

Approche performantielle de la durabilité des ouvrages d'art en béton

Application du guide LPC : démarche, principes et limites

Bruno GODART, François TOUTLEMONDE
IFSTTAR, département Structures et Ouvrages d'Art

**Journée technique CEREMA Dter IdF / Cotita / AFGC
« Approche performantielle et évolutions normatives »,
Marne-la-Vallée, 23 octobre 2014**

L'APPROCHE PERFORMANTIELLE

Une démarche innovante, globale et prédictive de la durabilité des structures en béton armé, basée sur :

-- la notion d'indicateurs de durabilité

-- une démarche scientifique (modèles calibrés des différentes dégradations prises en compte)

-- si possible, des formules locales de béton pré-qualifiées (pour éviter des dérives en matière d'économie et de délais)

qui nécessite que le maître d'ouvrage définisse (comme normalement prévu pour une conception selon les Eurocodes) :

-- la durée de vie souhaitée de son ouvrage

-- les fonctions de son ouvrage (utilisation, enjeux,...)

-- l'environnement local et l'exploitation attendue

UTILITÉ DE L'APPROCHE PERFORMANTIELLE

- **meilleure prise en compte du contexte local de l'ouvrage :**
utilisation des matériaux locaux
meilleure adaptation des formules de béton aux conditions environnementales
- **meilleure maîtrise de la « durée de vie » (élément du contrat)**
- **meilleure adaptation aux exigences du développement durable**
- **démarche favorisant l'innovation**

elle résout le problème des limites de l'Approche Prescriptive

- qui multiplie les référentiels prescriptifs
- et peut aboutir à des exigences de moyens difficiles à concilier (par exemple, le conflit Gel – RSI)

CONTEXTE NORMATIF D'APPLICATION DE L'APPROCHE PERFORMANTIELLE

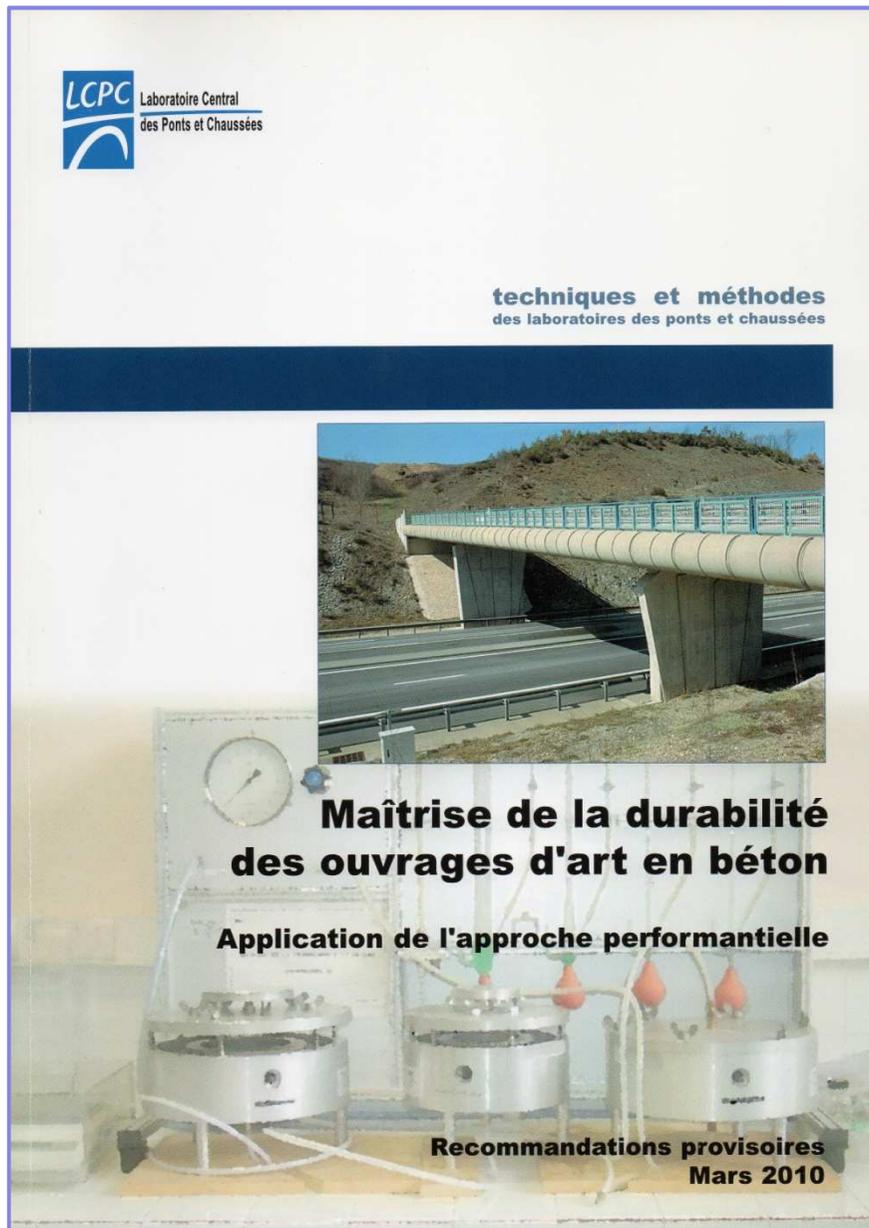
- **une méthode visée dans les textes normatifs ou contractuels :**
NF EN 1992-1-1 (note (1) du tableau 4.3 NF)
NF EN 206-1 (article 5.3.3 et annexe J)
fascicule 65 (commentaire 81.2.2)
- **mais dont la mise en œuvre détaillée a nécessité un guide**
recommandations provisoires en date de mars 2010

