

# Concevoir, construire et gérer des structures durables en béton

Approche performantielle et évolutions normatives

---

## Indicateurs de Durabilité Essais et seuils

Alexandre PAVOINE



ENPC Marne-la-Vallée - 23 octobre 2014

# Des indicateurs de durabilité pour quelles attaques ?

- **Corrosion des armatures**
- **Réactions de gonflements internes**
- **Les effets du gel**
  
- Les attaques chimiques d'origine externe (XA) pour la lixiviation et les attaques sulfatiques externes

Approche performantielle

Concept de performance équivalente

# Des indicateurs ?

## Corrosion des armatures

### Quelles en sont les causes ?

- ⇒ Chlorures et diminution du pH (carbonatation du liant)
- ⇒ Propriétés de transfert ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_2$  dans l'eau & air) ;

✓ Coefficient de diffusion des ions chlorure

✓ Perméabilité à l'air

✓ Porosité accessible à l'eau

✓ Résistivité électrique

✓ Porosité accessible à l'eau

✓ Résistivité électrique

Étude  
(90 jours)

Épreuve de convenance / contrôle  
(28 jours)

# Des indicateurs ?

## Réactions de gonflement interne

⇒ Réaction alcali-granulat

Pour ce qui concerne le niveau de prévention « B »  
(fonction de la catégorie de l'ouvrage et de la classe d'exposition)

En connaissance de la réactivité du granulat

- ✓ Bilan en alcalins équivalents  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$
- ✓ Déformation de gonflement d'éprouvettes de béton : essai de performance NF P18-454

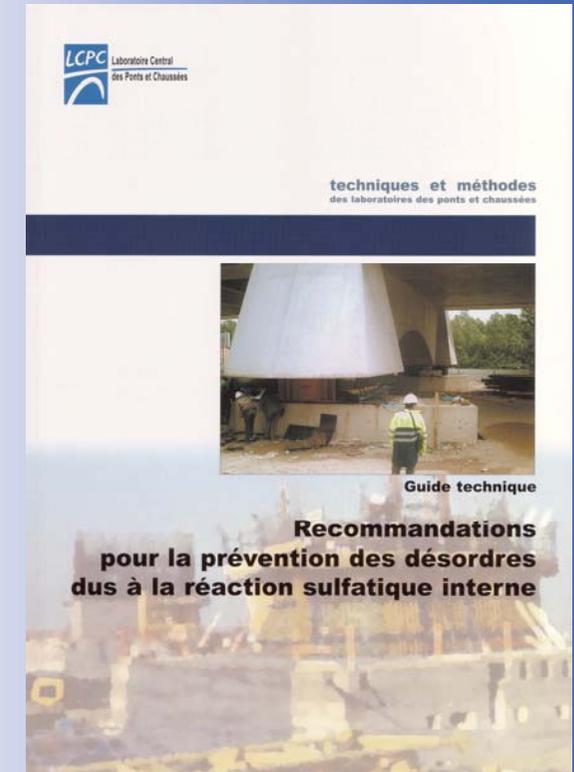
# Des indicateurs ?

## Réactions de gonflement interne

⇒ Réaction sulfatique interne

Dans le cas de pièce critiques :

- ✓ Température maximale atteinte au cœur de la partie de l'ouvrage  $T_{\max}$
- ✓ Déformation de gonflement d'éprouvettes de béton méthode d'essai LPC n° 66

