

Solutions béton

D'une obligation de moyens vers
une obligation de résultats P. 16

Point de vue de la maîtrise d'ouvrage
et de la maîtrise d'œuvre P. 18

Le guide du LCPC : Application
de l'approche performantielle P. 19

Les évolutions au niveau
européen
Les outils de l'approche
performantielle Rabat 1

Incidence sur le CCTP Rabat 2

Exemple d'application de
l'approche performantielle
sur le viaduc de Volesvres P. 20



L'approche performantielle

L'approche performantielle est une démarche innovante, globale et prédictive de la durabilité des structures en béton, fondée sur la notion d'indicateurs de durabilité. Elle permet de formuler des bétons pour une durée de vie attendue dans un environnement donné lors de la phase de conception d'une structure et donc d'en maîtriser la durabilité, mais aussi de déterminer la durée de vie résiduelle d'un ouvrage existant. Elle constitue un outil de contractualisation des objectifs de durabilité des ouvrages en béton et représente une évolution majeure dans la prescription des bétons qui s'inscrit dans la continuité d'une logique de progrès depuis plusieurs décennies. Elle a été traduite sous forme d'un guide technique pour maîtriser la durée de vie des ouvrages d'art, mis au point par les experts de l'IFSTTAR, afin de faciliter sa mise en œuvre en cohérence avec le cadre normatif européen. Les recommandations de ce guide ont été mises en œuvre sur le viaduc de Volesvres. Texte : Christophe Aubagnac, Didier Brazillier, Patrick Dantec, Bruno Godart, Patrick Guiraud, Jean-Marc Potier

D'une obligation de moyens vers une obligation de résultats

NOTION DE DURABILITÉ

Les acteurs de la construction doivent aujourd'hui répondre, lors de la construction d'ouvrages, puis de leur gestion, à des exigences de durabilité fortes, qui s'inscrivent dans une démarche globale de Développement Durable.

Les ouvrages en béton subissant au cours de leur vie des agressions et attaques multiples qui peuvent altérer progressivement leur niveau de service, la maîtrise de leur durée d'utilisation est devenue un enjeu majeur pour les gestionnaires d'ouvrages qui leur impose de se préoccuper dès la conception et la construction des exigences de durabilité qu'il convient de pouvoir rendre contractuelles.

La durabilité d'un ouvrage caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage pour lequel il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers) et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans son environnement (gel, eaux agressives...), avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible.

La durabilité d'un ouvrage est assortie d'une durée, temps minimal pour lequel l'ouvrage est conçu, qui est appelée : la durée d'utilisation de l'ouvrage.

Elle dépend de nombreux paramètres dont la qualité de la conception (maîtrise de la fissuration, enrobage), des matériaux et des produits utilisés, des dispositions constructives, de la réalisation de l'ouvrage, de la mise en œuvre des produits, et des contrôles. Elle suppose l'utilisation de l'ouvrage conforme aux hypothèses du projet et sa maintenance courante et régulière.

Il est possible désormais de définir

des objectifs de durabilité et de spécifier avec précision les caractéristiques du béton dès la conception de l'ouvrage en fonction des agressions potentielles qu'il aura à subir pendant toute sa durée d'utilisation.

LA DÉMARCHÉ PRESCRIPTIVE ACTUELLE

La durabilité des bétons d'un ouvrage est gouvernée actuellement par un ensemble cohérent et homogène de normes qui traduisent une démarche prescriptive basée sur un concept d'obligation de moyens, associé pour certains types de dégradations (alcali-réaction, gel/dégel...) à des essais de performance.

Les normes de conception des structures (Eurocodes) applicables depuis le 1^{er} avril 2010 en France explicitent l'exigence de durabilité des ouvrages et la nécessité de prendre en compte la durée d'utilisation de l'ouvrage dès sa conception.

La norme *NF EN 206-1/CN* définit des valeurs limites applicables à la composition des bétons en fonction de l'environnement auquel sera soumis chaque béton de l'ouvrage pendant sa durée d'utilisation (en particulier : teneur minimale en liant équivalent, résistance minimale en compression, rapport maximal E/liant équivalent).

La définition et les spécifications des bétons sont fixées par le prescripteur. Elles doivent en particulier prendre en compte :

- les agressions liées à la carbonatation et à la pénétration des chlorures ;
- la prévention des désordres dus aux gonflements internes du béton (alcali-réaction et réaction sulfatique interne) ;
- la tenue des bétons durcis soumis au gel et aux sels de déverglaçage ;

- les agressions chimiques.

Cette approche facile à utiliser est fondée sur un important retour d'expérience de plusieurs décennies.

Elle est parfaitement adaptée pour les ouvrages traditionnels pour lesquels la durée de vie conventionnelle de 50 ans est requise. Dans le cas d'ouvrages exceptionnels ou soumis à des sollicitations particulières ou lorsqu'une durée de vie significativement plus importante (100, 120, voire 150 ans) est souhaitée par le maître d'ouvrage, l'approche prescriptive n'est pas toujours suffisante pour maîtriser la durabilité des bétons de l'ouvrage.

LES POSSIBILITÉS INTRODUITES PAR

LA NORME *NF EN 206-1/CN*

La norme *NF EN 206-1/CN* introduit la notion « d'approche performantielle » dans deux articles et la précise dans deux annexes en prévoyant que les spécifications relatives aux classes d'exposition puissent être définies en utilisant des méthodes de conception performantielles.

■ Article 5.2.5.3 concept de performance équivalente

« Le concept de performance équivalente du béton permet de modifier les prescriptions de composition des bétons énoncées dans les cas où une addition spécifique est utilisée avec un ciment spécifique dont l'origine et les caractéristiques de chacun sont clairement définies et consignées. »

« Il doit être prouvé à l'aide d'essais performantiels que le béton a une équivalence de performance avec celle d'un béton de référence, en particulier pour ce qui concerne son comportement vis-à-vis des agressions de l'environnement et sa

durabilité, conformément aux exigences pour la classe d'exposition concernée. »

L'annexe E donne les principes d'évaluation du concept de performance équivalente.

