



Journée technique

CONSTRUIRE DES OUVRAGES EN BETON AVEC LE NOUVEAU FASCICULE 65 DU CCTG

Laval - 26 septembre 2017

La démarche Performantielle

Benoit THAUVIN
Cerema Ouest
Saint-Brieuc



Révision du fascicule 65 du CCTG

Deux démarches pour justifier la durabilité des bétons :

§ 8.1.1.3 Spécifications de composition liées aux classes d'exposition

§ 8.1.1.4 Spécifications performantielles liées aux classes d'exposition
(avec dérogation partielle au § 8.1.1.3)



Spécification de composition en approche performantielle :

Introduction de 2 approches performantielles pour justifier la durabilité des bétons

Méthode de conception performantielle (approche absolue)

Basée sur le guide LCPC de 2010 (avec des seuils modifiés)

Concept de performance équivalente (approche comparative)

Basée sur le guide FNTP/FFB/CERIB/FIB de 2009 (avec des exigences renforcées sur le béton de référence)



... Avec des garde-fous !

Révision du fascicule 65 du CCTG

- Ouvrir à l'approche performantielle en introduisant des garde-fous : les écarts par rapport à l'approche prescriptive sont bornés
- Laisser le choix entre approche absolue et approche comparative
- Se référer aux deux guides existants
- Les compléter et les amender en fonction des retours d'expérience
- Ne pas ouvrir aux classes XA car il y a débat sur les protocoles d'essai
- Dans la méthode comparative, résoudre le problème statistique par un choix très sécuritaire du béton de référence
- Garantir la conformité à la norme des bétons ainsi formulés et préciser la répartition des responsabilités

Conformité à la norme et répartition des responsabilités

Deux cas se présentent :

- BCP ou BICP : le prescripteur définit une composition et en passe commande au producteur
- BPS ou BIPS :
 - le prescripteur commande un béton conforme à l'annexe NA.F de la norme (durabilité à 50 ans basée sur une approche prescriptive)
 - il commande également, au titre des exigences complémentaires, des valeurs des indicateurs de durabilité correspondant aux exigences du fascicule 65 pour passer de 50 à 100 ans

Dans les deux cas (BPS ou BIPS), la formulation par les approches performantielles du fascicule 65 ne remet pas en cause la conformité du béton à la norme.

=> La composition du béton doit respecter l'ensemble des exigences de l'annexe NA.F de la norme NF EN 2016/CN

Garde-fous

Par rapport au tableau 8.B de l'approche prescriptive :

	Classes d'exposition																
	Corrosion induite par carbonatation				Corrosion induite par les chlorures					Attaque gel / dégel			Environnements chimiquement agressifs				
					Eau de mer			Chlorures autres que l'eau de mer									
XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XS4	XF1	XF2	XF3	XF4 ^{a)}	XA1	XA2	XA3 ^{a)}			
Rapport $E_{eff}/Liant$ éq maximal ^{d)}	0,60	0,60	0,55	0,50 ^{b)}	0,50	0,50	0,45	0,40	0,40	0,40	0,40	0,45	0,50	0,45	0,40		
Classe de résistance minimale ^{c)}	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37 ^{m)}	C30/37 ^{m)}	C35/45	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45 ^{m)}	C30/37	C35/45	C40/50		
Teneur mini en liant éq (kg/m ³) ^{b) c) d)}	280	280	300	330	330	330	350	330	330	330	330	385 ^{m)}	330	350	380		
Absorption d'eau maxi pour les produits préfabriqués en usine (%)	6,5 ^{m)}	6,5 ^{m)}	6 ^{m)}	6 ^{m)}	5,5 ^{m)}	5,5 ^{m)}	5 ^{m)}	6	6	6	6	5,5 ^{m)}	5 ^{m)}	4,5 ^{m)}	4,5 ^{m)}		
Teneur minimale en air (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	- ^{o)}	4 ^{e)}	4 ^{e)}	-	-	-

