabilité spécifiques ainsi que leurs seuils associés sont également définis (voir [1]). Enfin, les modes opératoires simplifiés des essais de résistivité électrique, de migration des chlorures sous champ électrique, de porosité à l'eau et de perméabilité au gaz CEMBUREAU sont décrits en annexe 1 du guide.

Durée d'utilisation de projet 100 ans Classes d'exposition	Seuil des indicateurs à 90 jours	Exemples informatifs illustrant le choix des classes d'exposition*
XC1 Sec ou humide en permanence XC2 Humide, rarement sec	$P_{\text{eau } 90j} \leq 15$	Fondations (immergées ou non) Parties enterrées des appuis
XC3 Humidité modérée XC4 Alternance d'humidité et de séchage	$P_{\text{eau } 90j} \leq 13$ et $K_{\text{gaz } 90j} \leq 150$	Bétons protégés par une étanchéité Bétons exposés à l'air
XS1, Exposé à l'air véhiculant du sel marin XS2 Immergé en permanence dans l'eau de mer XD1 Exposé à des chlorures non marins transportés par voie aérienne XD2 Humide rarement sec, béton exposé à des eaux industrielles contenant des chlorures	$P_{\text{eau } 90j} \leq 13$ et $D_{\text{app } 90j} \leq 7$	Ouvrages à proximité d'une côte Partie d'ouvrage immergée en permanence dans l'eau de mer Zones d'un ouvrage faiblement exposées aux sels de déverglaçage (semelles ou radiers non profonds à proximité de ou sous voies fréquemment salées)
XD3 Alternance d'humidité et de séchage, béton exposé à des projections contenant des chlorures XS3 Zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns	$P_{\text{eau } 90j} \leq 11$ et $K_{\text{gaz } 90j} \leq 150$ et $D_{\text{app } 90j} \leq 3$ **	Piles d'un ouvrage très exposées aux sels de déverglaçage Ouvrage soumis aux embruns (à moins de 100 m de la côte dans le cas général) Zones de marnage

Tableau 1 : Seuils des indicateurs à 90 jours en fonction des classes d'exposition

1.4. Étape 4 : Formulation du béton et épreuves d'étude

Les épreuves d'étude de béton sont conduites par l'entrepreneur dans le respect des exigences de l'article 85.1 du fascicule 65 du CCTG. Les constituants du béton doivent être conformes aux normes en vigueur, notamment à l'EN 206-1.

La durée de mûrissement (90 jours) du béton préalable à la mesure des indicateurs de durabilité peut être difficilement compatible avec le planning de construction. Il est donc intéressant pour les utilisateurs de disposer de catalogues de formules locales « pré-qualifiées », établis par les producteurs de béton et permettant de les dispenser d'épreuves d'études.

Une formule de béton est dite pré-qualifiée si elle respecte les trois conditions suivantes :

- le béton a été antérieurement fabriqué et mis en œuvre dans des conditions équivalentes à celles du chantier considéré : dosage et provenance des matériaux, qualité et performances du matériel de fabrication, durée de transport et d'attente du béton ;
- il a répondu à des spécifications sur les indicateurs au moins équivalentes à celles prescrites ce qui suppose que pour chaque indicateur de durabilité, les résultats d'essais lors des épreuves d'études ou de contrôle de production par exemple vérifient les conditions suivantes : le nombre de prélèvement est supérieur ou égal à 3, et les résultats de chaque prélèvement satisfont strictement les seuils prescrits ;
- les résultats datent de moins de deux ans.

Lorsque le béton ne dispose pas de références probantes, des épreuves d'étude sont alors nécessaires. Les épreuves d'étude de béton sont validées par le maître d'œuvre sur la base d'un dossier remis par l'entreprise comprenant notamment les résultats des mesures de chaque indicateur

de durabilité retenu dans le CCTP. Ces indicateurs de durabilité sont mesurés à 90 jours. En complément, et dans la perspective des épreuves de convenance, sont également réalisées :

- des mesures de porosité à l'eau à 28 jours
- des mesures de résistivité électrique à 28 jours et 90 jours.