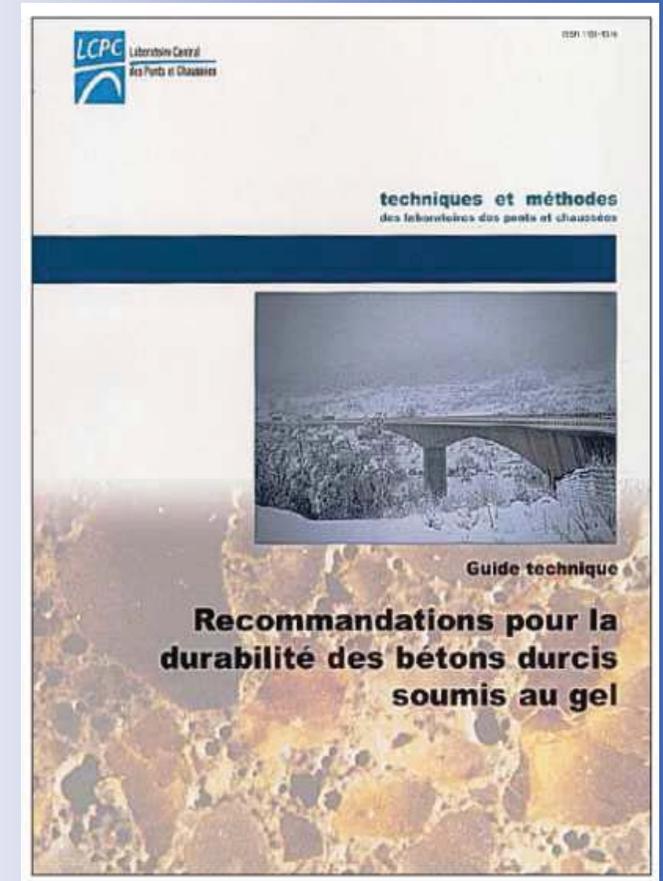


# Des indicateurs ?

## Les effets du gel

⇒ Fonction de l'intensité du gel et de la fréquence de salage

- ✓ Facteur d'espacement du réseau de bulles d'air
- ✓ Teneur en air occlus ( $t_{air}$ ) sur béton frais
- ✓ L'écaillage ( $E_c$ )
- ✓ Essai de performance vis-à-vis du gel interne (Expansion  $\Delta\varepsilon$  et fréquence de résonance  $f_2/f_0^2$ )
- ✓ Résistance en compression à 28 jours  $fc_{28}$



# Des conditions de fabrication des corps d'épreuve normalisées

**Éprouvettes moulées** ( cylindriques de 110 x 220 mm)

Norme NF EN 12390-2 (Avril 2012)

« Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance »



Éprouvettes prismatiques ou cubiques *pour les indicateurs autres que corrosion*

**Éprouvettes prélevées par carottage** (Ø 100 mm)

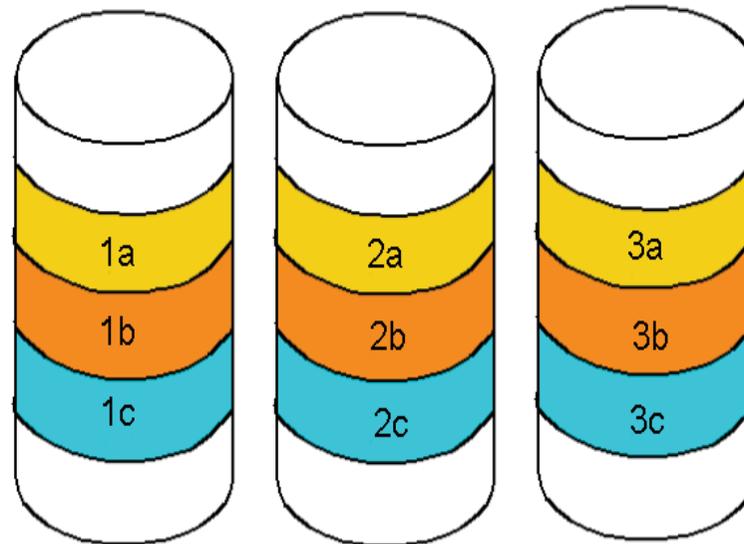
Norme NF EN 12504-1 (Avril 2012)

« Carottes – Prélèvement, examen et essais en compression »



# Échantillonnage

Découpe des éprouvettes par sciage :