Garde-fous spécifications performantielles :
 $E_{eff}/Liant \leq 0,60$ (0,50 + 0,10)
 $Liant \geq 264 \text{ kg/m}^3$ (0,8x330)

- Le rapport $E_{eff}/Liant$ équivalent ne doit pas dépasser la limite du tableau de plus de 0,10
- La teneur en liant équivalent doit être au moins égale à 80% de celle imposée par le tableau
- Le rapport maximal $A/(A+C)$ doit rester inférieur aux limites suivantes en fonction de la nature du ciment de base :

Garde-fous

Tableau 8.C – Limitation du rapport $A/(A+C)$ pour les spécifications performantielles

	Cas du CEM I	Cas du CEM II/A
Cendres volantes	0,35 NF EN206/CN : 0,30	0,35 Sauf CEM II/A-V, D ou Q: 0,20
Fumées de silice	0,10	0,10 Sauf CEM II/A-D ou Q: 0,0
Métakaolin type A	0,2 NF EN206/CN : 0,15	0,20 Sauf CEM II/A-V : 0,10 Et CEM II/A-D ou Q: 0,0
Laitier moulu classe A ou B	0,65 NF EN206/CN : 0,30 à 0,50	0,55
Laitier moulu classe C	0,3	0,2
Additions calcaires catégorie A	0,4 NF EN206/CN : 0,30	0,25
Additions calcaires catégorie B	0,3	0,2
Additions siliceuses de minéralogie QZ	0,3	0,2

Démarche

- 1 Choix de la durée d'utilisation du projet
- 2 Prise en compte des conditions environnementales et des principaux risques de dégradation => **Classes d'exposition**
- 3 Sélection des **indicateurs de durabilité** et des spécifications (seuils) associées
- 4 Formulations des bétons – **Épreuves d'études**
- 5 Vérification des performances des bétons – **Épreuves de convenance** et **Épreuves de contrôles**

Indicateurs utilisés

(« grandeurs associée à la durabilité »)

pour le risque de corrosion des armatures

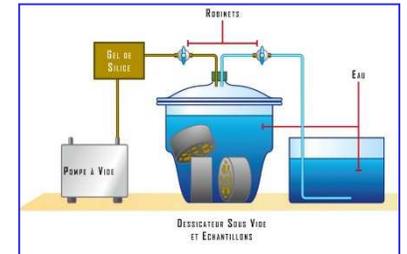
	Approche absolue	Approche comparative
Indicateur général	$P_{\text{eau } 28j}$	$Ab_{\text{eau } 28j}$
XC1/XC2	$P_{\text{eau } 90j}$	Carbo _{90j}
XC3/XC4	$P_{\text{eau } 90j}, K_{\text{gaz } 90j}$	Carbo _{90j}
XD1/XD2 XS1/XS2	$P_{\text{eau } 90j}, D_{\text{app } 90j}$	$D_{\text{app } 90j}$
XD3 XS3	$P_{\text{eau } 90j}, K_{\text{gaz } 90j}, D_{\text{app } 90j}$	$D_{\text{app } 90j}$

Échéance d'essais : 90 jours ! => A anticiper dans le planning ...

Essais

Essais de porosité et de masse volumique : NF P18-459

Indicateur : Porosité accessible à l'eau P_{eau} (%)



Essai accéléré de migration des chlorures en régime non stationnaire : XP P18-462

Indicateur : Coefficient de diffusion apparent des chlorures D_{app} ($10^{-12} \cdot \text{m}^2/\text{s}$)



Essai de perméabilité au gaz sur béton durcis : XP P18-463

Indicateur : Perméabilité au gaz K_{gaz} ($10^{-18} \cdot \text{m}^2$)



Carbonatation accélérée : XP P18-458

Essai de performance



Essai d'absorption d'eau : NF EN 13369, Annexe G

Indicateur : Absorption d'eau Ab_{eau} (%)

Spécifications

En approche absolue : (§ 8.1.1.4.1. Méthode de conception performantielle)

Les seuils du guide LCPC de 2010 sont modifiés pour la prévention du risque de corrosion des armatures :

	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
$P_{\text{eau } 90j}$ (%) *	15,5	15,5	15	14,5	14	14	13
$K_{\text{gaz } 90j}$ (10^{-18} m ²)	-	-	200	200	-	-	200
$D_{\text{app } 90j}$ (10^{-12} m ² /s)	-	-	-	-	7	7	3,5

$P_{\text{eau } 90j}$: Porosité accessible à l'eau par absorption sous vide mesurée selon la norme NF P 18-459, exprimée en %.