■ Article 5.3.3 méthodes de conception performantielles

« Les exigences relatives aux classes d'exposition peuvent être établies en utilisant les méthodes de conception performantielles pour la durabilité et elles peuvent être établies en termes de paramètres performantiels, par exemple une mesure d'écaillage dans un essai de gel/dégel. »

L'annexe J donne des conseils relatifs à l'utilisation de cette méthode de formulation.

Nota : Le futur fascicule 65 (*Exécution des ouvrages de Génie Civil en béton*) prend en compte l'application possible de l'approche performantielle.

DÉFINITION DE L'APPROCHE PERFORMANTIELLE

Les recherches consacrées à la durabilité des ouvrages en béton lors des dernières décennies ont abouti à une meilleure compréhension des mécanismes de dégradation des bétons et une mise au point d'outils de caractérisation et de suivi de leurs évolutions. Des modèles prédictifs ont été développés et validés expérimentalement.

L'expertise acquise a permis de développer une nouvelle démarche visant à maîtriser plus rationnellement la durabilité des bétons appelée « approche performantielle ».

Cette nouvelle approche fixe des exigences en termes de résultats (par exemple résistance aux chlorures) et non plus en termes de moyens (par exemple dosage minimal en

ciment) et donne des outils pour contrôler si les objectifs de durabilité sont atteints. Elle ne dispense pas, bien sûr, d'appliquer avec la même rigueur les règles de l'art et recommandations habituelles pour la mise en œuvre du béton, l'exécution des ouvrages et la réalisation des contrôles.

Elle complète et renforce la norme *NF EN 206-1/CN* en tirant profit de l'évolution des connaissances scientifiques sur les transferts hydriques, sur les mécanismes physico-chimiques mis en jeu dans les processus de dégradation et les propriétés de transport des agents agressifs. Elle apporte une réponse quand l'approche prescriptive conduit à des exigences de moyens difficiles à concilier.

UNE DÉMARCHE FONDÉE SUR DES INDICATEURS DE DURABILITÉ

L'approche performantielle est une méthodologie multiniveau, globale, scientifiquement fondée et innovante pour la spécification, l'évaluation et la prédiction de la durabilité des structures en béton armé ou précontraint.

Elle est fondée sur la notion d'indicateurs de durabilité associés à des critères performantiels et des valeurs seuils à respecter ainsi que des méthodes de caractérisation physico-chimiques et des modèles calibrés des différentes dégradations. Lors de la conception d'un ouvrage, la méthode consiste, en fonction de son environnement (actions environnementales auxquelles est soumise chaque partie d'ouvrage) et de la durée d'utilisation de l'ouvrage escomptée, à identifier les risques de dégradations potentielles des bétons, à choisir des indicateurs de

durabilité adaptés et pertinents traduisant les risques de dégradation puis à sélectionner les spécifications de performances optimales à adopter et les seuils et critères d'acceptation des indicateurs de durabilité à respecter.

DOMAINES D'UTILISATION DE L'APPROCHE PERFORMANTIELLE

Elle s'applique aussi bien aux ouvrages neufs en phase de conception qu'aux ouvrages existants du patrimoine.

Démarche prédictive de la durabilité des ouvrages en béton, elle permet :

- de valider la durabilité d'une formulation de béton conforme à la norme *NF EN 206-1/CN* ;
- de définir, prescrire et qualifier des formulations de béton pour une durée d'utilisation et un ouvrage donnés ;
- de prédire la durabilité des ouvrages neufs ;
- d'optimiser la formulation du béton en intégrant la durée de vie de l'ouvrage et les conditions environnementales auxquelles il est soumis ;
- de spécifier des bétons sur la base d'indicateurs de durabilité spécifiques ;
- d'évaluer les performances des bétons vis-à-vis de la durabilité adaptée à leur environnement et une meilleure prise en compte du contexte local de l'ouvrage (utilisation de matériaux locaux par exemple) ;
- d'utiliser de nouveaux matériaux et de privilégier les ressources locales tout en s'assurant que les exigences de durabilité sont respectées ;
- de déterminer la durabilité des bétons ou de prévoir l'évolution de l'ouvrage vis-à-vis d'un processus de dégradation considéré ;
- de tirer profit des avantages tech-

niques et environnementaux des nouveaux concepts de formulation des bétons et des propriétés et des performances des bétons innovants ;

■ d'optimiser la formulation des bétons pour répondre à un cahier des charges spécifique d'un ouvrage ;

■ de contrôler et suivre les évolutions des bétons et des structures au cours du temps.

Elle est destinée aussi à :

- estimer la durée de vie résiduelle d'un ouvrage existant, ce qui permet d'optimiser le suivi de l'ouvrage et d'établir un diagnostic précis de l'état de la structure afin de définir une stratégie optimale de gestion, d'entretien, de maintenance ou de réparation d'un patrimoine d'ouvrages ;
- déterminer et prédire la durée de vie potentielle d'un ouvrage dans son environnement au moment de sa conception, mais aussi la durée de vie résiduelle d'un ouvrage existant.

DES ACQUIS SCIENTIFIQUES

Elle s'appuie sur des acquis scientifiques et les résultats de nombreuses recherches et enrichit le référentiel technique actuel en offrant des marges de manœuvre pour la formulation et la qualification des bétons destinés à la construction d'ouvrages.

Ce type d'approche a déjà été appliqué et validé sur de grands projets tels que le viaduc de Millau et le pont Vasco de Gama sur le Tage.

Les connaissances scientifiques sur l'approche performantielle ont été analysées dans le cadre d'un groupe de travail de l'Association Française de Génie Civil (AFGC) animé par Véronique Baroghel-Bouny. Elles font l'objet d'un guide 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, État de l'art et Guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité ».

ATOUTS DE L'APPROCHE PERFORMANTIELLE

L'approche performantielle autorise une plus grande liberté pour la formulation des bétons et favorise l'innovation en offrant aux prescripteurs plus de souplesse sur le choix du béton et de ses constituants.