1.5. Étape 5 : Épreuves de convenance et de contrôle

Une fois les études de béton validées par le maître d'œuvre (c'est un point d'arrêt), l'entreprise, avec l'appui du producteur de béton, organise les épreuves de convenance. Le maître d'œuvre s'assure de leur conformité (outil de fabrication, respect des dosages, etc.), et fait réaliser de façon contradictoire, par son laboratoire de contrôle extérieur, des prélèvements de béton pour valider la mesure des indicateurs de durabilité.

Vis-à-vis de la corrosion, l'épreuve de convenance se limite à des mesures à 28 jours de la porosité accessible à l'eau (P_{eau}) et de la résistivité du béton (ρ). Les résultats de ces mesures sont comparés aux valeurs de l'épreuve d'étude à 28 jours. Elle est reconnue probante si les deux conditions suivantes sont vérifiées :

- la porosité accessible à l'eau (P_{eau}) est conforme à celle mesurée lors des études de bétons, soit :

$$P_{\text{eau}}(\text{convenance})_{28j} \leq 1,1.P_{\text{eau}}(\text{étude})_{28j}$$

- la résistivité électrique (ρ) est conforme à celle mesurée lors des études de bétons, soit :

$$\rho(\text{convenance})_{28j} \geq 0,8.\rho(\text{étude})_{28j}$$

Concernant les épreuves de contrôle, en cours de chantier, les contrôles de conformité sur les indicateurs de durabilité sont réalisés selon la fréquence définie dans le tableau 2 ci-après :

Nature des indicateurs	Échéance des essais	Fréquence minimale des contrôles par formule
ρ	28 jours	Une mesure jusqu'à 100 m ³ + une mesure par tranche de 100 m ³ supplémentaire ou fraction restante
P_{eau}	28 jours	Une mesure jusqu'à 100 m ³ + une mesure par tranche de 100 m ³ supplémentaire ou fraction restante
	90 jours	Une mesure jusqu'à 500 m ³ + une mesure par tranche de 500 m ³ supplémentaire ou fraction restante
K_{gaz} et D_{app}	90 jours	Une mesure jusqu'à 500 m ³ + une mesure par tranche de 500 m ³ supplémentaire ou fraction restante

Tableau 2 : Fréquence des essais

Le béton est déclaré conforme si les conditions figurant au tableau 3 sont vérifiées aux différentes échéances :

Épreuves de contrôle à 28 jours	Épreuves de contrôle à 90 jours
<ul style="list-style-type: none"> – $\rho(\text{contrôle})_{28j} \geq 0,8.\rho(\text{étude})_{28j}$ – $P_{\text{eau}}(\text{contrôle})_{28j} \leq 1,1.P_{\text{eau}}(\text{étude})_{28j}$ 	<ul style="list-style-type: none"> – $P_{\text{eau}}(\text{contrôle})_{90j} \leq P_{\text{eau}}(\text{spécifiée au marché})_{90j}$ – $K_{\text{gaz}}(\text{contrôle})_{90j} \leq K_{\text{gaz}}(\text{spécifiée au marché})_{90j}$ – $D_{\text{app}}(\text{contrôle})_{90j} \leq D_{\text{app}}(\text{spécifiée au marché})_{90j}$