Evitant la difficulté du recours à un « béton de référence » nécessité par le « concept de performance équivalente » prévu à l'annexe 5.2.5.3 de la norme NF EN 206-1 et son annexe E

Utilisation de l'approche :

- Choix du maître d'ouvrage sur proposition du maître d'œuvre, *ou*
- Proposition de l'entreprise validée par le maître d'ouvrage, dans la mesure où le marché a ouvert la possibilité et où la démarche proposée est respectée

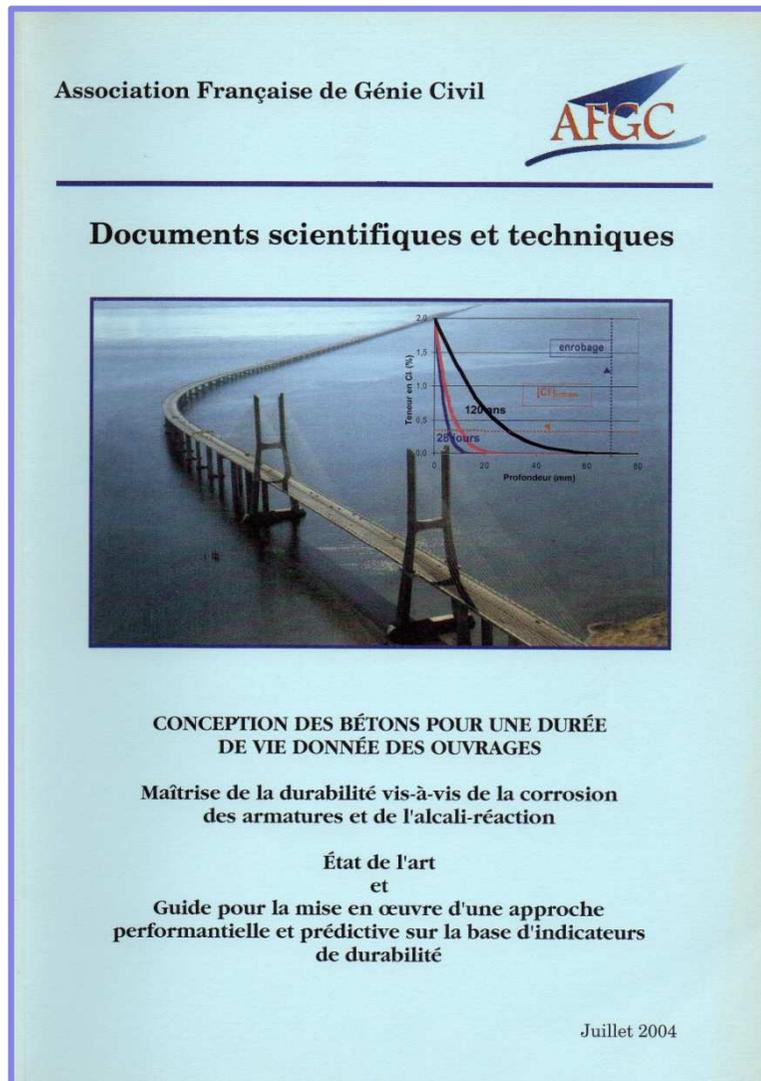
LE GUIDE (support de cet exposé)



