

# Concevoir, construire et gérer des structures durables en béton

Approche performantielle et évolutions normatives

---

## Recommandations pour la rédaction des CCTP



Eric OLLINGER, Cerema/DTecITM

ENPC Marne-la-Vallée - 23 octobre 2014

# Sommaire

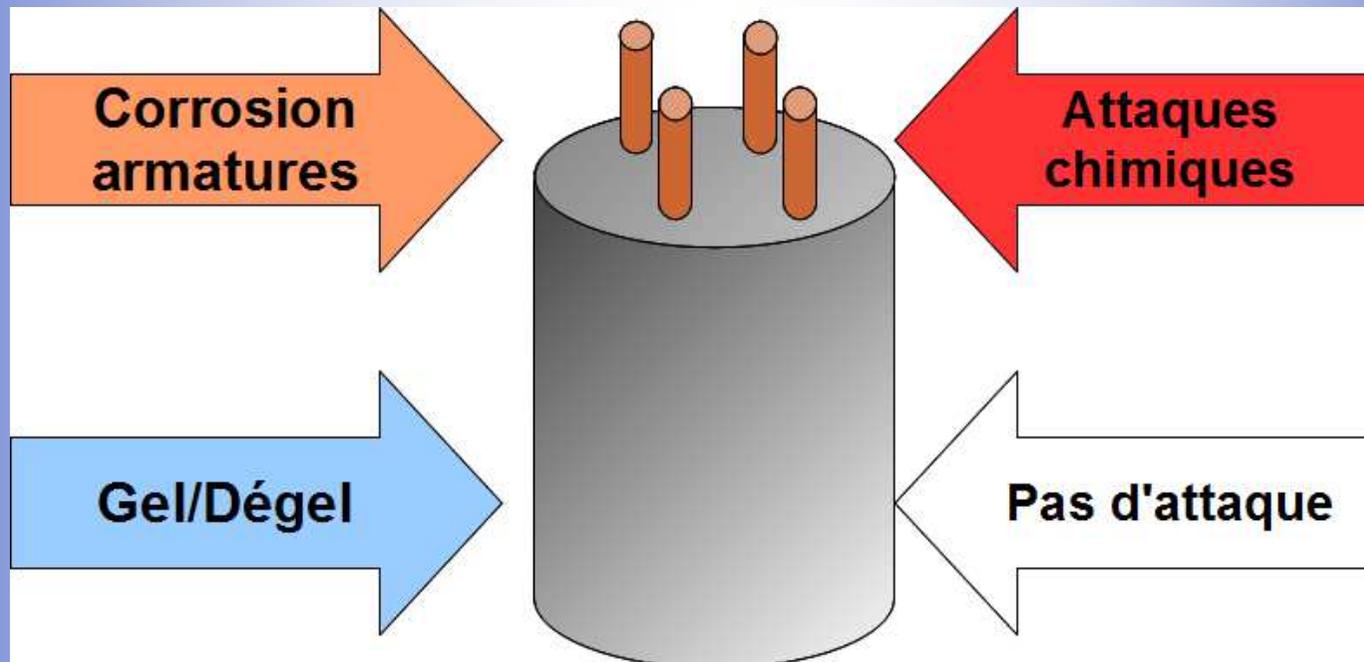
- Dispositions générales
- Application sur un ouvrage
- Choix des classes d'exposition
- Détermination de l'enrobage selon EC2
- Définition des bétons
- Epreuves d'études
- Epreuves de convenance
- Epreuves de contrôle

# Dispositions générales

Il s'agit du chapitre du CCTP qui décrit l'ouvrage (données générales) ainsi que le contexte climatique et environnemental

Le maître d'ouvrage doit définir :

- La durée d'utilisation de projet de l'ouvrage – Pour un OA : 100 ans
- La classe d'exposition à l'environnement des différents parties de l'ouvrage : chapitre « Provenance, qualité et préparation des matériaux)



# Dispositions générales

Le maître d'ouvrage doit définir :