Tableau 3 : Conditions à respecter lors des épreuves de contrôle

1.6. Étape 6 : Point Zéro durabilité et suivi de l’ouvrage

A l’issue du chantier, le maître d’ouvrage réceptionne l’ouvrage. Il s’agit alors d’initier son suivi dans le temps. En fonction des épreuves d’étude, de convenance et des contrôles de conformité, le maître d’ouvrage avec l’appui de son maître d’œuvre établit, pour chaque partie d’ouvrage, une synthèse « durabilité » rappelant les spécifications du CCTP, les indicateurs de durabilité retenus et les valeurs correspondantes visées et mesurées, les enrobages prévus et contrôlés, etc. En complément, il est possible d’évaluer les propriétés de durabilité du béton in situ par des mesures non destructives de type mesure de résistivité et de perméabilité de surface du béton. Le suivi de durabilité du béton consiste à évaluer les « témoins de durée de vie » de chaque partie d’ouvrage. Ces témoins de durée de vie sont évalués à partir d’essais réalisés in situ ou sur prélèvements. A titre d’exemple, nous présentons ci-après les témoins de durée de vie retenus vis-à-vis de la corrosion.

En environnement sans chlorure, la durée de vie en terme de corrosion des armatures est le temps mis pour que la profondeur de carbonatation atteigne les armatures. Dans ce cas, le témoin de durée de vie est :

- l’évolution de la profondeur de carbonatation (zone où $\text{pH} < 9$),
- ou l’évolution du profil de teneur en CaCO_3 (ou en Ca(OH)_2 résiduelle), en fonction du temps.

En présence de chlorures, la durée de vie en terme de corrosion des armatures est le temps mis pour que les chlorures atteignent une valeur donnée (concentration critique $[\text{Cl}^-]_{\text{crit.}}$) au niveau du premier lit d’armatures. Dans ce cas le témoin de durée de vie est :

- l’évolution de la profondeur de pénétration des chlorures (zone où $[\text{Cl}^-] > [\text{Cl}^-]_{\text{crit.}}$),
- ou l’évolution du profil de teneur en chlorures, en fonction du temps.

Le tableau 4 définit la concentration critique en Cl^- par rapport à la masse de ciment.

2. EXEMPLES D’APPLICATION

Pour étayer cette démarche et prendre la mesure des éventuelles difficultés de mise en œuvre de cette nouvelle

approche (calage des seuils de durabilité, impact sur les productions industrielles, faisabilité pratiques et dispersion des nouveaux essais (porosité, perméabilité aux gaz), impact sur les délais de chantier,...), mais aussi pour en évaluer les conséquences en matière d’organisation et d’adaptation des hommes, la DIR CE a souhaité, en liaison avec le réseau des LRPC, participer à ce programme en proposant l’utilisation de la méthode sur deux de ses chantiers : un viaduc en Saône et Loire à Volesvres (RCEA entre Digoin et Mâcon) avec la réalisation des essais induits par l’approche performantielle en parallèle d’un CCTP classique et des contrôles habituels ; un viaduc dans l’Allier sur la déviation de Montluçon (RCEA) avec la rédaction du CCTP en application du guide technique comme exposé ci dessus pour une durabilité spécifiée de 100 ans.

Il se trouve que pour des raisons de programmation budgétaire, l’ouvrage de Montluçon a finalement été réalisé en premier et sera très prochainement en service, alors que le chantier de l’ouvrage de Volesvres est toujours en cours...

2.1. Pont sur le Cher à Montluçon

2.1.1. Présentation de l’ouvrage

Dès 2008, le réseau des LPC recherchait un chantier pilote pour mettre en œuvre une démarche d’approche performantielle pour la prescription des bétons d’un chantier de construction d’ouvrage d’art. Le laboratoire des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand étant très impliqué dans la rédaction du futur guide, le choix s’est porté avec le concours de la DIR Centre-Est sur le chantier de mise à 2x2 voies de la RN145 sur le contournement de Montluçon (Allier).

L’ouvrage qui a été choisi sur ce chantier, est un ouvrage de 80 mètres de longueur, à deux travées, fondé sur pieux, avec un tablier à ossature mixte. Il permet le doublement du franchissement du Cher. La Maîtrise d’ouvrage est assurée par la DREAL Auvergne et la Maîtrise d’œuvre par le SIR de Moulins de la DIR Centre-Est.