Document issu d'un groupe de travail du réseau des LPC (17 participants)

Amélioré par un groupe de 19 relecteurs externes (Sétra, instituts de recherche, DIR, profession...)

Autres documents ayant servi de référence pour élaborer la démarche



EXÉCUTION DES OUVRAGES DE GÉNIE CIVIL EN BÉTON ARMÉ OU PRÉCONTRAIT

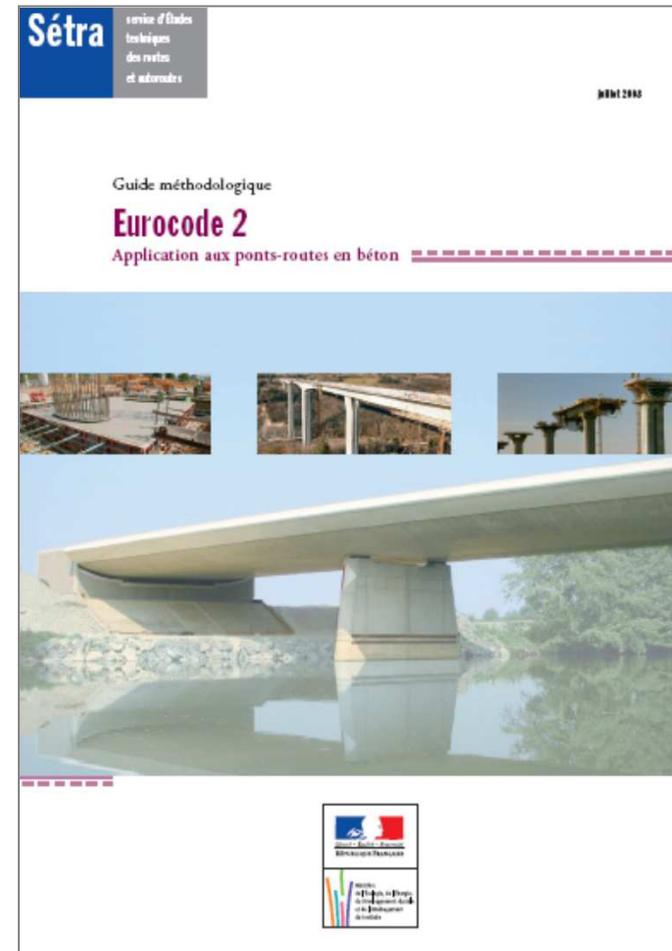
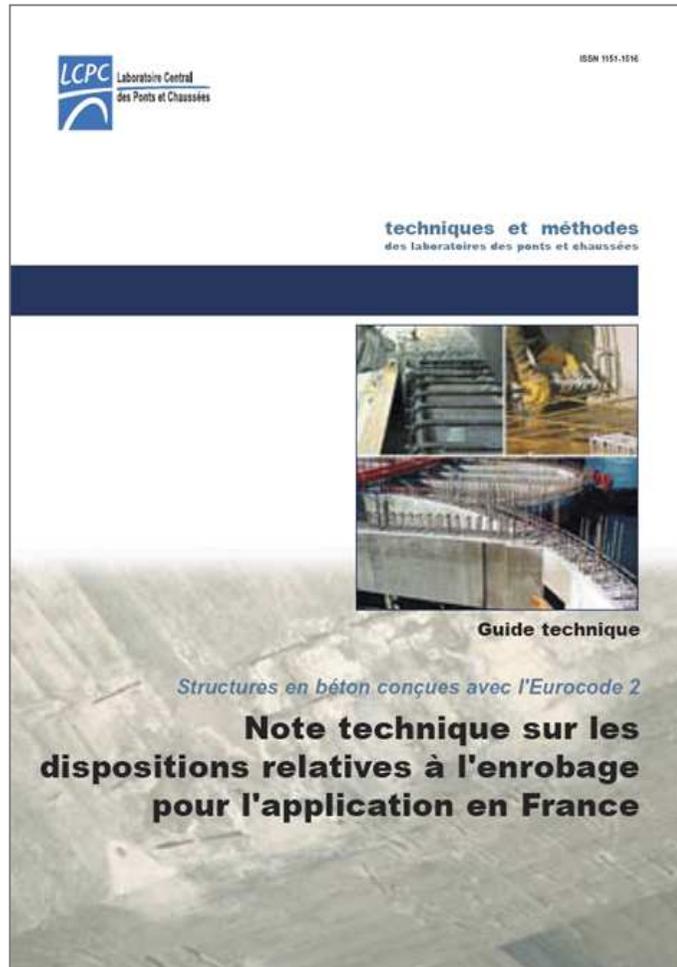
CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES GÉNÉRALES
APPLICABLES AUX MARCHÉS PUBLICS DE TRAVAUX