$K_{\text{gaz } 90j}$: Perméabilité apparente au gaz mesurée selon la norme XP P 18-463 après séchage complet, exprimée 10^{-18} m².

$D_{\text{app } 90j}$: Coefficient de diffusion apparent des chlorures mesuré selon la norme XP P 18-462, exprimé en 10^{-12} m²/s.

* Seuils correspondant, pour une DUP de 100 ans, aux enrobages de la classe structurale S6 avant minoration éventuelle liée à la nature du liant ou à un enrobage compact ; aucune minoration liée à la classe de résistance n'est alors possible.

Spécifications

Possibilité de moduler la classe structurale en introduisant des seuils plus sévères (remplace la modulation liée à la « classe de résistance » du tableau 4.3 NF de l'EC2) :

		XC1	XC2	XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
Minoration d'1 classe	$P_{\text{eau } 90j}$ (%)	15	15	14,5	14	13,5	13,5	12,5
	$K_{\text{gaz } 90j}$ (10^{-18} m^2)	-	-	175	175	-	-	150
	$D_{\text{app } 90j}$ ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	-	-	-	-	5,5	5,5	3
Minoration de 2 classes	$P_{\text{eau } 90j}$ (%)	14	14	14	13,5	13	13	12
	$K_{\text{gaz } 90j}$ (10^{-18} m^2)	-	-	150	150	-	-	100
	$D_{\text{app } 90j}$ ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	-	-	-	-	4,5	4,5	2,5

⇒ Réduction possible de l'enrobage ($C_{\text{min,dur}}$)

Spécifications

Modulation de la classe structurale S :

Ouvrages d'art (DUP : 100 ans) : Classe structurale S6

Eurocode 2 : Modulation possible de la classe structurale en fonction de :

- ~~Classe de résistance~~
- La nature du liant
- Compacité de l'enrobage

Cas de l'approche performantielle :
Minoration de 1 ou 2 selon les
spécifications performantielles prescrites

Exigence environnementale pour $C_{min,dur}$ (armatures de béton armé)							
Classe structurale	Classe d'exposition						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Spécifications

En approche comparative : (*§ 8.1.1.4.2. Concept de performance équivalente*)

La définition du béton de référence du guide FNTF de 2009 est modifiée :

- Béton conforme au tableau de l'approche prescriptive (8B), sans additions, avec un dosage en ciment supérieur de 5 % au dosage minimal et une classe de résistance supérieure d'une classe à la classe minimale pour la classe d'exposition considérée
- Respect des exigences du tableau 8.F :

Classes d'exposition	Type de ciment	Valeur maximale d'absorption d'eau
XC	CEM I ou CEM II, classe 42,5 ou 52,5	XC1, XC2 : 6,5 % XC3, XC4 : 6 %
XD	CEM II-S ou CEM II-V PM (non ES), classe 42,5 ou 52,5	XD1 : 6 % XD2 : 5,5 % XD3 : 5 %
XS	CEM II-S ou CEM II-V PM (non ES), classe 42,5 ou 52,5	XS1, XS2 : 5,5 % XS3 : 5 %