Choix de maîtrise d'ouvrage, elle répond à l'enjeu croissant de durabilité dans un cadre rationnel et contractuel et offre aux concepteurs d'ouvrages une plus grande diversité de solutions.

La démarche performantielle permet de prendre en compte la globalité des aspects technico-économiques spécifiques à un ouvrage au sein de son environnement et d'appréhender et de maîtriser la durabilité des bétons en intégrant les défis et les préoccupations liés à la prise en compte du concept de Développement Durable (ouvrages pérennes, valorisation des matériaux, optimisation de l'utilisation des ressources naturelles...).

UNE ANTICIPATION INDISPENSABLE

L'application de l'approche performantielle nécessite des changements importants dans les relations entre les acteurs (maître d'ouvrage, maître d'œuvre, entreprise, producteur de béton), un renforcement des responsabilités de chacun et une anticipation de la problématique matériaux lors de la mise au point du projet. ■

Point de vue de la maîtrise d'ouvrage et de la maîtrise d'œuvre

Point de vue de l'expert

DIDIER BRAZILLIER, directeur de l'Ingénierie DIR Centre-Est

Quel maître d'ouvrage n'a pas rêvé de pouvoir commander puis réceptionner un ouvrage avec un niveau de service garanti, évitant ainsi sur une période de durée de vie spécifiée de faire face à de coûteuses réparations bien souvent problématiques vis-à-vis des contraintes d'exploitation et mal acceptées par les usagers ?

Ce rêve peut devenir réalité avec l'approche performantielle, aboutissement des évolutions récentes dans la maîtrise des formulations des bétons modernes, dans la modélisation et la caractérisation des processus de dégradation du béton armé dans un environnement donné... mais cela demande une posture affirmée et quelques efforts de rigueur dans la définition de leurs attentes de la part du maître d'ouvrage et de son maître d'œuvre.

Ne pas oublier les fondamentaux.

■ Il convient de rappeler avec force que l'application de cette méthode ne permettra aucunement de s'affranchir d'un suivi régulier et d'un entretien courant normal au cours de la vie de l'ouvrage, pas plus que la mise de côté des normes habituelles sur les matériaux constitutifs du béton.

Afficher ses attentes et savoir s'entourer.

■ Il convient d'exposer résolument et clairement, le plus en amont possible, le recours souhaité à ce type d'approche, ses exigences et la description de l'environnement précis dans lequel sera construit l'ouvrage. Pour être précis, explicite et conforme au cadre des normes Eurocodes (voir guide SETRA – « Application des Eurocodes par le maître d'ouvrage, le programme d'un OA aux Eurocodes » – février 2010 – Réf. 1002) et du guide « Application de l'approche performantielle du LCPC » (voir ci-contre), le maître d'ouvrage doit s'entourer d'un AMO ou d'un maître d'œuvre expérimenté dans ce domaine.

Cela est indispensable compte tenu de la technicité de la définition des données d'entrée qui doivent être pertinentes, adaptées à l'ouvrage et cohérentes entre elles pour éviter l'accumulation de prescriptions parfois contradictoires ou la multiplication des formules exigées pour chaque partie d'ouvrage sans plus-value.

Offrir les conditions de réussite et encourager l'innovation.

■ La définition des indicateurs de durabilité pertinents et des seuils d'acceptation est particulièrement importante, car condi-

tionnant l'économie générale des études. Le maître d'ouvrage veillera à donner du temps pour permettre les études formulation et la validation des épreuves de convenance, mais aussi pour que l'entreprise et son BPE puissent s'emparer de la souplesse offerte par l'approche performantielle pour optimiser les formules tant du point de vue économique qu'environnemental.

On aura d'ailleurs tout intérêt dans les pièces contractuelles à rechercher à valoriser cette optimisation (prime à des bétons à moindre impact environnemental ou prise en charge de plusieurs études de formulation par exemple) pour encourager à explorer cette voie, qui est fondamentale dans une logique de Développement Durable.

Donner du temps, cela peut passer par une information anticipée des acteurs (avant le lancement de l'appel d'offres) via l'affichage d'une politique générale du maître d'ouvrage, résolument tournée vers une analyse en coût global ou via un contact préalable avec les organismes professionnels...

Ou encore par le financement d'études sur des matériaux locaux pour simplifier le recueil de données, voire par le recours à des formulations locales

types préalablement testées et validées... Il est important de souligner que cette approche ne se résume pas uniquement à un pari de la part du maître d'ouvrage basé sur un contrat moral lors de la conclusion du marché. Il pourra avec quelques essais réguliers sur les bétons de la structure s'assurer que le vieillissement constaté est conforme aux prédictions initiales du modèle et donc disposer de véritables témoins de durée de vie.

Un appui pour les gestionnaires...

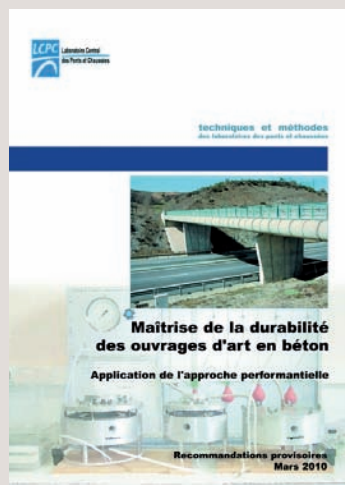
■ C'est aussi grâce à ces modèles de simulation des dégradations et de vieillissement, comme exposé par ailleurs, que l'approche performantielle est également un outil puissant pour l'évaluation de la durée de vie résiduelle probable d'une structure existante ou la prédiction de l'évolution des dégradations du béton structurel, ce qui est extrêmement précieux et potentiellement source d'économie.

