



## Journées de restitution

[www.perfdub.fr](http://www.perfdub.fr)

## Mise en œuvre de l'approche performantielle

*Blandine ALBERT (Lafarge France)*

*François CUSSIGH (Vinci)*

*Jean-Marc POTIER (SNBPE)*

## NF EN 206+A2/CN : 2022

Formule de béton  
pour une classe d'exposition visée

Satisfait aux exigences  
prescriptives

ou

Durabilité justifiée  
par approche performantielle

- §NA 5
- Annexe NA.F

*NB : Modifications apportées pour les ciments et granulats recyclés.*

- §NA 5.3.3 NF EN 206+A2/CN : 2022  
+
- Nouveau fascicule de documentation FD P18-480: 2022 - Béton - Justification de la durabilité des ouvrages en béton par méthode performantielle

Mise en vigueur : 05/11/2022



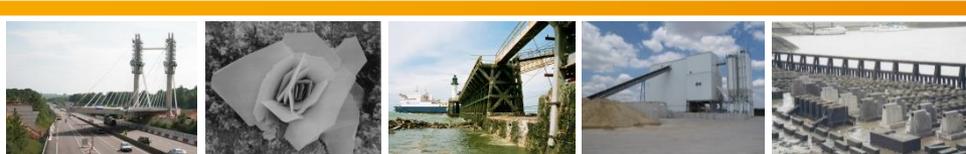
## ► Projets

- Ouvrages de génie civil, bâtiments
- Durée du projet : 50 ou 100 ans

## ► Possibilité de recourir au FD P18-480 pour proposer des bétons dont la formule peut déroger sur :

- Le rapport Eau efficace / Liant équivalent maximal et/ou dosage minimal en liant équivalent de la classe d'exposition visée
- La nature du liant pouvant être imposée pour certaines classes d'exposition
- La qualité des granulats

A condition de justifier de la durabilité du béton



## ► Règles de mise en œuvre du béton et d'exécution

- **Inchangées** : Selon le cas : NF EN 13670 (BPE), NF EN 13369 (préfa), Fasc. 65 (Génie Civil), DTU, ...

## ► Règles de dimensionnement ouvrage ou partie d'ouvrage

- **inchangées**

NB : Respect des classes de résistance mécanique du Bureau d'Etudes (*a minima classes, respect de la classe de résistance mécanique de la classe d'exposition*)

**NB : les règles de modulations d'enrobage liées à des critères de résistance du béton et/ou de nature du liant données dans le Tableau 4.3NF de l'annexe nationale à la norme NF EN 1992-1-1 (NF P 18-711-1/NA) ne sont pas applicables.**

Possibilité de réduction du  $C_{min,dur}$  si démonstration d'une durabilité supérieure (respect de valeurs seuils plus exigeantes cf. Annexe A FD P 18-480)

| CRITÈRES                            | CLASSE D'EXPOSITION SELON TABLEAU 4.1     |   |   |   |   |   |   |
|-------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|
|                                     | XO  | XC1   | XC2/XC3   | XC4   | XD1/XS1/<br>XA1 <sup>(3)</sup>            | XD2/XS2/<br>XA2 <sup>(3)</sup>            | XD3/XS3/<br>XA3 <sup>(3)</sup>            |
| Durée d'utilisation de projet       | 100 ans :<br>majoration de 2              | 100 ans :<br>majoration de 2  | 100 ans :<br>majoration de 2  | 100 ans :<br>majoration de 2  | 100 ans :<br>majoration de 2              | 100 ans :<br>majoration de 2              | 100 ans :<br>majoration de 2              |
|                                     | 25 ans et moins :<br>minoration de 1      | 25 ans et moins :<br>minoration de 1  | 25 ans et moins :<br>minoration de 1  | 25 ans et moins :<br>minoration de 1  | 25 ans et moins :<br>minoration de 1      | 25 ans et moins :<br>minoration de 1      | 25 ans et moins :<br>minoration de 1      |
| Classe de résistance <sup>(1)</sup> | ≥ C30/37 et < C50/60 :<br>minoration de 1 | ≥ C30/37 et < C50/60 :<br>minoration de 1   | ≥ C30/37 et < C55/67 :<br>minoration de 1   | ≥ C35/45 et < C60/75 :<br>minoration de 1   | ≥ C40/50 et < C60/75 :<br>minoration de 1 | ≥ C40/50 et < C60/75 :<br>minoration de 1 | ≥ C45/55 et < C70/85 :<br>minoration de 1 |
|                                     | ≥ C50/60 :<br>minoration de 2             | ≥ C50/60 :<br>minoration de 2   | ≥ C55/67 :<br>minoration de 2   | ≥ C60/75 :<br>minoration de 2   | ≥ C60/75 :<br>minoration de 2             | ≥ C60/75 :<br>minoration de 2             | ≥ C70/85 :<br>minoration de 2             |
| Nature du liant                     |   | Béton de classe ≥ C35/45 à base de CEM I sans cendres volantes :<br>minoration de 1 | Béton de classe ≥ C35/45 à base de CEM I sans cendres volantes :<br>minoration de 1 | Béton de classe ≥ C35/45 à base de CEM I sans cendres volantes :<br>minoration de 1 |   |   |   |
| Enrobage compact <sup>(2)</sup>     | minoration de 1                           | minoration de 1   | minoration de 1   | minoration de 1   | minoration de 1                           | minoration de 1                           | minoration de 1                           |