FASCICULE N°65

Texte du fascicule et de ses annexes

Fascicule 65 en cours de révision, la nouvelle version devrait faciliter et rendre encore plus explicite la possibilité d'adopter l'approche performantielle

Autres documents de référence

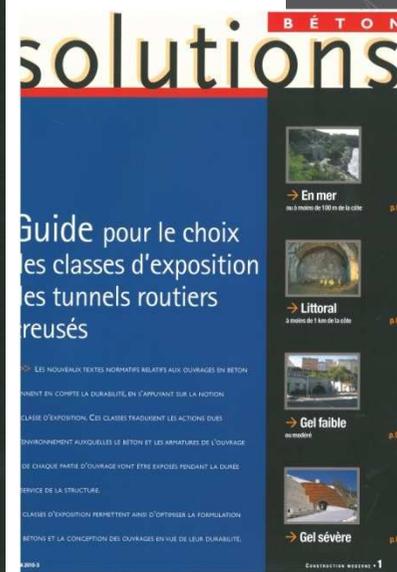
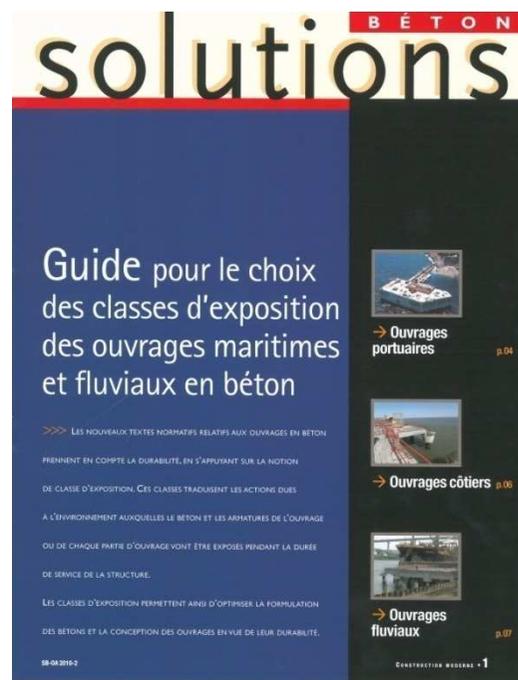
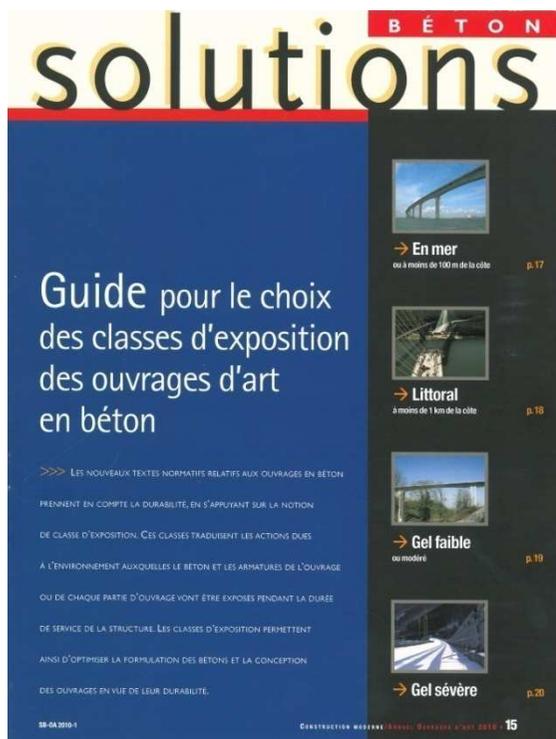
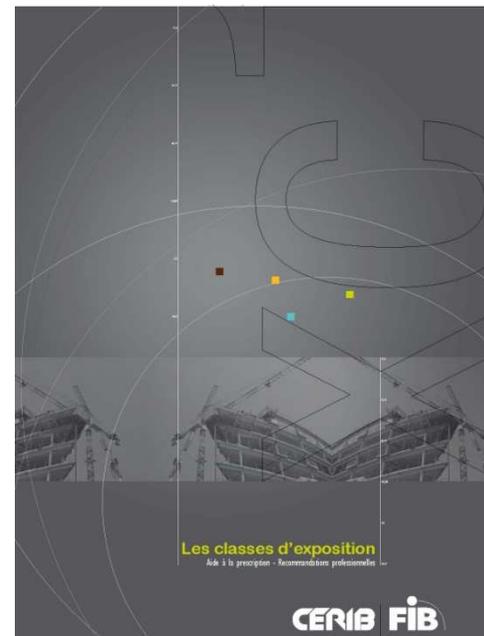


Documents d'accompagnement

Guide d'aide au choix des classes d'exposition

www.efbeton.com

Fondation
École
Française
du Béton



MISE EN ŒUVRE DE L'APPROCHE PERFORMANTIELLE

Les 6 étapes de la démarche

- 1) **Choix de la durée d'utilisation du projet**
- 2) **Prise en compte des conditions environnementales et des principaux risques de dégradation**
=> Choix des classes d'exposition et des niveaux de prévention
- 3) **Sélection des indicateurs de durabilité et des spécifications « performantielles » associées**
- 4) **Formulation des bétons - épreuves d'étude**
=> vérifications de l'atteinte des performances des formules
- 5) **Réalisation des épreuves de convenance et de contrôle**
=> vérifications des performances des formules mises en œuvre
- 6) **Point zéro durabilité et suivi (témoins de durée de vie)**

1 Choix de la durée d'utilisation du projet

Eurocode 0 (NF EN 1990) : choix de la durée d'utilisation du projet (DUP) = 100 ans pour les ponts (avec maintenance normale et adaptée)

Au delà de 100 ans, adaptation nécessaire des seuils des indicateurs de durabilité

DUP : Il s'agit de la période au cours de laquelle la structure est censée rester normalement utilisable en étant entretenue, mais sans qu'il soit nécessaire de procéder à de grosses réparations.