Avec la généralisation de la méthode et quelques retours d'expérience attendus, on s'oriente bien vers une petite révolution dans la gestion d'un patrimoine d'ouvrages d'art. ■



Le guide du LCPC : Application de l'approche performantielle

BRUNO GODART, *Directeur adjoint du Département Matériaux et Structures de l'IFSTTAR*



L'objectif du guide est de faciliter la mise en œuvre de l'approche performantielle de la durabilité pour les ouvrages d'art neufs en béton dont la durée d'utilisation est fixée par l'Eurocode à 100 ans. S'appuyant sur une démarche scientifique et tirant profit des résultats de la recherche, ce guide propose une méthodologie adaptée pour l'application pratique de la démarche performantielle aux ouvrages courants. C'est-à-dire des ouvrages de dimensions relativement modestes, dont la conception et la réalisation sont simples et qui ne présentent pas un caractère stratégique majeur au sein du réseau d'infrastructures. Prenant en compte les préoccupations liées à la construction de structures durables, adaptées à leur environnement et respectueuses des contraintes économiques, cette méthodologie répond de manière pratique aux exigences du Développement Durable.

APPROCHE GLOBALE ET CONTEXTE LOCAL

Ce guide est destiné aux maîtres d'ouvrage, aux gestionnaires d'ouvrages, aux maîtres d'œuvre et prescripteurs, aux entreprises de construction, aux industriels réalisant des produits préfabriqués en béton, aux fournisseurs de BPE et aux laboratoires impliqués dans la construction.

Il intègre trois risques principaux de dégradation du béton :

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

Il définit en particulier :

- les exigences à introduire dans le programme du maître d'ouvrage et les spécifications correspondantes du CCTP ;
- les modalités requises pour la qualification et la comparaison des formules de béton ;
- les modalités relatives aux contrôles et suivi de l'ouvrage.

De manière plus précise, ce guide permet au maître d'ouvrage de prendre en compte, dans une approche globale, le contexte local de son ouvrage et ses exigences propres en termes d'enjeux et de stratégie :

- la durée de vie de l'ouvrage ;
- les fonctions de l'ouvrage (utilisations, enjeux...) ;
- l'environnement, avec la prise en compte des spécificités locales (mer, gel, emploi de sels de déverglaçage) ;
- les ressources locales.

Pour les entreprises et les producteurs de béton, la méthode décrite dans le guide vise à simplifier les modalités de mise au point et de validation des formules de béton, permettant ainsi des gains de temps dans la phase de préparation des chantiers. Elle met à leur disposition des outils pratiques d'évaluation de la performance des bétons vis-à-vis de la durabilité. Elle offre aussi tous les outils nécessaires pour mieux évaluer et justifier des innovations en matière de formulation des bétons.

Elle introduit la notion de formules locales « préqualifiées » répondant à des exigences de durabilité et permettant de faciliter l'application de cette approche. Ces formules doivent avoir fait l'objet d'études et disposer de références probantes vis-à-vis des exigences de durabilité.

UNE DÉMARCHÉ EN 6 ÉTAPES

Le recours à l'approche performantielle est normalement de l'initiative du maître d'œuvre, en accord avec le maître d'ouvrage. L'initiative peut en revenir à l'entreprise, dans la mesure où le maître d'œuvre a ouvert cette possibilité dans son marché.

Dans sa mise en œuvre, la démarche performantielle se décline en six grandes étapes successives :

- 1 – Le choix de la durée d'utilisation du projet.
- 2 – La prise en compte des conditions environnementales et l'analyse des risques principaux de dégradation.
- 3 – La sélection des indicateurs de durabilité et des spécifications relatives à ces indicateurs.
- 4 – La formulation du béton avec les épreuves d'étude.
- 5 – La réalisation des épreuves de convenance et de contrôle.
- 6 – Le « Point zéro durabilité » sur l'ouvrage et son suivi.

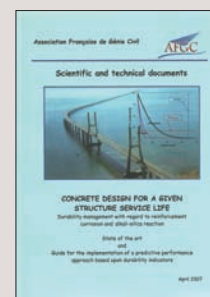
QUELQUES LIMITES D'UTILISATION

Le guide comporte en outre différentes annexes dont une aide au choix des classes d'exposition pour les ouvrages d'art, des exemples de spécifications à introduire dans les cahiers des charges, et une description des modes opératoires des essais à utiliser.

Pour conclure, il convient de mentionner que cette démarche innovante au plan mondial possède des limites. Les seuils fixés sur les indicateurs de durabilité en matière de corrosion sont donnés pour des enrobages standards de 30 ou 50 mm, et ils doivent être ajustés si des enrobages différents sont mis en œuvre.

De même, les seuils ont été fixés sur la base d'une utilisation de ciments de type CEM I, et ils doivent être adaptés si l'on emploie des ciments contenant de fortes quantités de laitiers de haut fourneau ou de cendres volantes.

Les seuils à respecter s'appliquent à des valeurs moyennes mesurées sur un béton de 90 jours, pour des ouvrages dont la durée d'utilisation de projet est de 100 ans ; pour des durées supérieures ou pour une prise en compte de la variabilité des valeurs, il faut se reporter à la littérature scientifique et technique dont notamment le guide 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
■ **État de l'art**
■ **Guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité.**

AFGC juillet 2004.

Les évolutions au niveau européen

Point de vue de l'expert

JEAN-MARC POTIER, chargé de mission technique au SNBPE

La nouvelle version de la norme béton, EN 206, actuellement au stade du vote formel, précise dans l'article :

5.3.3 : Méthodes performantielles :

a) – Les exigences liées aux classes d'exposition peuvent être établies en utilisant des méthodes performantielles pour la durabilité et peuvent être spécifiées en termes de paramètres performantiels, par exemple une mesure d'écaillage du béton au cours d'un essai de gel/dégel. L'utilisation d'une méthode performantielle est soumise aux dispositions en vigueur sur le lieu d'utilisation du béton.

Les conditions cadres pour le mode opératoire de détermination de la durabilité équiva-

lente ont été publiées en tant que CEN/TR 16563.

« *Principles of the equivalent durability procedure* ».