- Le niveau de prévention vis-à-vis des risques liés à l'alcali-réaction :

Catégorie de l'ouvrage	Classes d'exposition		
	XAR1	XAR2	XAR3
I : éléments non porteurs, ouvrages provisoires ou facilement remplaçables, produits préfabriqués en béton	A	A	A
II : la plupart des ouvrages de génie civil	A	B	B
III : ouvrages exceptionnels : centrale nucléaire, barrage	C	C	C

# Dispositions générales

Le Maître d'ouvrage doit définir:

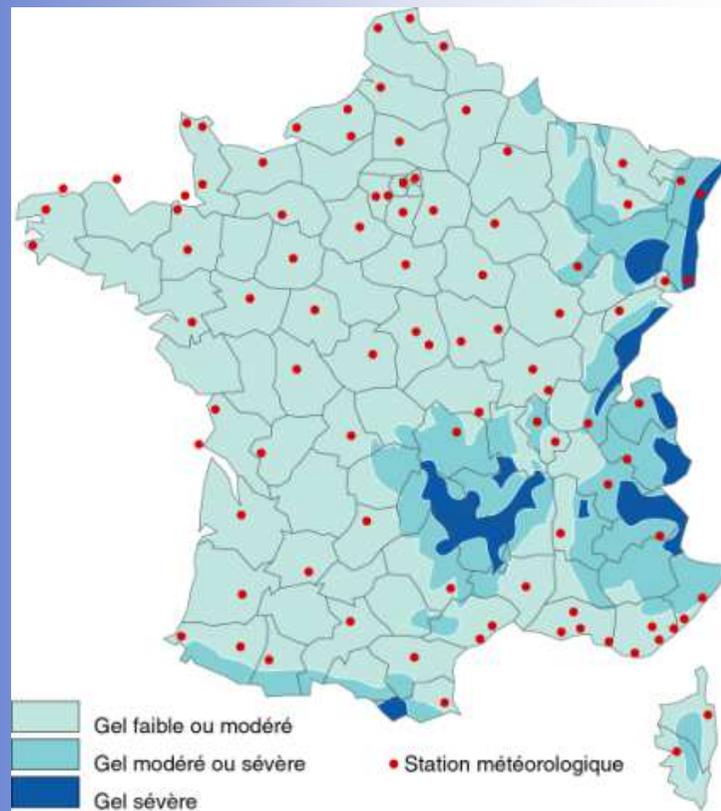
- Le niveau de prévention vis à vis de la réaction sulfatique interne :

Catégorie de l'ouvrage	Classes d'exposition		
	XH1	XH2	XH3
I : éléments non porteurs, ouvrages provisoires ou facilement remplaçables, produits préfabriqués en béton	As	As	As
II : la plupart des ouvrages de génie civil	As	Bs	Cs
III : ouvrages exceptionnels : centrale nucléaire, barrage	As	Cs	Ds