2.1.2. Les exigences contractuelles du CCTP sur les bétons

Sur l’ensemble de l’ouvrage, il était nécessaire de prescrire 3 types d’expositions différentes pour les bétons (tableau 5).

	Béton précontraint	Béton armé	Béton armé CEM III
pourcentage de Cl^-	0,15 % en pré-tension et 0,20 % en post-tension	0,40 %	0,65 %

Tableau 4 : Concentration critique en chlorures libres au droit des aciers, selon le type de béton

Parties d’ouvrages	Classes d’expositions	Type de prescriptions
Fondations profondes, semelles de fondation, dalle de transition	XA1, XC2	Classique – Fascicule 65
Pile, Dalle d’ouvrage mixte	XC4, XF1	Conception performantielle
Culées, Superstructures	XF4 G+S, XC4	Classique – Fascicule 65 et Recommandations LCPC pour les bétons durcis soumis au gel et aux sels de déverglaçage

Tableau 5

Parties d'ouvrages	Classe d'exposition	Indicateurs principaux de durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures (seuils à 90 jours)		Indicateur secondaire de durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures
		P _{eau}	K _{gaz}	Résistivité
Pile et dalle d'ouvrage mixte	XC4, XF1	< 12(*)	< 150	> 100

(*) La version définitive du guide LCPC 2010 a remonté à 13% le seuil de porosité accessible à l'eau pour une classe d'exposition XC4.

Tableau 6

Les expositions aux attaques chimiques (XA) ne sont pas couvertes par le guide mais la classe d'exposition XF4 GS contient déjà une forme de conception performantielle de part l'exigence des essais d'écaillage et de facteur d'espacement. Les classes vis à vis de la RSI ont volontairement été écartées du tableau par souci de clarté. Ci-après, les prescriptions retenues pour la conception performantielle de la formule de la pile et du tablier (tableau 6).

2.1.2. Accompagnement : l'information préalable des fournisseurs de béton prêt à l'emploi (BPE)

Ne disposant évidemment pas de formules régionales pré-qualifiées, il était important de prévenir suffisamment en amont les fournisseurs BPE. Environ 5 mois avant le lancement de l'appel d'offre, le LRPC de Clermont en liaison avec le Syndicat Régional du BPE a réuni les fournisseurs susceptibles de livrer le chantier, afin de leur présenter l'approche performantielle d'une manière générale, ainsi que les prescriptions retenues pour le Pont sur le Cher. Deux d'entre eux ont lancé immédiatement des études de béton afin de pouvoir présenter un dossier d'étude complet en début de chantier. Ils ont trouvé peu de laboratoires capables de faire les essais nécessaires...

2.1.3. Les principaux résultats (tableau 7)

On constate une certaine difficulté à valider le seuil prescrit pour la porosité accessible à l'eau (12%). Ce seuil a été relevé à 13% dans le guide 2010. En revanche les perméabilités au gaz sont toutes conformes aux exigences prescrites (<150). Les écarts obtenus entre les laboratoires sont cohérents avec l'incertitude de l'essai (30%). Les mesures de résistivité électriques sont à utiliser en relatif, car nous avons constaté depuis qu'il était très difficile d'atteindre le seuil de 100 Ohm.m avec un béton à base de ciment CEM I. A contrario, ce seuil s'obtient très facile-

ment avec des bétons de CEMIII (voir Viaduc de Volesvres).

2.2. Viaduc de Volesvres

2.2.1. Présentation de l'ouvrage de doublement du viaduc de Volesvres

Les travaux en cours concernent la construction du doublement du viaduc de Volesvres dans le cadre de la mise à deux fois deux voies de la RN 79 (RCEA). Cet ouvrage est situé dans le département de Saône et Loire et permettra le franchissement de la rivière « Bourbince », de la Route Départementale n° 974 et du Canal du Centre (Figure 6).