1a 2a 3a perméabilité au gaz

1b 2b 3b résistivité électrique et migration des ions chlorures

1c 2c 3c porosité à l'eau

10 mm extrêmes à exclure

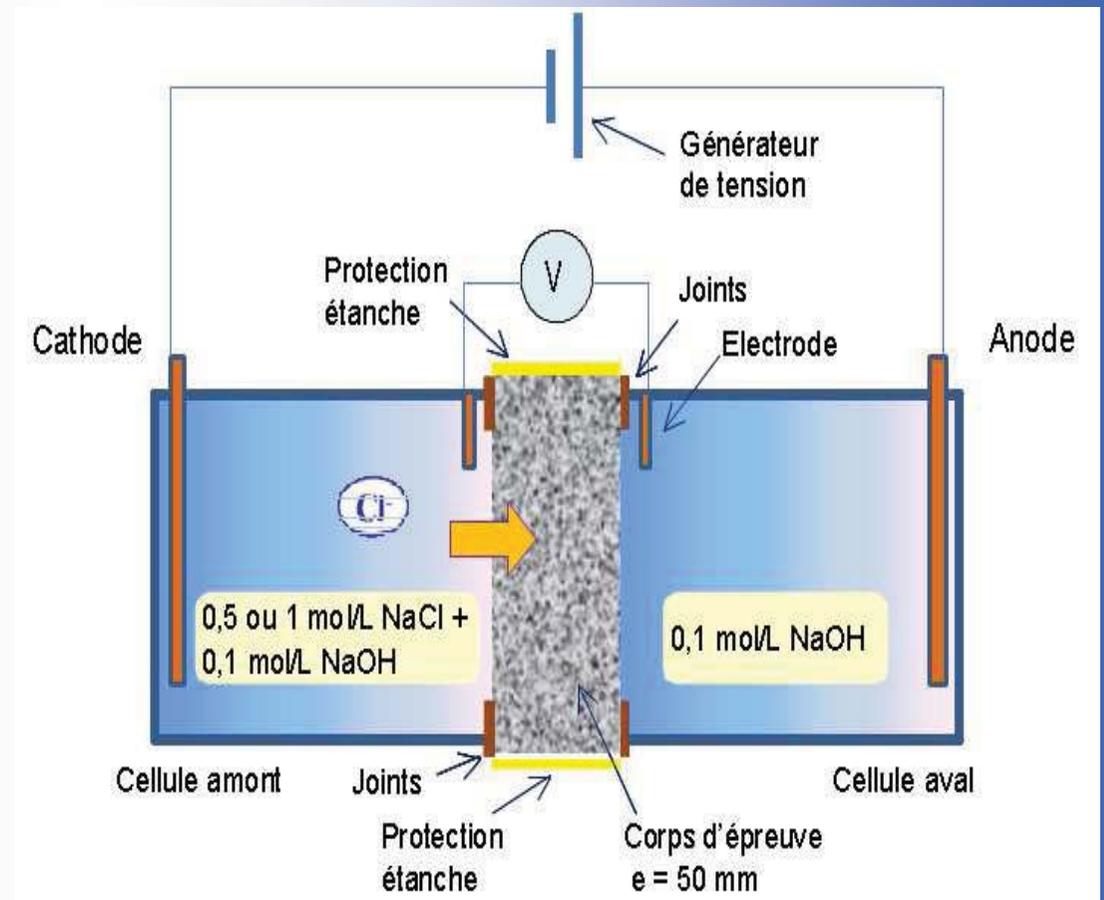
# Coefficient de diffusion des ions chlorure ( $D_{app} 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{S}^{-1}$ )

XP P18-462 Juin 2012

Essai sur béton durci - Essai accéléré de migration des ions chlorure en régime non-stationnaire - Détermination du **coefficient de diffusion apparent** des ions chlorure

! Phase de saturation déterminante.  
Une durée totale de 72 heures est à privilégier

Durée de l'essai 24 heures pour des « bétons classiques » à plus d'une semaine selon la formule de béton (dosages et nature du liant et des additions)



# Coefficient de diffusion des ions chlorure

Le **coefficient de diffusion des chlorures**  $D_{app}$  est alors calculé à partir de:

- ✓ la profondeur de pénétration mesurée
- ✓ durée de l'essai
- ✓ différence de potentiel

$D_{app}$  ( $10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{S}^{-1}$ )

Valeur à 15% près

sens de la migration des ions chlorure



# Perméabilité à l'air ( $K_{\text{gaz}} 10^{-18} \text{ m}^2$ )

Méthode LCPC n° 58. Projet de norme nationale en cours de finalisation

## Principe:

Soumettre le corps d'épreuve à un gradient de pression de gaz constant avec l'appareil CEMBUREAU

La perméabilité est alors déterminée à partir de la mesure du flux de gaz le traversant.