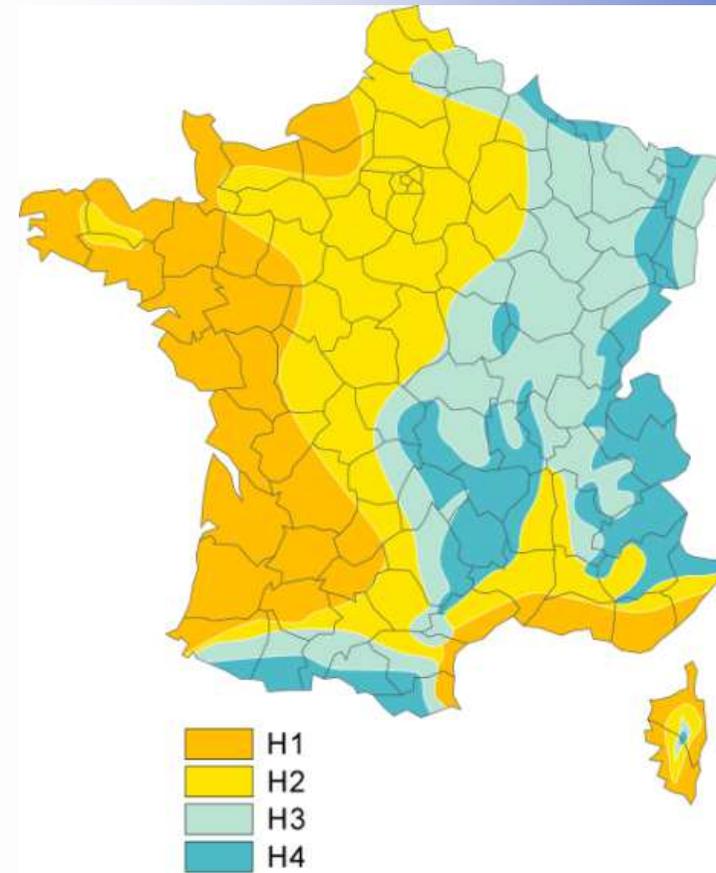
# Dispositions générales

Le Maître d'ouvrage doit définir :

- Les dispositions particulières relatives à la durabilité des bétons durcis soumis au gel et aux sels de déverglaçage:



Carte des niveaux de gel



Carte des niveaux de salage

(ou avis exploitant)

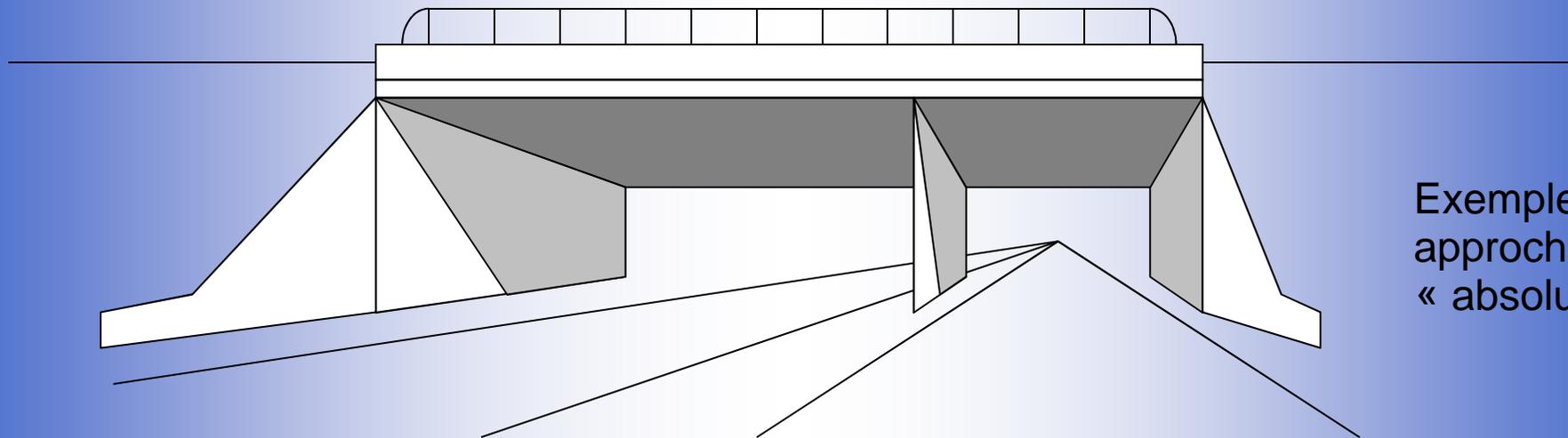
# Application sur un ouvrage

Ouvrage courant - description :

Dalle béton armé à deux travées franchissant une rivière

Culée comportant un mur de front, un sommier, une semelle de fondation et des murs en aile

Les culées et la pile sont fondées profondément sur deux files de pieux verticaux



Exemple en  
approche  
« absolue »