Le principe d'équivalence de durabilité est une méthode basée sur l'approche traditionnelle de valeurs limites établies en termes de rapport E/C, de teneur minimale en ciment, etc. Le principe repose sur la comparaison entre un béton de référence et le béton candidat, sur la base d'essais représentatifs des conditions environnementales auxquelles sera soumis le béton candidat.

La procédure d'équivalence de durabilité (EDP) permet d'établir la conformité de compositions de béton s'écartant des valeurs prescriptives. Cette procédure est en théorie applica-

ble pour toutes les classes d'exposition, mais, dans la pratique, est limitée aux classes d'exposition pour lesquelles des normes d'essais normalisées au niveau européen existent.

La procédure comprend au minimum trois parties :

■ la fixation de valeurs de réf-

érence (approche absolue) ou d'un béton de référence (approche comparative) ;

■ des essais initiaux du béton candidat pour vérifier le respect des valeurs limites ;

■ un contrôle continu de la production pour l'évaluation de la conformité. ■

Méthodes d'essais de performance normalisées (ou en cours) au niveau européen

CEN/TS 12390-9 – Testing hardened concrete –

Part 9: Freeze-thaw resistance – Scaling (essai d'écaillage).

CEN/TS 12390-10 – Testing hardened concrete –

Part 10: Determination of the relative carbonation resistance of concrete (résistance relative à la carbonatation).

CEN/TS 12390-11 – Testing hardened concrete –

Part 11: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion (résistance à la pénétration des chlorures).

CEN/TR 15177 – Testing the freeze-thaw resistance of concrete - Internal structural damage (gel interne).

Les outils de l'approche performantielle

La démarche « approche performantielle » s'appuie sur des indicateurs de durabilité.

On distingue trois types d'indicateurs.

Indicateurs de durabilité généraux : valables pour différents types de dégradations :

■ porosité accessible à l'eau par absorption sous vide : $P_{eau\%}$;

■ coefficient de diffusion apparent des chlorures par migration :

$D_{app} 10^{-12} m^2 s^{-1}$;

■ perméabilité apparente au gaz : $K_{gaz} 10^{-18} m^2$;

■ teneur en portlandite $Ca(OH)_2$.

Indicateurs de durabilité spécifiques : valables pour un processus de dégradation donné (alcali-réaction, dégradations dues au gel) ;

■ variations dimensionnelles/gonflement ;

■ gel : caractéristiques du réseau de bulles d'air ;

■ alcali-réaction : concentration en alcalins équivalents.

Indicateurs de substitution :

■ porosité accessible au mercure ;

■ résistivité électrique ;

■ coefficient d'absorption capillaire ;

■ coefficient de diffusion du CO_2 .

Chaque indicateur est associé à des spécifications et des valeurs seuils, fonction de la durée de vie exigée, ainsi qu'à des essais en laboratoire ou sur éprouvettes prélevées sur ouvrage.

Les **témoins de durée de vie** (tels que la profondeur de carbonatation ou le profil de concentration en chlorures dans le béton d'enrobage) analysés par des essais *in situ* ou sur des prélèvements permettent d'évaluer le niveau d'avancement du processus de dégradation et donc de prédire la durée de vie résiduelle des ouvrages en béton armé.

Les **essais de performance** permettent d'évaluer le comportement d'un béton soumis à des sollicitations physico-chimiques, de façon amplifiée et accélérée, de même nature que celles auxquelles l'ouvrage sera exposé.

Des **modèles prédictifs** ont été développés, calés et validés (essais accélérés en laboratoire, analyse de prélèvement sur ouvrage) pour chaque processus de dégradation. Ils évaluent l'avancement du processus de dégradation. ■

Incidence sur le CCTP

Point de vue de l'expert

PATRICK DANTEC, *consultant*

Le fascicule 65 de 2008 ouvre la porte à l'utilisation de l'approche performantielle dans son chapitre 8 article 81.2.2 pour les bétons ne relevant pas des classes XF3, XF4 et XA1 à XA3.

Le CCTP du marché doit préciser les dispositions applicables à la prescription des bétons de l'ouvrage considéré. Le guide du LCPC de mars 2010 « Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton » définit les éléments particuliers à prendre en compte, propose la démarche à suivre et fournit des exemples de clauses de rédaction adaptées à inclure dans le CCTP.

En premier lieu, le CCTP doit rappeler les exigences particulières du projet fixées par le maître d'ouvrage en ce qui concerne sa durée d'utilisation, généralement 100 ans pour les ouvrages d'art, le contexte climatique et environnemental en référence à la norme *NF EN 206-1* pour le choix des classes d'exposition, à la norme *NF EN 1992-1-1* pour la définition de l'enrobage et aux recommandations pour la prévention des risques de réaction de gonflement interne, de réaction sulfatique et de gel.

Le CCTP précise les classes

d'exposition des différents bétons et la justification des enrobages attendus C_{min} , dur selon les Eurocodes et leur Annexe nationale française. Il convient de souligner que l'application de la démarche performantielle permet une modulation de la classe structurale qui autorise un gain de 10 mm sur l'enrobage.

Le CCTP définit les spécifications performantielles des bétons par partie d'ouvrage dans le « tableau des bétons ». Pour chaque partie d'ouvrage concernée par l'utilisation de l'approche performantielle, la teneur minimale en liant équivalent et le rapport eau efficace sur liant équivalent maximal de l'approche prescriptive sont remplacés par des valeurs de seuil à obtenir sur les indicateurs de durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures. Ces indicateurs sont choisis de façon pertinente en fonction des classes d'exposition de chaque partie d'ouvrage considérée.

Les autres chapitres du CCTP impactés par cette démarche performantielle concernent les épreuves d'étude, de convenue et de contrôle. Il convient de vérifier qu'à ces différentes étapes le béton possède les critères de perfor-

mance retenus sur les indicateurs de durabilité spécifiés. La difficulté principale résulte de la durée des essais de durabilité fixée à 90 jours. De ce fait, le guide LCPC propose des modalités pratiques de réalisation de ces épreuves compatibles avec les exigences de chantier en s'appuyant sur des mesures de certains paramètres à 28 jours. Le recours à cette démarche est facilité par l'utilisation de formules locales de béton « préqualifiées » disposant de références d'utilisation récentes.