Catégorie de durée d'utilisation de projet	Durée indicative d'utilisation de projet (années) EN 1990	Durée indicative d'utilisation de projet Annexe nationale Tableau 2.1(NF)	Exemples
1	10	10	Structure provisoires ⁽¹⁾
2	10-25	25	Éléments structuraux remplaçables, par exemple appareils d'appui
3	15-30	25	Structures agricoles et similaires
4	50	50	Bâtiments et autres structures courantes
5	100	100	Bâtiments monumentaux, ponts et autres ouvrages de génie civil

(1) Les structures ou parties de structures qui peuvent être démontées dans un but de réutilisation ne doivent normalement pas être considérées comme provisoires

2 Prise en compte des conditions environnementales et des principaux risques de dégradation

Choix des classes d'exposition

(description des conditions environnementales)

L'approche performantielle permet de prendre en compte :

le risque de corrosion des armatures (XC, XD, XS)

l'attaque par le gel et les sels (XF)

les risques d'alcali-réaction et de RSI

Mais elle ne prend pas en compte les attaques chimiques d'origine externe

se référer pour cela aux prescriptions de la norme NF EN 206-1, du fascicule 65 et du fascicule de documentation FD P 18 011 (notamment pour le milieu marin ou pour les fondants avec sulfates où les ciments PM restent imposés)

3 Sélection des indicateurs et des spécifications associées

Vis à vis du risque de corrosion des armatures

3 Indicateurs principaux :

Porosité accessible à l'eau : P_{eau} en %

Perméabilité aux gaz : K_{gaz} en 10^{-18} m^2

Coef. de diffusion des chlorures : D_{app} en $10^{-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$

+ mesure de résistivité (pour les épreuves d'études, de convenance et de contrôle)

Calibrage pour un enrobage $c_{\min, \text{dur}}$ de 30 mm (XC) ou 50 mm (XD et XS)

Possibilité de minorer la classe structurale de 2 (EN 1992 tab 4.3NF)

Classe d'exposition	DUP de 100 ans	Seuils des indicateurs à 90 jours	Exemples de partie d'ouvrage
XC1 sec ou humide en permanence XC2 humide rarement sec		$P_{\text{eau}} < 15$	Fondations (immergées ou non) Parties enterrées des appuis
XC3 humidité modérée XC4 alternance d'humidité et de séchage		$P_{\text{eau}} < 13$ ET $K_{\text{gaz}} < 150$	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		$P_{\text{eau}} < 13$ ET $D_{\text{app}} < 7$	Ouvrage 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		$P_{\text{eau}} < 11$ ET $K_{\text{gaz}} < 150$ ET $D_{\text{app}} < 3$	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

3 Sélection des indicateurs et des spécifications associées

Vis-à-vis des dégradations dues au gel et aux sels de déverglaçage

	Zone de gel modéré	Zone de gel sévère
Salage peu fréquent	XF 1 Pas de spécifications propres au gel (se reporter au tableau corrosion – classe XC4)	XF3 (G) $L_{\text{bar}} \leq 250 \mu\text{m}$ $\Delta\varepsilon \leq 400 \mu\text{m/m}$ $f^2 / f_0^2 \geq 75\%$ $f_{c28} \geq 30 \text{ MPa}$
Salage fréquent	XD3 (se reporter au tableau corrosion) XD3 + XF2 pour les éléments très exposés (teneur en air $\geq 4\%$)	XF4 (G+S) $L_{\text{bar}} \leq 200 \mu\text{m}$ $E_c \leq 600 \text{ g/m}^2$ $\Delta\varepsilon \leq 400 \mu\text{m/m}$ $f^2 / f_0^2 \geq 75\%$ $f_{c28} \geq 35 \text{ MPa}$
Salage très fréquent	XF4 (G+S)	XF4 (G+S)

3 Sélection des indicateurs et des spécifications associées

Vis-à-vis du risque de réaction sulfatique interne (RSI)