Classe structurale : S4

DUP : 100 ans → majoration de 2 classes : S6

Hypothèse d'un enrobage compact (tableau 4.3NF de NF EN 1992-1-1/NA) → minoration de 1 classe pour l'intrados du tablier

Pas d'hypothèse sur la nature du liant

# Choix des classes d'exposition

## Les classes d'exposition

**X0** : Aucun risque de corrosion, ni d'attaque (Gel/dégel, abrasion, attaque chimique)

**XC** : Corrosion induite par carbonatation

XC1 : Sec ou Humide en permanence

XC2 : Humide rarement sec

XC3 : Humidité modérée

XC4 : Alternance humidité et de séchage

**XF** : Attaque Gel/Dégel avec ou sans agent de déverglaçage

XF1 : Gel faible ou modéré sans agent de déverglaçage

XF2 : Gel faible ou modéré avec agent de déverglaçage

XF3 : Gel sévère sans agent de déverglaçage

XF4 : Gel sévère avec agent de déverglaçage

# Choix des classes d'exposition

## Les classes d'exposition

### **XS : Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer**

XS1 : Exposé à l'air véhiculant du sel marin mais pas en contact direct avec l'eau de mer. *Structures situées à moins d'1 km de la côte.*

XS2 : Immergé en permanence

XS3 : Zones de marnage, zones soumises des projections

### **XD : Corrosion induite par des chlorures ayant une origine autre que marine**

XD1 : Humidité modérée

XD2 : Humide, rarement sec

XD3 : Alternance d'humidité et de séchage

### **XA : Attaque chimique**

XA1 : Environnement à faible agressivité chimique

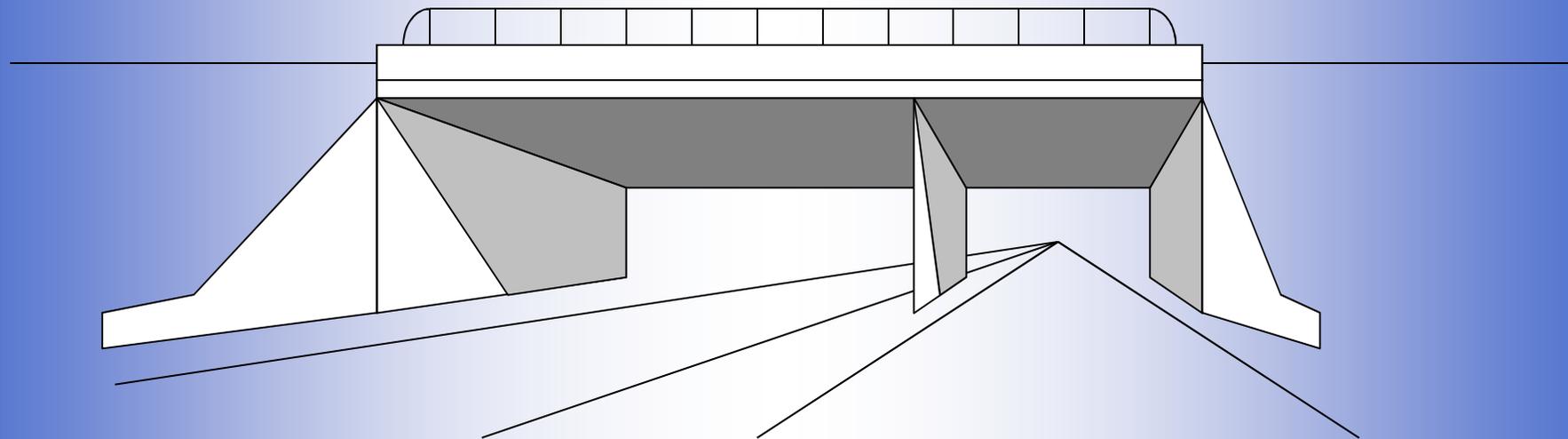
XA2 : Environnement d'agressivité chimique modérée