Le maître d'ouvrage prononce la réception en s'assurant de la conformité par partie d'ouvrage des résultats obtenus sur les indicateurs, sur les valeurs d'enrobage voire d'autres mesures ou essais *in situ*. Cela constitue le point zéro durabilité et permet d'initialiser le suivi dans le temps de l'ouvrage basé sur la mesure périodique *in situ* des témoins de durée de vie sur chaque partie d'ouvrage (par exemple évolution de la carbonatation ou de la profondeur de pénétration des chlorures).

Le projet du futur fascicule 65 du CCTG (parution prévue en 2014), qui prend en compte les exigences de la norme

NF EN 13670 sur l'exécution des ouvrages en béton, développe la possibilité de recours à la méthode de conception performantielle en y consacrant un article complet mais en bridant toutefois son utilisation par des possibilités de dérogations limitées des exigences de composition prescriptives relatives aux classes d'exposition (augmentation maximale du rapport eau efficace sur liant équivalent de 0,1 ; diminution de la teneur en liant équivalent de 20 % ; limitation de la teneur en addition). Ces nouvelles dispositions actualisent les seuils des indicateurs de durabilité du guide LCPC de mars 2010 et permettent de mieux gérer les modulations de classe structurale en fonction des niveaux de performance atteints sur les indicateurs.

Ce fascicule actualise les dispositions pratiques du guide LCPC de mars 2010 relatives à la réalisation des épreuves d'étude, de convenue et de contrôle des bétons. La vérification des seuils des indicateurs spécifiés est renforcée au niveau des épreuves d'étude et de convenue et assouplie au niveau des épreuves de contrôle comme pour les valeurs de résistance. ■

Un grand merci aux experts qui ont rédigé ce document technique : Bruno Godart, *Directeur adjoint du Département Matériaux et Structures de l'IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux)*, Didier Brazillier, *Directeur de l'Ingénierie à la Direction Interdépartementale des Routes Centre-Est*, Christophe Aubagnac, *Chef du groupe OAGR du Département Laboratoire d'Autun de CETE de Lyon*, Patrick Dantec, *consultant*, Jean-Marc Potier, *chargé de mission technique au SNBPE*.

Exemple d'application de l'approche performantielle sur le viaduc de Volesvres

CHRISTOPHE AUBAGNAC, Chef du groupe OAGR du Département Laboratoire d'Autun du CETE de Lyon

Photo : CETE de Lyon – DL Lyon – DOA



→ Ouvrage en cours de construction.

Photo : CETE de Lyon – DL Autun



→ Ouvrage achevé.

Le viaduc de Volesvres est situé sur la commune de Volesvres dans le département de Saône-et-Loire et permet à la RN 79 – RCEA le franchissement de la rivière « Bourbinçe », de la route départementale 974 et du canal du Centre.

PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

Dans le cadre de la mise à deux fois deux voies de la RN 79, l'ouvrage initial a été doublé par un pont de type « caisson mixte » de hauteur constante, à 5 travées continues de 32, 40, 50, 52, et 32 m de portées en allant de Digoin vers Mâcon.

Le profil en travers de l'ouvrage comprend deux voies de circulation et une BAU, pour une largeur utile de 9,75 m.

Les culées C0 et C5 sont constituées d'un sommier de 1,20 m d'épaisseur, fondé profondément sur deux files de pieux verticaux en béton armé, coulés en place et de 1,20 m de diamètre.

Les piles, constituées d'un fût hexagonal de 2,60 m d'épaisseur surmonté d'un chevêtre architecturé de 2,50 m de hauteur, ont le même mode de fondation que les culées.

Les fondations profondes de cer-

taines piles ont été exécutées à l'intérieur de batardeaux, compte tenu de la nature des terrains en surface et de la présence de la nappe phréatique.

La charpente métallique du tablier est constituée d'un caisson ouvert de 1,69 m de hauteur, dont les âmes sont inclinées (entraxe variant de 3,45 m à 4,65 m), pour un encombrement total en largeur de 5,45 m.

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

La charpente métallique a été mise en place à la grue, au moyen de palées provisoires.

Le hourdis béton a été coulé en place par plots d'environ 40 m³, avec un phasage ayant consisté à couler en dernier les zones sur piles (pianotage).

Une durée d'utilisation du projet de 100 ans a été considérée.

Pour ce qui est des bétons, ont été pris en compte :

- le niveau C de prévention vis-à-vis de la réaction Alkali-Silice ;
- le niveau de prévention Ds vis-à-vis de la réaction Sulfatique Interne pour les pieux et semelles de fondation et le niveau de prévention Cs pour les autres parties de l'ouvrage ;

- la classe de gel modéré et un salage très fréquent pour la voie portée.

Le marché a été attribué au groupement d'entreprises CBR-TP (mandataire), SNCTP et IOA Construction pour un montant d'opération de 4 M€ HT et un délai de réalisation de 24 mois.

Les bétons ont été fournis par la société Béton Contrôlé Montceau Le Creusot (BCMC), centrales de Gueugnon et de Blanzay.

PRÉSENTATION DE LA DÉMARCHE APPLIQUÉE

La Direction Interdépartementale des Routes Centre-Est souhaite faire évoluer la prescription des bétons d'ouvrages d'art de l'approche prescriptive actuelle à l'approche performantielle, en raison de ses missions d'exploitant d'un réseau routier avec une logique de recherche de la plus grande durée d'utilisation des ouvrages avec le moins d'interventions de maintenance possible.

Elle a souhaité appliquer la démarche « approche performantielle » de façon non contractuelle, en complément d'une approche prescriptive classique, à l'occasion de la construction de l'ouvrage de doublement du viaduc de Volesvres.