- Granulats identiques au béton à tester
- Utilisation d'additions non admises

Épreuve d'étude

- Les résultats doivent être conformes pour toutes les grandeurs associées aux classes d'exposition (gâchée nominale et gâchées dérivées « eau ») :
 $P_{\text{eau } 90\text{j}}$, $K_{\text{gaz } 90\text{j}}$, $D_{\text{app } 90\text{j}}$, **Carbo** $_{90\text{j}}$
- Détermination des indicateurs généraux suivants en vue des épreuves de convenance et de contrôle :
 - Porosité accessible à l'eau à 28 jours en approche absolue : $P_{\text{eau } 28\text{j}}$
 - Absorption d'eau à 28 jours en approche comparative : $Ab_{\text{eau } 28\text{j}}$
- Dispense par références d'utilisation : Pour chaque grandeur associée à la durabilité, les résultats d'essais des épreuves d'étude, de convenance et de contrôle vérifient :
 - Nbre de prélèvement > 3
 - Résultats de chaque prélèvement conformes

Possibilité introduite par le fascicule 65 :

Détermination des grandeurs associées à la durabilité à 28 jours

Si les spécifications performantielles sont vérifiées à cette échéance, on peut retenir l'âge de 28 jours pour l'évaluation de la conformité des épreuves de convenance et de contrôles.

Épreuve de convenance

- **En approche absolue :**

- $P_{\text{eau}}(\text{convenance})_{28j} < 1,1 \cdot P_{\text{eau}}(\text{étude})_{28j}$
- Les résultats doivent être conformes pour toutes les grandeurs associées aux classes d'exposition
($P_{\text{eau } 90j}$, $K_{\text{gaz } 90j}$, $D_{\text{app } 90j}$)

- **En approche comparative :**

- $Ab_{\text{eau}}(\text{convenance})_{28j} < Ab_{\text{eau}}(\text{étude})_{28j} + 0,5$
- Les résultats doivent être conformes pour toutes les grandeurs associées aux classes d'exposition
($D_{\text{app } 90j}$, Carbo _{90j})

Épreuve de contrôle

- Indicateurs généraux (P_{eau} , Ab_{eau}) mesurés tous les 500 m³ ou tous les mois, au 1er terme échu
- Grandeurs associées aux classes d'exposition mesurées tous les 3 mois : $P_{\text{eau } 90j}$, $K_{\text{gaz } 90j}$, $D_{\text{app } 90j}$, **Carbo** _{90j}

- **En approche absolue :**

- $P_{\text{eau}}(\text{contrôle})_{28j} < 1,1 \cdot P_{\text{eau}}(\text{étude})_{28j}$
- Porosité à l'eau $\leq 1,1 \cdot$ (Porosité à l'eau limite autorisée)
- Perméabilité au gaz \leq Perméabilité au gaz limite autorisée + $30 \cdot 10^{-18}$
- Coefficient de diffusion des chlorures $\leq 1,3 \cdot$ (Coefficient de diffusion des chlorures limite autorisé)

Épreuve de contrôle

- **En approche comparative :**

- $Ab_{\text{eau}}(\text{contrôle})_{28j} < Ab_{\text{eau}}(\text{étude})_{28j} + 0,5$
- Porosité à l'eau $\leq 1,1$ *(Porosité à l'eau limite autorisée)
- Absorption d'eau \leq (Absorption d'eau limite autorisée) + 0,5
- Coefficient de diffusion des chlorures $\leq 1,3$ *(Coefficient de diffusion des chlorures du béton de référence caractérisé lors de l'étude)
- Profondeur de carbonatation accélérée $\leq \min[1,5$ *(Profondeur de carbonatation accélérée du béton de référence caractérisé lors de l'étude),(Profondeur de carbonatation accélérée du béton de référence caractérisé lors de l'étude) +5mm]

En résumé

- Une dérogation partielle au tableau de l'approche prescriptive
- Des spécifications issues des recommandations provisoires, amendées ou complétées :
 - Seuils revus en approche absolue
 - Béton de référence très encadré en approche comparative
- Par rapport au guide LCPC de 2010 (approche absolue), épreuves de convenance renforcées pour anticiper les problèmes

Une note importante

« Lorsqu'il est fait appel à ces méthodes les différents intervenants doivent adopter les dispositions organisationnelles et mobiliser les capacités techniques et les compétences actualisées nécessaires à la conduite d'une telle démarche. En particulier les laboratoires en charge de réaliser les essais doivent disposer de références justifiant la pratique effective de ces essais et la vérification des résultats obtenus sur la base d'essais d'intercomparaison. »

Merci

Spécifications

Prévention des risques d'alcali-réaction :

Renvoi au §2.3.2 Guide LCPC 2010

La démarche de prévention actuelle* offre la possibilité d'appliquer une approche performantielle.