- ✓ Essai à pression constante (1 bar)
- ✓ Saturation en eau puis séchage à 80° C
- ✓ Mesure après 7 et 28 jours de séchage
- ✓ Mesure après séchage à 105° C
- ✓ Valeur exprimée pour un taux de saturation du béton (à déterminer à partir des pesées réalisées)
- ✓ Moyenne des valeurs de perméabilité.  
Valeur exprimée à 30% près



# Résistivité électrique ( $\rho \Omega.m$ )

✓ Éprouvette imprégnée par une solution de soude (72 heures)

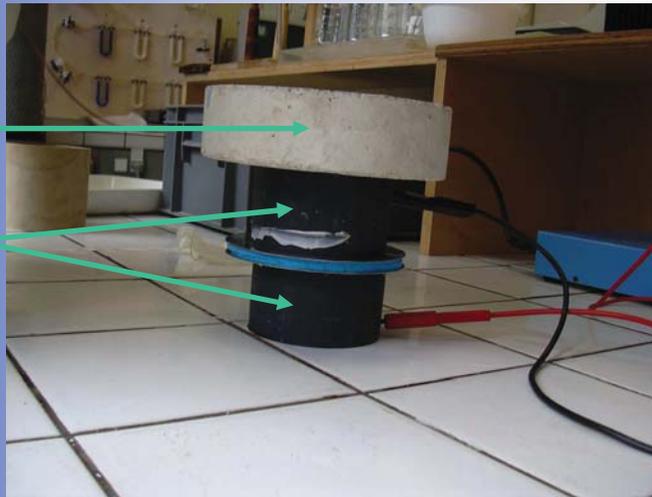
Plus la porosité connectée du béton est grande



Plus la résistivité du béton imprégné est faible



Masse  
de 2 Kg  
Éponges



Mesure à vide



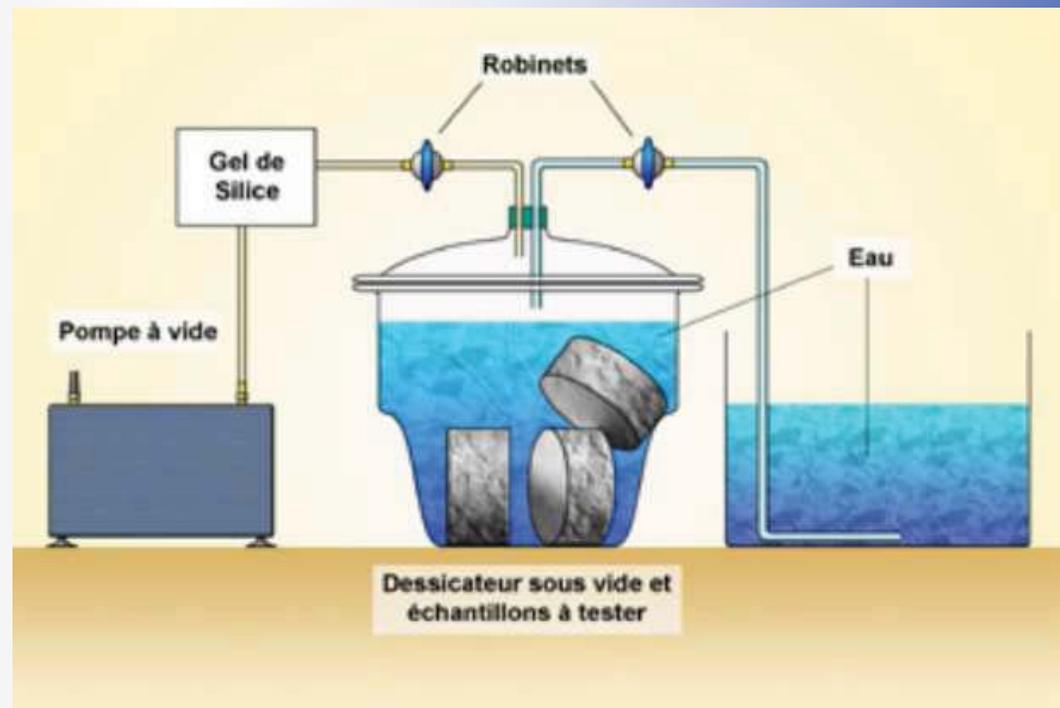
Mesure avec le corps d'épreuve

# Porosité accessible à l'eau ( $P_{\text{eau}} \%$ )

NF P 18-459 Essai pour béton durci – Essai de porosité et de masse volumique (Mars 2010)