LES PROPOSITIONS DU LABORATOIRE D'AUTUN

Le Département Laboratoire d'Autun (DL Autun) du CETE de Lyon a proposé à l'IFSTTAR, dans le cadre du groupe « Innovations OA » du Réseau Scientifique et Technique du MEDDE, de tester sur ce chantier l'application des Recommandations provisoires du LCPC de mars 2010 « Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton – Application de l'approche performantielle » sur les quatre principales formulations de béton :

- fondations profondes : C 30/37 XC2/XA1 ;
 - semelles, murs de front des culées, fûts des piles : C 30/37 XC4/XF1 ;
 - hourdis : C 40/50 XC4/XF1 ;
 - longrine d'ancrage des BN4, bordures, solins d'ancrage des joints de chaussée : C 35/45 XC4/XF4/XD3.
- Il s'agissait de permettre un retour d'expérience sur le caractère applicable des Recommandations provisoires du LCPC, sur la dispersion des résultats d'essais, sur la possibilité de respecter les seuils préconisés..., pour des formulations de béton « classiques » en ouvrage d'art.

En outre, l'IFSTTAR a souhaité que soit mise en œuvre une instrumentation par capteurs de corrosion dans certaines parties en béton armé de l'ouvrage.

Le DL Autun s'est ainsi rapproché du *Laboratório Nacional de Engenharia Civil* (LNEC) de Lisbonne, partenaire de l'IFSTTAR, et lui a demandé de l'aider à définir un système de surveillance de la corrosion à installer pendant la construction de l'ouvrage. Compte tenu du caractère non contractuel de l'approche performantielle des bétons sur ce chantier, le DL Autun a cherché à impliquer

avant le démarrage des études de formulation des bétons les principaux acteurs du chantier et a également associé la profession (SNBPE, Cimbéton et ATILH).

Face au retour unanimement favorable pour cette démarche innovante, le DL Autun a proposé un plan de contrôle pour les différentes formulations de béton, se conformant aux préconisations des Recommandations provisoires du LCPC et basé sur le planning général prévisionnel des travaux hors intempéries de l'entreprise.

Ce plan de contrôle faisait intervenir majoritairement les DL Autun et DL Clermont-Ferrand du CETE de Lyon et associait les laboratoires Lafarge LCR et CTG Calcia pour des essais complémentaires ou contradictoires :

- porosité accessible à l'eau (P_{eau}), essais réalisés par les 4 laboratoires ;

- perméabilité au gaz (K_{gaz}), essais réalisés par le DL Clermont-Ferrand (azote) et les deux laboratoires cimentiers ;

- résistivité électrique (ρ), essais réalisés par les DL Autun, DL Clermont-Ferrand et Lafarge LCR ;

- coefficient apparent de diffusion des ions chlorures (D_{app}) : essais réalisés par le DL Clermont-Ferrand. En outre, Lafarge LCR a réalisé des essais de carbonatation accélérée en laboratoire et des essais de carbonatation naturelle en conditions abritées ou non sur le site de l'ouvrage et sur un autre site.

Il s'agissait pour les 4 laboratoires de consolider ou d'initier leur pratique des essais de l'approche performantielle des bétons en se basant sur les modes opératoires d'essais définis à l'annexe 1 des Recommandations du LCPC : « Modes opératoires sim-

plifiés : Résistivité électrique et migration des ions chlorure sous champ électrique. Porosité à l'eau. Perméabilité au gaz Cembureau ». Pour s'assurer de pratiques les plus homogènes possible entre les 4 laboratoires, le CETE de Lyon a établi un document complémentaire « modes opératoires communs ». Les 4 formulations de béton ont donc fait l'objet d'une caractérisation par les essais de l'approche performantielle, initiée lors des épreuves de convenance et poursuivie pendant toute la durée de mise en œuvre des bétons sur le chantier.

INTERPRÉTATION DES PRINCIPAUX RÉSULTATS

Du point de vue de l'approche prescriptive contractuelle, les 3 premières formules de béton (pieux,

appuis et hourdis) sont conformes. Vis-à-vis de l'approche performantielle :

- les valeurs de porosité accessible à l'eau dépassent les seuils des Recommandations provisoires du LCPC (jusqu'à + 1,3 % en valeur absolue pour les bétons « CEM I » et jusqu'à + 3,5 % en valeur absolue pour le béton « CEM III ») ; cela s'explique vraisemblablement par le mode opératoire pratiqué pour ces mesures, avec une étape de saturation sous vide du béton de durée de 72 heures au lieu de 48 heures.

Nota : les seuils de porosité accessible à l'eau préconisés par les Recommandations provisoires du LCPC sont vraisemblablement cohérents avec le mode opératoire antérieurement pratiqué (durée de la phase de saturation sous vide au moins 2 fois plus courte).

En complément pour les mesures de porosité accessible à l'eau :

- les porosités à 90 jours mesurées sur les 4 bétons sont « du même ordre de grandeur », avec cependant des valeurs plus importantes (environ + 1 %) mesurées sur le béton « CEM III » :

- CEM I : porosités mesurées de 13,6 % à 15,7 % ;

- CEM III : porosités mesurées de 14,5 % à 16,5 % ;

- la dispersion des résultats au sein d'un même prélèvement est faible (inférieure à 3 % en valeur relative dans la quasi-totalité des cas) ;

- les écarts-types des mesures réalisées par le DL Autun sont faibles (0,6 % en valeur absolue maxi) ;

- les écarts entre laboratoires sur essais contradictoires sont la plupart du temps inférieurs à 1 % en valeur absolue (et dans tous les cas inférieurs à 10 % en valeur relative) ;