Figure 6 : Doublement du pont actuel de Volesvres

L'ouvrage comporte 5 travées continues de 32 à 50 mètres de portée, pour une longueur totale de 206 m. Le tablier est un caisson mixte de hauteur constante, la charpente métallique du tablier est constituée d'un caisson ouvert, dont les âmes sont inclinées (Figure 7).

		Formule Pile/Dalle C35/45 XC4, XF1 400 kg CEMI 52,5 PMES			
		Porosité accessible à l'eau (%)		Résistivité (Ohm.m)	Perméabilité au gaz (10 ⁻¹⁸ m²)
Labo	Type d'épreuve	28 jours	90 jours	28 jours	90 jours
LERM	Etude	–	11,8	–	143
LRPC	Convenance	14,4	13,9	27	108
LERM	Convenance	–	12,3	50	83
LRPC	Contrôle	13,5	13,2	47	136

Tableau 7

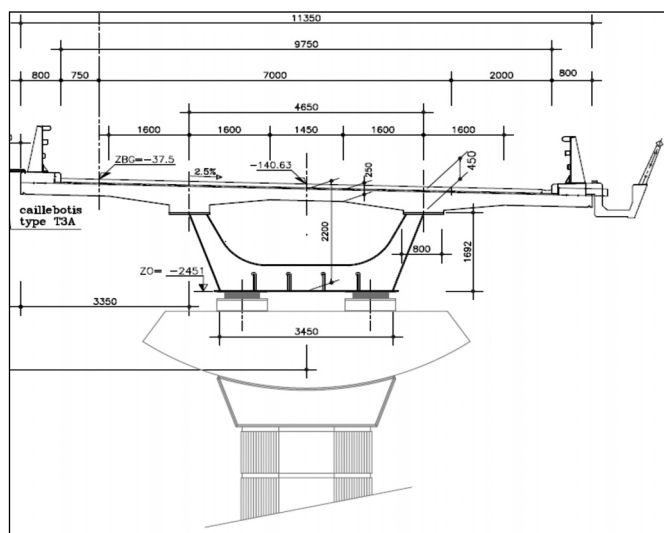


Figure 7 : Coupe du caisson sur appui

Le hourdis supérieur est constitué par une dalle en béton armé d'environ 0,30 m d'épaisseur moyenne.

Le hourdis en béton sera coulé en place par plots d'environ 40 m³, avec un phasage prévoyant de couler en dernier les plots des zones sur piles, pour éviter la fissuration de la dalle (principe du pianotage).

Le Marché a été attribué par la DREAL Bourgogne, maître d'ouvrage, au groupement d'entreprises CBR-TP (mandataire), SNCTP et IOA Construction pour le lot « charpente métallique », pour un montant d'opération de 4,013 M€ HT et un délai de réalisation de 24 mois.

La charpente métallique sera fabriquée par le charpentier métallique Suisse ZM, qui réalisera également les travaux d'anticorrosion sur site. Le montage de la charpente sera réalisé par IOA Construction (a priori à partir de mai 2011).

2.2.2. Les exigences contractuelles du CCTP sur les bétons

La durée d'utilisation du projet est de 100 ans.

L'ouvrage est situé en environnement de gel modéré. Le niveau de salage sur la voie portée RN79 sera très fréquent. Les bétons ont été prescrits suivant l'approche prescriptive classique, conforme à la norme NF EN206-1 complétée par le fascicule 65 du CCTG de décembre 2008.

Les 4 formulations principales de béton correspondent ainsi à :

- fondations profondes : C30/37 - XC2/XA1 (F) - Dmax20 - S4 - Cl0,40 avec teneur minimale en liant équivalent de 385 kg/m³, ciment de type PM et Eeff/Liant eq maxi = 0,5
- semelles, murs de front des culées, fûts des piles, dalles de transition : C30/37 - XC4/XF1 (F) - Dmax20 - Cl0,40 avec teneur minimale en liant équivalent de 330 kg/m³ et Eeff/Liant eq maxi = 0,5
- hourdis : C40/50 - XC4/XF1 (F) - Dmax20 - Cl0,40 avec teneur minimale en liant équivalent de 330 kg/m³ et Eeff/Liant eq maxi = 0,5
- longrine d'ancrage des BN4, corbeaux des murs garde-garde et solins d'ancrage des joints de chaussée : C35/45 - XC4/XF4/XD3 (F) - Dmax20 - Cl0,40 avec teneur

minimale en liant équivalent de 385 kg/m³, ciment de type CEMI ou CEMII/A (S ou D) 42,5 ou 52,5 PM ou ES et Eeff/Liant eq maxi = 0,45.