XA3 : Environnement à forte agressivité chimique

# Choix des classes d'exposition

Longrines d'ancrage des  
dispositifs de retenue  
XC4 – XD3 – XF4

Tablier  
Extrados : XC3 – XF1  
Intrados : XC4 – XF1



Murs en aile  
Côté air : XC4 – XF1  
Côté terre : XC2 – XF1

Pile  
XC4 – XF1

Culées  
Côté air : XC4 – XD3 – XF4  
Côté terre : XC2 – XF1

Semelles de fondation et pieux XA1 - XC2

# Détermination de l'enrobage selon EC2

Classe structurale S6 pour toutes les parties sauf intrados du tablier S5 (enrobage compact)

Classe d'exposition et enrobage des aciers passifs :

Parement	Classe d'exposition	Enrobage selon EC2 sans application de l'AP	c <sub>min,dur</sub> avec approche performantielle (minoration de 2 classes*)	Enrobage nominal avec Deltacdev = 5 mm
Fondations profondes	XA1, XC2	70 mm**		
Semelles	XA1, XC2	35 mm		40 mm
Mur en aile côté air	XC4, XF1	40 mm	30 mm	35 mm
Mur en aile côté terre	XC2, XF1	35 mm	25 mm	30 mm
Culées côté air	XC4, XD3, XF4	55 mm	45 mm	50 mm
Culées côté terre	XC2, XF1	35 mm	25 mm	30 mm
Pile	XC4, XF1	40 mm	30 mm	35 mm
Longrines d'ancrage des dispositifs de retenue	XC4, XD3, XF4	55 mm	45 mm	50 mm
Extrados du tablier	XC3, XF1	35 mm	25 mm	30 mm
Intrados du tablier	XC4, XF1	35 mm	25 mm	30 mm

\* Dans le cadre de l'application de la méthode de conception performantielle et pour des seuils d'acceptabilité bien définis (voir plus loin)

\*\* Fascicule 68 du CCTG

# Spécification des bétons

Parties d'ouvrage	Classes d'exposition NF EN 206-1 + RSI *	Classe de résistance	Teneur minimale en liant vis-à-vis de la durabilité	Nature du ciment vis-à-vis de la durabilité	Caractéristiques complémentaires du ciment vis-à-vis de la durabilité	Eeff/Leq vis-à-vis de la durabilité	Caractéristiques complémentaires
Fondations profondes	XA1 XC2 XH2	C30/37	385 kg		PM ou ES CP	0,50	RAG Bs
Semelles	XA1 XC2 XH2	C30/37	330 kg		PM ou ES CP	0,50	RAG Bs
Piles	XC4 XF1 XH3	C35/45**	Méthode de conception performantielle****				RAG Bs
Dalle d'ouvrage	XC4 XF1 XH2	C35/45**	Méthode de conception performantielle ****				RAG Bs et LRE***
Culées, superstructures	XC4 XF4 XD3 XH2	C35/45	Méthode de conception performantielle****				RAG Bs

La mention "ES" dans les tableaux précédents désigne soit un ciment ES au sens de la norme NF P 15-319, soit un ciment SR au sens de la norme NF EN 197-1 et titulaire de la marque NFLiants hydrauliques.

\* Classe d'exposition vis-à-vis de la RSI.

\*\* Spécifications vis-à-vis de la résistance.

\*\*\* LRE = Liant à faible retrait (teneur maximale en ciment limitée à 385 kg/m<sup>3</sup>).

\*\*\*\* Les spécifications des bétons sur ces parties d'ouvrage sont de nature performantielle. Cela signifie que les formulations de béton proposées doivent satisfaire aux seuils performantiels fixés dans les chapitres ci-dessous pour les indicateurs de durabilité à considérer.