Indicateurs de durabilité (à réserver au cas des granulats PR) :

- Bilan en alcalins équivalents de la formule : $[\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}]$
- Déformation de gonflement d'éprouvette (NF 18-454, FD P18-456)

** Guide LCPC 1994, actualisé par le FD P18-464 d'avril 2014*

Spécifications

Prévention des risques de RSI :

Renvoi au §2.3.2 Guide LCPC 2010

La démarche de prévention actuelle* offre la possibilité d'appliquer une approche performantielle, mais reste partiellement fondée sur des spécifications de moyens.

Indicateurs de durabilité (à réserver aux pièces critiques) :

- Température maximale atteinte au cœur de la pièce (T_{\max})
- Déformation de gonflement (essai de performance LPC n° 66)

* *Guide LCPC 2007*

Spécifications

Prévention des risques de RSI :

Classes d'exposition	Niveaux de prévention et critères	Exemples de parties d'ouvrages
XH2 Alternance d'humidité et de séchage, humidité élevée	<p>Bs</p> <p>$T_{max} < 75^{\circ}\text{C}$</p> <p>ou</p> <p>$T_{max} < 85^{\circ}\text{C}$ et critère de performance en expansion</p> <p>ou</p> <p>$T_{max} < 85^{\circ}\text{C}$ et une des 3 conditions de la liste ci-dessous est respectée*</p>	Piles et tabliers
XH3 En contact durable avec l'eau, immersion permanente, stagnation d'eau à la surface, zones de marnage	<p>Cs</p> <p>$T_{max} < 70^{\circ}\text{C}$</p> <p>ou</p> <p>$T_{max} < 80^{\circ}\text{C}$ et critère de performance en expansion</p> <p>ou</p> <p>$T_{max} < 80^{\circ}\text{C}$ et une des 3 conditions de la liste ci-dessous est respectée*</p>	Pieux et semelles de fondation
	<p>Ds</p> <p>$T_{max} < 65^{\circ}\text{C}$</p> <p>ou</p> <p>$T_{max} < 75^{\circ}\text{C}$ et ciment ES ** et validation de la formule par un laboratoire indépendant expert en RSI</p>	Partie immergée d'un ouvrage exceptionnel

* Liste des trois conditions :

- utilisation d'un ciment conforme à la norme NF P15-319 (ES) excepté les ciments CEM I, CEM II/A-L et CEM III/A-LL pour les bétons de pièces critiques coulés en place.
Remarque : Cette condition déroge aux recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne publiées en août 2007. Ceci résulte de récents travaux en laboratoire qui montrent un risque d'expansion modérée pour des bétons de pièces critiques coulés en place et formulés avec ce type de ciment en raison du maintien à une température excessive pendant plusieurs jours.
- utilisation de ciments non conformes à la norme NF P 15-319 (ES) de type CEM II/B-V, CEM II/B-S, CEM II/B-Q, CEM II/B-M (S-V), CEM III/A ou CEM V, ciments dont la teneur en SO_3 ne doit pas excéder 3 %, et fabriqués à partir d'un clinker dont la teneur en C_3A ne doit pas excéder 8 %.
- utilisation, en combinaison avec du CEM I, de cendres volantes conformes à la norme NF EN 450-1, de laitiers de haut fourneau moulus conformes à la norme NF EN 15167-1, ou encore de pouzzolanes naturelles calcinées (norme française en préparation). La proportion d'additions doit être d'au moins 20 % sous réserve de respecter les exigences des normes (en particulier la norme NF EN 206-1). Le CEM I utilisé doit respecter les exigences suivantes : C_3A (rapporté au ciment) $\leq 8\%$ et $\text{SO}_3 \leq 3\%$.