De manière générale, les justifications des parties en béton armé ont été menées conformément aux règles du BAEL 91 révisé 99, la fissuration étant considérée comme préjudiciable. Les enrobages des autres éléments sont ceux précisés à l'article A.7.1. du BAEL 91 révisé 99, pour les ouvrages soumis aux intempéries, aux condensations ou aux actions agressives (valeur minimale fixée à 3 cm).

Le niveau de prévention C vis-à-vis de la Réaction Alcali Granulats a été retenu.

Vis-à-vis des risques liés à la Réaction Sulfatique Interne, il a été retenu :

- une catégorie d'ouvrage de III (conséquence inacceptable),
- un niveau de prévention Ds pour les pieux de fondation et semelles, en contact durable avec l'eau (classe d'exposition XH3),
- un niveau de prévention Cs pour les autres parties d'ouvrage (classe d'exposition XH2).

2.2.3. Contexte de l'approche performantielle des bétons

Comme indiqué dans l'introduction, il a été décidé de tester sur cet ouvrage, de façon non contractuelle, l'application des Recommandations provisoires du LCPC de mars 2010 présentées précédemment.

Cette démarche est soutenue par le LCPC, qui a accepté la proposition du Département Laboratoire d'Autun du CETE de Lyon de réaliser, tout au long du chantier, les essais de l'approche performantielle sur deux formulations de bétons : le béton des appuis et le béton du hourdis du tablier en ossature mixte.

Les acteurs du chantier (entreprises, fournisseur de bétons : société Béton Contrôlé Montceau le Creusot) ont été sensibilisés à cette démarche. Il a également été décidé d'utiliser cette opportunité de chantier pour en faire un observatoire partagé avec la profession: l'ATILH, le SNBPE et CIMBéton ont été associés dès le démarrage des travaux.

Le programme de contrôle se conforme aux préconisations des Recommandations provisoires du LCPC de mars 2010, pour les bétons des appuis et du hourdis (classes d'exposition XC4/XF1).

Les formules de béton étudiées par la société BCMC ont été optimisées vis à vis du risque de RSI.

Ainsi, la formule « béton d'appui » (Figure 8) est dosée à 330 kg/m³ de ciment de type **CEMIII/A** 52,5 L PM-ES CP1 et comporte un dosage de 50 kg/m³ de filler calcaire. La formulation du béton du hourdis a fait l'objet d'essais d'information avec confection d'éléments témoins instrumentés par thermocouples pour le suivi d'évolution des températures du béton et essais de compression aux jeunes âges (recherche de résistances de 12 à 15 MPa).

Au final la formule « hourdis » est dosée à 350 kg/m³ de ciment de type CEMI 52,5 N CE CP2 et comporte un dosage de 55 kg/m³ de filler calcaire.

Un plan de contrôle « de principe », basé sur le planning général prévisionnel des travaux hors intempéries de l'entreprise CBR-TP, et faisant intervenir les départements laboratoires d'Autun et de Clermont-Ferrand du CETE de



Figure 8 : Pile du viaduc de Volesvres

Lyon, ainsi que les laboratoires centraux des cimentiers Lafarge et Calcia, a été établi sur les principes suivants :