Formulation des bétons

Type de béton	Pieux	Appuis	Hourdis	Longrines
Constituants	XC2/XA1 C 30/37 S4 D max. 20 Cl 0,40	XC4/XF1 C 30/37 S3 D max. 20 Cl 0,65 RSI	XC4/XF1 C 40/50 S3 D max. 20 Cl 0,40 RSI	XC4/XF4/XD3 C 35/45 S3 D max. 20 Cl 0,40
Sable 0/2 RL Cognard site de Chazey Gueugnon (ou 0/2 R – C2B – Port sud Épervans pour la centrale de Blanzey)	345	365	340	/
Sable 0/2 RL Cognard site de Chazey Gueugnon (ou 0/4 R – C2B – Port sud Épervans pour la centrale de Blanzey)	345	375	340	620
Gravillon 4/12,5 LSC Cognard site de Chazey Gueugnon	380	300	320	400
Gravillon 10/20 LSC Cognard site de Chazey Gueugnon	680	760	775	645
CEM III/A 52,5 L CE PM-ES-CP1 NF Calcia Rombas	/	330	/	/
CEM I 52,5 N CE CP2 PM-ES-CP2 NF Lafarge Val d'Azergues	385	/	/	420
CEM I 52,5 N CE CP2 NF Calcia Beffes	/	/	350	/
Filler Bétocarb P2 OMYA/MEAC Gy	/	50	55	/
Plastiment 22S Sika	2,65	2,30	2,30	/
Sika Viscocrete Tempo 12 Sika	2,12	2,12	4,24	/
Plastiretard Sika	0,94	0,235	0,35	/
SPHRE – BASF – Glenium SKY 537	/	/	/	3,36
AEA – BASF – Micro Air 104 dilué	/	/	/	0,25
Eau efficace	185	155	146	143
Eau efficace/liant équivalent	0,48	0,47	0,42	0,34

■ les valeurs de perméabilité au gaz satisfont aux seuils des Recommandations provisoires du LCPC ;

■ les critères de conformité à 28 jours (épreuve de convenance, épreuve de contrôle) sont toujours vérifiés.

En complément pour les mesures de résistivité électrique :

– la résistivité électrique est plus faible pour les bétons CEM I (< 200 voire à 100 ohm.m) que pour le béton « CEM III » (plutôt comprise entre 200 et 400 ohm.m) ;

– la dispersion des résultats au sein d'un même prélèvement est assez importante (généralement inférieure à 20 % en valeur relative) ;

– les écarts-types des mesures réalisées par le DL Autun sont généralement de l'ordre de 10 % en valeur relative ;

– les écarts entre laboratoires sur essais contradictoires sont du même ordre de grandeur.

Du point de vue de l'approche prescriptive contractuelle, la 4^e formule de béton (longrines XF4, XD3 G+S) est conforme (à l'exception du critère « G » : facteur d'espacement des vides d'air supérieur à 200 µm mais proche de 250 µm).

Vis-à-vis de l'approche performantielle, en considérant la classe d'exposition XD3 associée à la classe XF4, les valeurs de porosité accessible à l'eau, de perméabilité au gaz et de coefficient de diffusion apparent des ions Cl⁻ ne satisfont pas aux seuils des Recommandations provisoires du LCPC.

Ce constat doit faire réfléchir aux conséquences des pratiques françaises actuelles de formulation des bétons « G+S » pour les éléments en béton armé exposés aux sels de déverglaçage. En privilégiant la résistance au gel interne et à l'écaillage du matériau béton, on s'expose de façon importante au risque de corrosion des armatures passives internes, bien que les règles de bonne conception conduisent à retenir des valeurs d'enrobage importantes, mais rarement et raisonnablement jamais supérieures à 5 cm.

PERSPECTIVES DE DÉVELOPPEMENT

La mise en œuvre de l'approche performantielle des bétons sur le chantier du viaduc de Volesvres a montré que les principes généraux

des Recommandations provisoires du LCPC étaient adaptés (il est cependant nécessaire d'accumuler de l'expérience) et a permis d'identifier plusieurs pistes pour une future révision du document.

Il est indispensable de fiabiliser les modes opératoires d'essais ; l'annexe des Recommandations provisoires du LCPC est désormais complétée par les normes :

■ NF P18-459 Porosité accessible à l'eau (mars 2010) ;

■ XP P18-463 Essai de perméabilité au gaz (novembre 2011) ;

■ XP P18-462 Coefficient de diffusion apparent des ions chlorures (juin 2012).

Il sera nécessaire de recalculer les incertitudes d'essai, en particulier pour les mesures de résistivité électrique et de perméabilité au gaz.

Il a été identifié comme étant la principale difficulté d'application certaines valeurs trop contraignantes des seuils admissibles de porosité accessible à l'eau en application du mode opératoire des Recommandations provisoires du LCPC.

Ce retour d'expérience est d'ores et déjà pris en compte dans le projet de révision du fascicule 65 du CCTG

relatif à l'exécution des ouvrages en béton.

Il conviendra ainsi d'affiner les seuils proposés par les recommandations en se calant sur davantage de résultats et en visant un optimum économique :

■ influence des modes opératoires d'essais (porosité accessible à l'eau : durée de saturation sous vide) ;

■ influence du type de ciment (CEM I /CEM III)...

Il semble également souhaitable de préciser les conditions de réception (interprétation des épreuves de contrôle) : critères de conformité intégrant une dispersion maximale admissible des résultats au sein d'un même prélèvement, critères applicables aux valeurs individuelles, aux valeurs moyennes.

Pour une bonne adhésion des acteurs, une information préalable sur la mise en œuvre de la démarche d'approche performantielle des bétons s'est révélée indispensable.

L'approche performantielle des bétons doit permettre une « nouvelle donne » pour le couple « entreprise/fournisseur de BPE », dans une logique « gagnant-gagnant ».

Il faudra trouver, collectivement, des pistes pour favoriser l'optimisation technico-économique et environnementale des formules de béton.

Il est indispensable d'anticiper pour assurer la gestion des délais sur chantier (*durée de murissement du béton de 90 jours préalable à la mesure des indicateurs de durabilité*) et la meilleure solution semble être le développement du recours à des formules régionales préqualifiées.

Il est enfin nécessaire de développer le nombre de laboratoires capables de réaliser les essais. ■

Photo : CETE de Lyon – DL Clermont-Ferrand



→ Perméabilité au gaz. Matériel Cembureau.

Photo : CETE de Lyon – DL Autun



→ Porosité à l'eau. Matériel du DL Autun.