## Préparation des corps d'épreuve

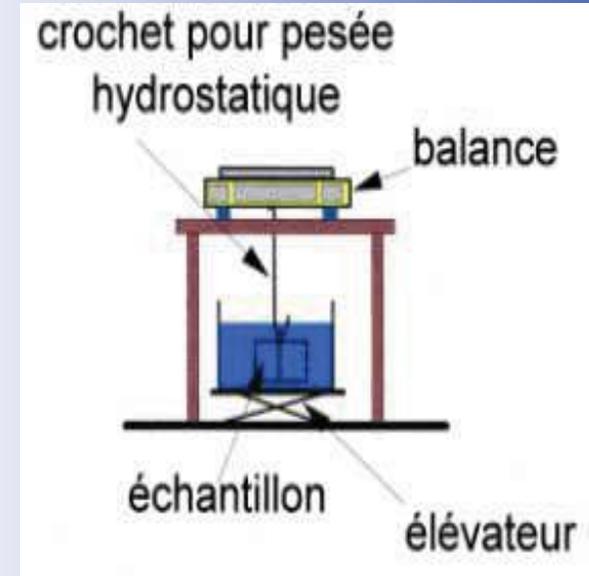
Saturation sous vide pendant **72 h**



# Porosité accessible à l'eau

$$P_{\text{eau}} = \frac{M_{\text{air}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} \times 100$$

Valeur donnée en pourcentage à 0,1% près



**Pesée hydrostatique.**  $M_{\text{eau}}$  est la masse en grammes pesée sous l'eau,

**Pesée dans l'air** de l'éprouvette saturée d'eau,  $M_{\text{air}}$

**Séchage** à  $T = 105^{\circ} \text{C}$  jusqu'à masse constante

( 2 pesées espacées de 24 h ne s'écartent pas plus de 0,05%),

**Pesée** dans l'air de l'éprouvette sèche  $M_{\text{sec}}$

# Seuils

## Indicateurs de durabilité vis-à-vis de la corrosion

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

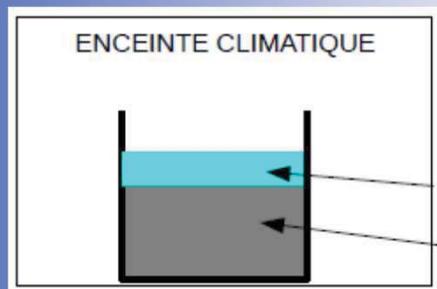
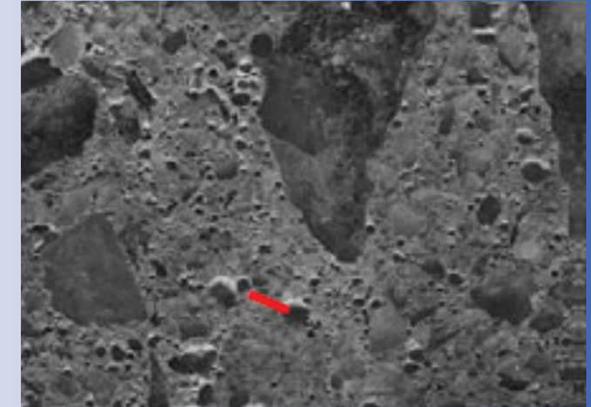
Classe d'exposition	DUP de 100 ans	Seuils des indicateurs à 90 jours	Exemples de partie d'ouvrage
XC1 sec ou humide en permanence XC2 humide rarement sec		$P_{eau} < 15$	Fondations (immergées ou non) Parties enterrées des appuis
XC3 humidité modérée XC4 alternance d'humidité et de séchage		$P_{eau} 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

# Indicateurs de durabilité vis à vis de l'effet du Gel

- ✓ Mesure de l'air occlus suivant la norme NF EN 12350-7 (%)  
(méthode de la compressibilité, mesure directe sur béton frais)
- ✓ Mesure du facteur d'espacement suivant la norme ASTM C 457  
(Lbar  $\mu\text{m}$ ) Mesure optique de l'espacement entre les bulles d'air (comptage)
- ✓ Mesure de la masse écaillée sous facteurs agressifs (écaillage)  
suivant la norme XP P 18-420 ( $E_c \text{ g/m}^2$ )