# Définition des bétons

Méthode de conception performantielle :

Seuils d'acceptabilité des indicateurs de durabilité par parties d'ouvrage selon futur fascicule 65 conduisant à une minoration de 2 classes :

Parties d'ouvrage	Classes d'exposition	Indicateurs de durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures (Seuils à 90 jours d'âge du béton)		
		$P_{\text{eau } 90j}^*$ (%)	$K_{\text{gaz } 90j}^{**}$ ( $10^{-18} \text{ m}^2$ )	$D_{\text{app } 90j}^{***}$ ( $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )
Piles	XC4	$\leq 13,5$	$\leq 150$	
Dalle d'ouvrage	XC4	$\leq 13,5$	$\leq 150$	
Culées, superstructures	XC4 XD3	$\leq 12$	$\leq 100$	$\leq 2,5$

\* $P_{\text{eau } 90j}$  : 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 en  $10^{-18} \text{ m}^2$ .

\*\*\* $D_{\text{app } 90j}$  : Coefficient de diffusion apparent des chlorures mesuré selon la norme XP P 18-462, exprimé en  $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ .

# Modulation d'enrobage

Seuils d'acceptabilité des indicateurs de durabilité par parties d'ouvrage selon futur fascicule 65 conduisant à une minoration de 2 classes :

Minoration de classe	Indicateur de durabilité à 90j	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
0	$P_{\text{eau}}$ (%)	15,5	15,5	15	14,5	14	14	13
	$K_{\text{gaz}}$ ( $10^{-18}$ m <sup>2</sup> )	-	-	200	200	-	-	200
	$D_{\text{app}}$ ( $10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	-	-	-	-	7	7	3,5
1	$P_{\text{eau}}$ (%)	15	15	14,5	14	13,5	13,5	12,5
	$K_{\text{gaz}}$ ( $10^{-18}$ m <sup>2</sup> )	-	-	175	175	-	-	150
	$D_{\text{app}}$ ( $10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	-	-	-	-	5,5	5,5	3
2	$P_{\text{eau}}$ (%)	14	14	14	13,5	13	13	12
	$K_{\text{gaz}}$ ( $10^{-18}$ m <sup>2</sup> )	-	-	150	150	-	-	100
	$D_{\text{app}}$ ( $10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	-	-	-	-	4,5	4,5	2,5

# Epreuve d'étude

Il est à la charge de l'entreprise d'optimiser le nombre de formules.

Les épreuves d'étude de béton comprennent, outre les éléments demandés par le fascicule 65 du CCTG, les justifications vis-à-vis du risque de corrosion des armatures. Deux cas se présentent :

## **A – Le béton dispose de références probantes (formules pré-qualifiées)**

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

1) Il a été antérieurement fabriqué et mis en œuvre dans des conditions équivalentes à celles de la fourniture considérée :

- matériaux de mêmes spécifications et de mêmes provenances,
- caractère identique du matériel de fabrication ou qualité au moins égale,
- durée prévisible de transport et d'attente du béton pas plus défavorable, en tenant compte des conditions d'ambiance prévisibles.

2) Il a répondu à des spécifications sur les indicateurs au moins équivalents à celles prescrites

3) Les résultats datent de moins de deux ans.

## **B – Le béton ne dispose pas de référence probantes**

Elles sont validées par le maître d'œuvre sur la base d'un dossier remis par l'entreprise comprenant les résultats des mesures de chaque indicateur de durabilité retenu.

Ces indicateurs de durabilité sont mesurés à 90 jours. En complément, et dans la perspective des épreuves de convenance, des mesures de porosité à l'eau sont réalisées à 28 et 90 jours.

# Epreuve d'étude

## GÂCHEE NOMINALE :

- 1 essai de consistance (et de maintien de consistance pendant la DPU),
- 3 éprouvettes pour essai de résistance à la compression à 28 jours,
- 3 éprouvettes 11x22 pour mesures des indicateurs de durabilité,
- Pour la prévention de la RSI, dans le cas où la température  $T_{max}$  évaluée selon les méthodes préconisées par les *Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne du béton* (LCPC, 2007) se situe à moins de 5°C de la valeur du seuil de température à considérer, une mesure de calorimétrie permettant de confirmer l'exothermie du béton et de vérifier les dispositions à prendre par rapport aux éventuelles pièces critique
- Porosité à l'eau à 28 jours, dans la perspective des épreuves de convenue et de contrôle