- caractérisation par l'essai de porosité accessible à l'eau et l'essai de perméabilité aux gaz ;
- modes opératoires d'essais conformes à l'annexe 1 du guide LCPC : « Modes opératoires simplifiés : Résistivité électrique et migration des ions chlorure sous champ électrique. Porosité à l'eau. Perméabilité au gaz CEMBUREAU » ;
- prélèvements, par formule de béton et échéance d'essai (28 ou 90 jours) de 3 éprouvettes cylindriques 11 x 22 pour la mesure de la porosité accessible à l'eau et de la résistivité ;
- prélèvements, par formule de béton, de 3 éprouvettes cylindriques 15 x 30 pour la mesure de la perméabilité au gaz (90 jours) ;
- prélèvements pour essais « d'information » à 28 jours : une mesure jusqu'à 100 m³ + une mesure par tranche de 100 m³ supplémentaire ou fraction restante ;
- prélèvements pour essais « de contrôle » à 90 jours : une mesure jusqu'à 500 m³ + une mesure par tranche de 500 m³ supplémentaire ou fraction restante.

Il est prévu que les prélèvements destinés aux différents laboratoires soient réalisés :

- sur les mêmes fournitures de béton, pour pouvoir comparer les résultats d'essais et estimer la reproductibilité des essais ;
- sur des fournitures différentes de béton, pour pouvoir avoir un plus grand nombre de résultats d'essais et donc une meilleure connaissance de la dispersion inhérente à la production du béton ;

- à la livraison sur le chantier ou sur le site des centrales BPE.

2.2.4. Les premiers résultats

Après quelques difficultés pour la mise au point de l'application des modes opératoires d'essais, essentiellement en ce qui concerne le conditionnement préalable des échantillons, les premiers résultats de mesure de porosité accessible à l'eau obtenus par les laboratoires d'Autun et de Clermont-Ferrand sont proches.

Ils excèdent cependant les seuils fixés par les recommandations provisoires du LCPC de mars 2010 d'environ :

- + 1% maxi pour les bétons formulés à partir de ciment CEMI,
- + 3,5% maxi pour le béton d'appuis formulé à partir de ciment CEMIII.

Les premières mesures de perméabilité au gaz se conforment aux seuils des recommandations provisoires.

2.2.5. Démarche complémentaire de mise en œuvre de capteurs de corrosion

Le LCPC a souhaité que soient testés des capteurs de corrosion dans certaines parties en béton armé de l'ouvrage.

Les « kits capteurs de corrosion » retenus, de type électrochimiques et qui sont fabriqués par le Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) du Portugal, partenaire du LCPC, comprennent :

- 2 capteurs de courant galvanique (mesures à 2 profondeurs dans l'épaisseur d'enrobage) ;
- 1 électrode de référence « longue durée de vie » MnO₂ ;
- 2 capteurs de résistance électrique CER pour mesure de la résistivité du béton ;
- 1 sonde de température Pt100.



Figure 9 : Vue du capteur de corrosion du LNEC et de la sonde de température Pt100

Une analyse de risques a permis d'identifier 4 (+1) zones à instrumenter :

- le parement du fût d'une pile (risque de corrosion = carbonatation + projections d'eau chargée de sels de déverglaçage) et parement opposé de la même pile (risque de corrosion = carbonatation) pour comparaison (figure 6) ;
- la face avant du mur garde-grève d'une culée (point bas du profil en long) (risque de corrosion = carbonatation + ruissellements avec sels de déverglaçage) ;



Figure 10 : Installation d'un capteur de corrosion au sein du ferrailage d'une pile

- la sous-face de l'encorbellement du hourdis béton côté TPC au droit d'une pile et d'une culée (risque de corrosion = carbonatation + ruissellements avec sels de déverglaçage), Des réservations (tubes PVC) sont prévues à l'intérieur des éléments concernés pour le passage des câblages. Un relevé précis des enrobages est réalisé dans les zones d'emplacement des kits capteurs avant la mise en œuvre du béton. Il est prévu la mise en place en fin de chantier d'un système d'acquisition de données, constitué de 2 centrales (1 sur la pile P3 et 1 sur la culée C0), avec modems et alimentation électrique par panneaux solaires, qui seront disposés en partie supérieure de l'ouvrage au droit du Terre Plein Central.
- Affaire à suivre sur 2011 et 2012