Classes d'exposition	Niveau de prévention/Critère (pour un ouvrage courant)	Exemple
XH2 Alternance d'humidité et de séchage, humidité élevée	Bs $T_{\max} < 75^{\circ}\text{C}$ <i>OU</i> $T_{\max} < 85^{\circ}\text{C}$ et critère de performance en expansion <i>OU</i> $T_{\max} < 85^{\circ}\text{C}$ et conditions sur choix du ciment	Piles et tabliers
XH3 En contact durable avec l'eau immersion permanente, stagnation d'eau à la surface, zone de marnage	Cs $T_{\max} < 70^{\circ}\text{C}$ <i>OU</i> $T_{\max} < 80^{\circ}\text{C}$ et critère de performance en expansion <i>OU</i> $T_{\max} < 80^{\circ}\text{C}$ et conditions sur choix du ciment	Pieux et semelles de fondation

3 Sélection des indicateurs et des spécifications associées

Vis-à-vis du risque d'alcali-réaction

**niveau de prévention B
(cas des ouvrages courants)**

granulats non réactifs

bilan des alcalins

ou

essai de performance :

$\Delta\varepsilon < 0,020\%$ selon l'essai de performance vis-à-vis de l'alcali-réaction suivant la norme NF P18-454 et FD P18-456



4 Formulation des bétons et épreuves d'études

Attention particulière => durée de mûrissement de 90 j
pour certains essais

Prise en compte de la démarche dans le PAQ de l'opération
(compétences, moyens, modes opératoires d'essai...)

=> Le fournisseur de béton doit disposer de capacités
techniques et de compétences

Intérêt de disposer de formules locales préqualifiées

=> concept de références probantes d'emploi disposant
de mesures des indicateurs

5 Epreuves de convenance et de contrôle

Formalisation des critères d'acceptation

Epreuves de convenance :

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

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

Epreuves de contrôle :

Epreuves de contrôle à 28 jours	Epreuves de contrôle à 90 jours
$\rho(\text{contrôle})_{28j} \geq 0,8 \rho(\text{étude})_{28j}$ $P_{\text{eau}}(\text{contrôle})_{28j} \leq 1,1 P_{\text{eau}}(\text{étude})_{28j}$	$P_{\text{eau}}(\text{contrôle})_{90j} \leq P_{\text{eau}}(\text{spécifiée au marché})_{90j}$ $K_{\text{gaz}}(\text{contrôle})_{90j} \leq K_{\text{gaz}}(\text{spécifiée au marché})_{90j}$ $D_{\text{app}}(\text{contrôle})_{90j} \leq D_{\text{app}}(\text{spécifiée au marché})_{90j}$

6 Point zéro durabilité

Réception de l'ouvrage avec initiation du suivi dans le temps

Établissement par parties d'ouvrage

d'une synthèse «durabilité »

**(spécifications attendues, indicateurs retenus et seuils,
mesures des indicateurs, mesures des enrobages)**

Définition des parties d'ouvrage

qui feront l'objet d'un suivi de durabilité

(nature et périodicité selon conditions d'exposition)

Inspections ciblées avec mesure des témoins de durée de vie

6 Point zéro : exemples de témoins de vie

Carbonatation :

Evaluation de la profondeur de carbonatation (zone ou $\text{pH} < 9$)

ou

Evolution du profil de teneur en CaCO_3

En présence de chlorures

Profondeur de pénétration des chlorures (zone ou $[\text{Cl}^-] > [\text{Cl}^-]_{\text{crit}}$)

ou

Évolution du profil de chlorures

$[\text{Cl}^-]_{\text{crit}}$	0,15 % BP pré-tension
	0,20 % BP post-tension
	0,40 % BA
(en % de Cl^-)	0,65 % BA avec CEM III

EN GUISE DE CONCLUSION

L'approche performantielle est ...

- une façon de répondre à l'**enjeu croissant de durabilité** dans un cadre rationnel et « contractuel »
- un choix de maîtrise d'ouvrage, à assumer (en cohérence avec la **responsabilisation** issue des Eurocodes)
- une approche « rôdée » dans le cadre de grands ouvrages concédés (**justification** de durabilité)

La nécessaire **anticipation de la problématique « matériau »** :
une contrainte qui peut être une chance ?

L'approche performantielle **ne dispense** ni de bonne conception, ni de qualité d'exécution, ni de contrôle, ni d'entretien...