# Epreuve d'étude

GÂCHEES DERIVEES : évaluation de la sensibilité de la formule au dosage des constituants du béton

- gâchées dérivées par une modification de la quantité d'eau de gâchage, respectivement de plus et de moins 10 litres,

Et éventuellement

- gâchées dérivées par une modification du rapport entre le poids de sable et le poids total des granulats, respectivement de plus et de moins 10 pour 100 ;

- gâchées dérivées par une modification de la quantité de ciment de plus ou moins 20 kg par mètre cube de béton ;

- gâchées dérivées par une modification du dosage des adjuvants, compatible avec leur zone d'efficacité.

Sur chaque gâchée dérivée, le même programme d'essai que pour la gâchée nominale.

# Epreuve de convenance

Les résultats de l'épreuve de convenance constituent un point d'arrêt.

*Clauses particulières vis-à-vis du risque de corrosion des armatures :*

Porosité accessible à l'eau à 28 jours :  $P_{\text{eau(convenance)28j}} \leq 1,1 \cdot P_{\text{eau (étude) 28j}}$

Les résultats doivent être conformes pour toutes les grandeurs associées aux classes d'exposition.

*Clauses particulières vis-à-vis de la RSI :*

En cas de variation importante par rapport aux conditions de l'épreuve d'études, le maître d'œuvre se réserve la possibilité de demander à l'entrepreneur de confirmer le résultat de l'épreuve d'étude lors des épreuves de convenance par un essai de calorimétrie.

# Epreuve de contrôle

En cours de chantier, les contrôles de conformité sont complétés par la mesure des indicateurs de durabilité spécifiés au marché (un prélèvement complémentaire d'éprouvettes est réalisé dans ce sens).

Fréquence des essais :

Nature des indicateurs	Echéance des essais	Fréquence minimale des contrôles par formule
Indicateurs général $P_{\text{eau}}$	28 jours	Tous les 500 m <sup>3</sup> ou tous les mois, au 1 <sup>er</sup> terme échu
Grandeurs associées aux classes d'exposition $P_{\text{eau}}, K_{\text{gaz}}, D_{\text{app}}$	90 jours	Tous les 3 mois

NB : Dans le cas où des variations fortes seraient constatées (consistance du béton, résistance à la compression...), l'entreprise soumettra au maître d'œuvre une proposition de mesures complémentaires des indicateurs de durabilité.

# Epreuve de contrôle

Les critères de conformité sont les suivants :

À 28 jours :

- Porosité accessible à l'eau :  $P_{\text{eau(contrôle)28j}} \leq 1,1 \times P_{\text{eau (étude)28j}}$ ,

À 90 jours :

- Porosité accessible à l'eau :  $P_{\text{eau(contrôle)90j}} \leq 1,1^* P_{\text{eau (spécifiée au marché)90j}}$
- Perméabilité au gaz :  $K_{\text{gaz(contrôle)90j}} \leq K_{\text{gaz (spécifié au marché)90j}} + 30.10^{-18} \text{ m}^2$
- Coefficient de diffusion app.  $\text{Cl}^-$  :  $D_{\text{app(contrôle)90j}} \leq 1,3 \times D_{\text{app (spécifié au marché)90j}}$

# L'approche performantielle bientôt dans PETRA !



PETRA (Pièces Ecrites Techniques Rédigées avec Assistance)

Permet de rédiger les pièces techniques des DCE travaux d'ouvrages d'art (construction d'ouvrages neufs ou réparation) cohérents et à jour des évolutions réglementaires et normatives

Fonctionne sous Windows 7 ou XP

Choix du format du CCTP à chaque édition parmi : .doc, .docx, .odt

Répond dans les DTer, les DIR, les CG, les BE privés

# Concevoir, construire et gérer des structures durables en béton

Approche performantielle et évolutions normatives

---

**Merci de  
votre  
attention**