Éprouvettes 15 x 15 X 15 cm

Masse de béton écaillé à l'issue de 3 mois de cycles de gel/dégel en présence de solution saline (56 cycles de 24 heures  $-20^\circ \text{C}$  /  $+20^\circ \text{C}$ )



Saumure  
Éprouvette de béton

# Indicateurs de durabilité vis à vis de l'effet du Gel

- ✓ Essai de performance vis-à-vis du gel interne ( $\Delta\varepsilon$   $\mu\text{m/m}$ )

Éprouvettes 10 x 10 x 40 cm

Déformation longitudinale après 300 cycles de gel/dégel ( $-18^{\circ}\text{C}/+9^{\circ}\text{C}$ , cycle de 4 à 6h)

XP P 18-424 (gel dans l'eau dégel dans l'eau)

XP P 18-425 (gel dans l'air / dégel dans l'eau)

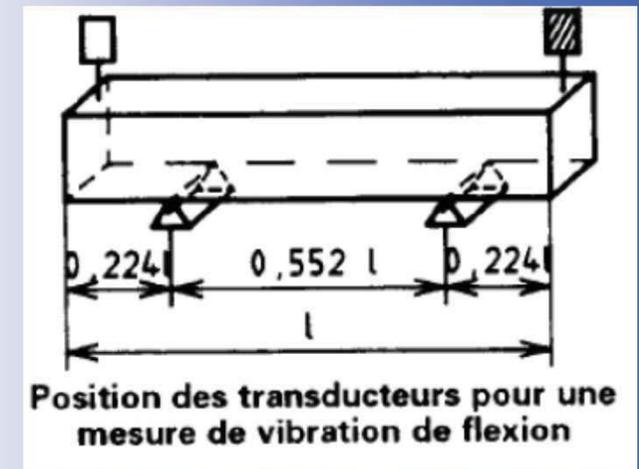


- ✓ Mesure du rapport des carrés des fréquences de résonance suivant la norme NF P 18-414 :  $f^2/f_0^2$

Éprouvettes 10 x 10 x 40 cm

Mesure à l'issue de 300 cycles de gel/dégel ( $-18^{\circ}\text{C}/+9^{\circ}\text{C}$ )

- ✓ Résistance à la compression à 28 jours ( $f_{c28}$  MPa) selon la norme NF EN 12390-3



# Seuils des indicateurs de durabilité vis à vis de l'effet du Gel

Critères pour les épreuves d'étude et de convenance

	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) $L_{\text{bar}} \leq 250 \mu\text{m}$ $\Delta\varepsilon \leq 400 \mu\text{m/m}$ $f^2 / f_0^2 \geq 75\%$ $f_{c_{28}} \geq 30 \text{ MPa}$
Salage fréquent	XD3 (se reporter au tableau corrosion) XD3 + XF2 pour les éléments très exposés (teneur en air $\geq 4\%$ )	XF4 (G+S) $L_{\text{bar}} \leq 200 \mu\text{m}$ $E_c \leq 600 \text{ g/m}^2$ $\Delta\varepsilon \leq 400 \mu\text{m/m}$ $f^2 / f_0^2 \geq 75\%$ $f_{c_{28}} \geq 35 \text{ MPa}$
Salage très fréquent	XF4 (G+S)	XF4 (G+S)

Autre tableau pour les épreuves de contrôle

# Indicateurs de durabilité

## Alcali-réaction

### Bilan des alcalins équivalents (kg/m<sup>3</sup>)

Prise en compte de l'apport de chacun des constituants

$$\text{Teneur totale : } T = CA + BAb + UAu + EAe$$

CA : Alcalins actifs du Ciment (prise en compte du clinker et des additions)

BAb : Alcalins libérables des granulats extraits suivant le mode opératoire LPC 37

UAu : Alcalins des adjuvants (donnée fournisseur)

UAu : Alcalins de l'eau de gâchage

# Indicateurs de durabilité

## Alcali-réaction

L'essai de performance NF P18-454

### Principe:

La formule de béton à qualifier est testée pendant 5 mois dans des conditions accélérant le phénomène d'alcali-réaction:

- ✓ Augmentation du taux d'alcalin,
- ✓ Atmosphère saturée d'humidité,
- ✓ Température élevée 60° C.