3. PREMIÈRES CONCLUSIONS

La réceptivité des entreprises et des BPE est bonne pourvu que l'on assure une information suffisante en amont des appels d'offres pour anticiper ce type d'approche loin d'être naturelle... mais :

- Le nombre restreint de laboratoires capable de réaliser les essais de durabilité et de prodiguer des conseils pour l'optimisation des formules est faible ; il en résulte des coûts élevés et des difficultés pour les acteurs de terrain à trouver les bons appuis.
- Le producteur de béton doit être considéré comme un partenaire à part entière et non comme un simple fournisseur que l'on prévient au dernier moment en lui donnant qu'un extrait du CCTP !
- Les entreprises doivent intégrer le fait que la maîtrise de la formulation du béton et sa conformité au cahier des charges lui revient entièrement ; elles doivent muscler et structurer leur contrôle intérieur en ce sens et ne pas s'en remettre au contrôle extérieur (ceci n'est pas spécifique de l'approche performantielle mais prends ici un relief particulièrement important...).
- Il est nécessaire de d'intensifier la communication et la diffusion des expériences, la pénétration des ces innova-

tions dans le quotidien des acteurs de terrain étant toujours très difficile... (cf BHP, BAP, etc).

La mise en œuvre de l'approche performantielle nécessite une forte anticipation de tous les acteurs : la qualification de la formule, en l'absence de référence, nécessite au moins 120 jours (fabrication, prélèvements, préparation des échantillons, durée des essais) il faut en tenir compte dans la période de préparation des chantiers et viser l'association du BPE dès la remise des offres, ce qui n'est pas (loin s'en faut !) la pratique courante. A terme, on peut espérer avoir un catalogue de formules régionales permettant de gagner un temps précieux. Une réflexion est à mener, également, pour développer des indicateurs secondaires plus rapides pour dégrossir les formules ou les pré-réceptionner...

Le but visé par l'approche performantielle, dans une logique de développement durable, est bien sur la durabilité, mais également la recherche d'une économie potentielle des ressources en adaptant la formulation aux performances spécifiées et non à des dosage minimums imposés. Or, le coût des essais et leur durée conduit les entreprises et BPE à proposer des formulations « haut de gamme » pour être sûres de qualifier leur béton sans avoir à recommencer les études... il nous faut réfléchir à de formes de rémunération de l'optimisation des formules (prix pour plusieurs épreuves d'études à mener de front, prix unitaire du m³ de béton avec un intéressement sur l'économie des fournitures énergivores,...) encore faut-il que le BPE soit informé par l'entreprise de ces dispositions !

La détermination des seuils repose, pour le moment sur l'analyse des bétons de référence utilisés dans le cadre du vieillissement de corps d'épreuves pour BHP 2000, une phase d'optimisation économique des seuils indiqués dans le guide, sans pour autant dégrader la durabilité sera nécessaire, dès que l'on disposera d'un nombre d'applications suffisant pour construire un bon retour d'expérience, en particulier sur le seuil de porosité. Par ailleurs, les seuils des essais performantiels du guide ont été établis essentiellement à partir de bétons formulés avec un ciment de type CEM I ; il conviendra d'apprécier l'influence d'autres types de ciment.

Enfin, le surcoût observé sur ces deux premières applications est très raisonnable et pourrait sans doute être annulé avec une bonne optimisation des formules. Ceci est de nature à encourager maintenant, une diffusion plus large sur nos chantiers de cette méthode.

4. RÉFÉRENCES

- [1] LCPC - Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton – Application de l'approche performantielle – Recommandations provisoires, Techniques et méthodes des LPC, 56 pages, Mars 2010.
- [2] 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 – Etat de l'art et guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité – Juillet 2004.