** utilisation d'un ciment conforme à la norme NF P15-319 (ES) avec dans le cas des CEM I et CEM II/A une limitation à 3 kg/m^3 de la teneur en alcalins équivalents actifs du béton.

Spécifications

Prévention des risques liés au gel et à l'écaillage :

Renvoi au §2.3.3 Guide LCPC 2010

La démarche de prévention actuelle* offre la possibilité d'appliquer une approche performantielle.

Indicateurs de durabilité (selon intensité du gel et fréquence de salage) :

- Facteur d'espacement du réseau de bulles d'air (L_{bar})
- Teneur en air occlus sur béton frais (t_{air})
- Ecaillage, masse écaillée sous cycle agressif (E_c)
- déformation de gonflement (essai de performance gel interne) en liaison avec fréquences de raisonance (f^2/fo^2)
- Résistance à la compression à 28 jours (Rc_{28})

* *Guide LCPC 2003*

Spécifications

Prévention des risques liés au gel et à l'écaillage :

	Zones de gel modéré	Zones de gel sévère
Salage peu fréquent	<p>XF1</p> <p>Pas de spécifications propres au gel (se reporter au tableau 1 corrosion – classe XC4)</p>	<p>XF3 (G)</p> <p>$L_{\text{bar}} \leq 250 \mu\text{m}$ (1) $\Delta\varepsilon \leq 400 \mu\text{m/m}$ (2) $f^2/f_0^2 \geq 75\%$ (3) $f_{c28} \geq 30 \text{ MPa}$</p>
Salage fréquent	<p>XD3</p> <p>(se reporter au tableau 1 corrosion) + XF2 pour les parties d'ouvrages très exposées (*)</p> <p>Teneur en air $\geq 4 \%$</p>	<p>XF4 (G+S)</p> <p>$L_{\text{bar}} \leq 200 \mu\text{m}$ (1) $E_c \leq 600 \text{ g/m}^2$ (4) $\Delta\varepsilon \leq 400 \mu\text{m/m}$ (2) $f^2/f_0^2 \geq 75\%$ (3) $f_{c28} \geq 35 \text{ MPa}$</p>
Salage très fréquent	<p>XF4 (G+S)</p> <p>$L_{\text{bar}} \leq 200 \mu\text{m}$ (1) $E_c \leq 600 \text{ g/m}^2$ (4) $\Delta\varepsilon \leq 400 \mu\text{m/m}$ (2) $f^2/f_0^2 \geq 75\%$ (3) $f_{c28} \geq 35 \text{ MPa}$</p>	<p>XF4 (G+S)</p> <p>$L_{\text{bar}} \leq 200 \mu\text{m}$ (1) $E_c \leq 600 \text{ g/m}^2$ (4) $\Delta\varepsilon \leq 400 \mu\text{m/m}$ (2) $f^2/f_0^2 \geq 75\%$ (3) $f_{c28} \geq 35 \text{ MPa}$</p>

- (1) Facteur d'espacement suivant la norme ASTM C 457
- (2) Allongement relatif issu de l'essai de gel interne suivant la norme NF P18-424 ou NF P18-425
- (3) Rapport des carrés des fréquences de résonance suivant la norme P18-414
- (4) Perte de masse surfacique selon l'essai d'écaillage suivant la norme XP P18-420

Remarque : Dans l'attente d'une évolution des [Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel – LCPC, décembre 2003 – (Guide technique)], l'approche performantielle permet l'utilisation de CEM III/A ou B en classe d'exposition XF3 (G) sous réserve de satisfaire les exigences ci-dessus concernant l'allongement ($\Delta\varepsilon \leq 400 \mu\text{m/m}$) et la fréquence de résonance ($f^2/f_0^2 \geq 75\%$) et la résistance caractéristique à 28 jours ($f_{c28} \geq 30 \text{ MPa}$). En outre, la mesure du facteur d'espacement L_{bar} (étude) sera réalisée pour servir de référence lors des épreuves de contrôle.