# Indicateurs de durabilité Alcali-réaction

## L'essai de performance NF P18-454

Trois éprouvettes prismatiques 70x70X282 mm équipées de plots de mesures en inox,

Mesures de déformations longitudinales au comparateur à échéances régulières



# Indicateurs de durabilité

## Alcali-réaction

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

✓ Granulats non réactifs

✓ Granulats Potentiellement Réactifs (PR) et bilan des alcalins

*Ou*

✓ Granulat Potentiellement Réactifs (PR) et essai de performance :

< 0,020% selon l'essai de performance vis-à-vis de

l'alcali-réaction suivant la norme NF P18-454 et NF P18-456

# Indicateurs de durabilité

## Alcali-réaction

### Seuils

$T_m$  : Teneur moyenne ( $\text{kg/m}^3$ )

$T_{\max}$  : Teneur maximale ( $\text{kg/m}^3$ )

Pour les bétons incorporant des ciments CEM I, CEM II, CEM V

Prise en compte de la variabilité du ciment ( $V_c$  : coefficient de variation de la teneur en alcalins du ciment)

➤  $T_m < 3,5 / (1+2V_c)$  et  $T_{\max} < 3,5 \text{ kg/m}^3$

Si absence de données sur la variabilité de la teneur en alcalins :

➤  $T_m < 3,0$  et  $T_{\max} < 3,3 \text{ kg/m}^3$

Pour les bétons incorporant des ciments CEM III a, b, c

$a_m$  teneur moyenne en alcalins totaux du ciment ; L : teneur en Laitier du ciment

➤ Pour CEM III a et b :  $a_m < 1,1\%$  et  $60\% < L < 80\%$

➤ Pour CEM III c :  $a_m < 2\%$  et  $L > 80\%$

# Indicateurs de durabilité

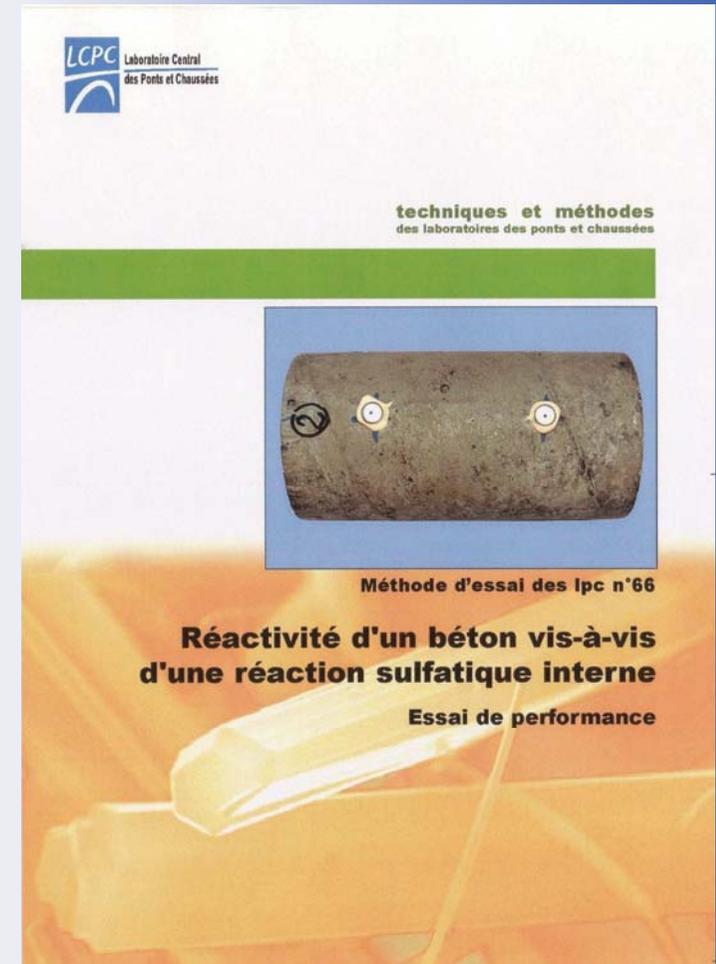
## Réaction sulfatique interne

### Principe

Pour une formule de béton, l'essai consiste à imposer un échauffement représentatif de l'élément en béton considéré puis à suivre le comportement dimensionnel des éprouvettes

### A noter :

- ✓ Un essai relativement long (+12 mois)
- ✓ Éprouvettes prismatiques ou cylindriques
- ✓ Une attention particulières aux conditions hydriques maintenues pendant l'échauffement



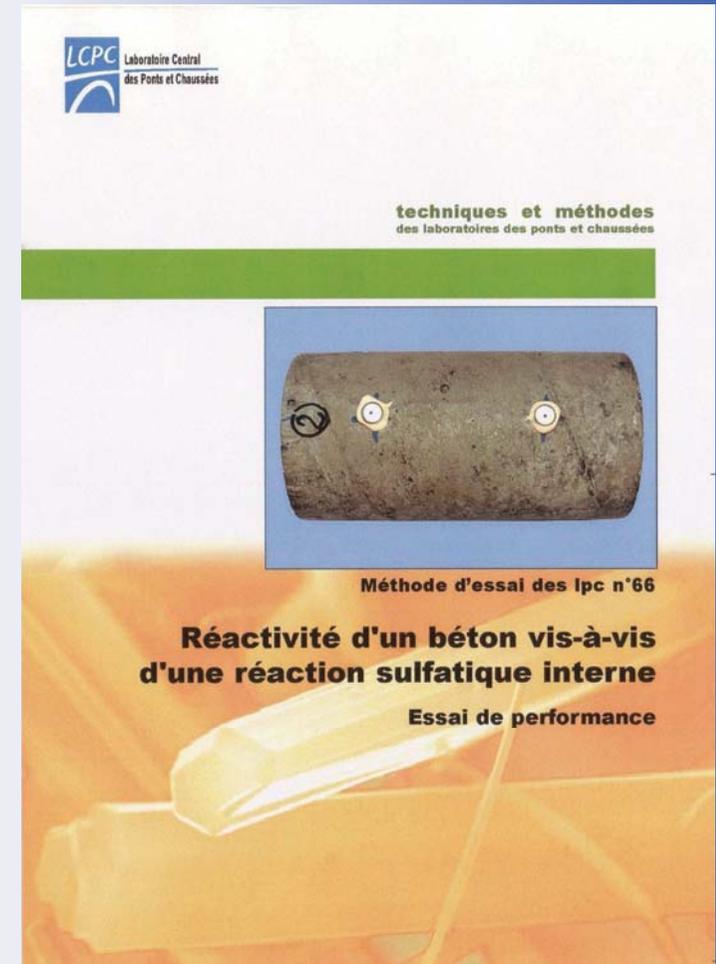
# Indicateurs de durabilité

## Réaction sulfatique interne

### Critères décisionnels :

**12 mois** : gonflement moyen  $< 0,04\%$  et aucune valeur individuelle  $> 0,06\%$  et pente faible entre le 3ème et 12ème mois

Si expansion individuelle des 3 éprouvettes est comprise entre  $0,04\%$  et  $0,07\%$  : poursuite de l'essai pendant 3 mois supplémentaires. Pente  $< 0,006\%$



# Indicateurs de durabilité

## Réaction sulfatique interne

Extrait :

Fonction de la catégorie de l'ouvrage ou partie d'ouvrage

Classes d'exposition	Niveau de prévention/Critère (pour un ouvrage courant)	Exemple
<b>XH2</b> Alternance d'humidité et de séchage, humidité élevée	<b>Bs</b> $T_{\max} < 75^{\circ}\text{C}$ <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
<b>XH3</b> En contact durable avec l'eau immersion permanente, stagnation d'eau à la surface, zone de marnage	<b>Cs</b> $T_{\max} < 70^{\circ}\text{C}$ <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

...Niveau Ds pour un ouvrage ou partie d'ouvrage exceptionnel en environnement XH3

# Concevoir, construire et gérer des structures durables en béton

Approche performantielle et évolutions normatives

---



Merci de votre attention

# Concevoir, construire et gérer des structures durables en béton

Approche performantielle et évolutions normatives

---

**Merci de  
votre  
attention**