## ► Conditions à remplir pour la formulation béton

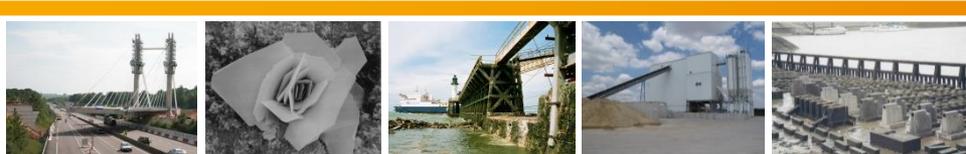
- Constituants aptes à l'emploi selon NF EN 206/CN, hors aptitude établie par agrément technique européen
- Seuls ajouts autorisés : fibres et agents de viscosité
- Teneur en liant total  $\geq 260 \text{ kg/m}^3$  (XC et XF1)
- Teneur en liant total  $\geq 300 \text{ kg/m}^3$  (XS, XD, XA, XF hors XF1)
- Teneur en clinker  $\geq 15\%$  du liant total

## ► Dossier de qualification du béton (critères du FD P18-480)

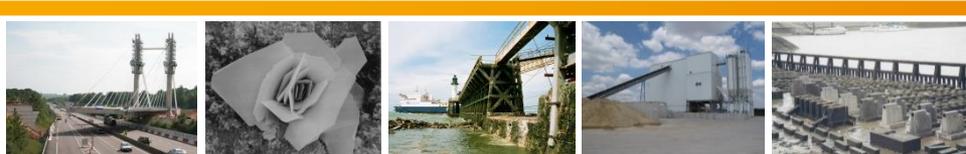
- Références probantes  
**ou**
- Performance démontrée en étude si nouveau béton (dès qu'un des constituant ou son dosage est modifié)

## ► Exigences sur les systèmes Qualité

- Producteur de béton, entreprise, laboratoire en charge des essais de durabilité (cf. Présentation GT4)



- ▶ Choix de la méthode d'approche performantielle validé par toutes les parties
  - Démarche intégrée dans les spécifications d'exécution
  - **Désignation spécifique du béton : BPPS ou BPCP, et suffixe « p » pour la classe d'exposition concernée**
- ▶ Détermination du NIVEAU de PREVENTION : N1, N2 ou N3 selon classe d'exposition et catégorie ouvrage (données de la MOA)
- ▶ Fiche de synthèse à fournir à MOA/MOE et transparente pour l'ensemble des parties du projet
  - Appellation normalisée du béton performantiel
  - Niveau d'application de la méthode performantielle (N1, N2 ou N3)
  - Classe(s) d'exposition couverte(s) par la méthode performantielle
  - Durée d'utilisation de projet
  - Indicateurs de durabilité généraux retenus
  - Grandeur(s) associée(s) à la durabilité retenue(s)
  - Laboratoire en charge des essais de qualification



## ► Cas du Niveau N2

- Pour des **ouvrages de durée de vie de 50 ans**
- Prévoir une **classe d'exécution 2** au sens de la norme NF EN 13670  
→ **contrôle extérieur à l'Entreprise**
- **Rôle du contrôle extérieur :**
  - Vérifie que l'Entreprise s'est effectivement organisée pour respecter les exigences du contrat
  - Contrôle directement les étapes clefs de la construction
  - Surveille l'application et l'efficacité du contrôle intérieur du titulaire :
    - suivi de mise en œuvre
    - examen des résultats du contrôle intérieur (épreuve de contrôle des bétons)
    - examen et agrément des propositions de traitement des éventuelles non-conformités



## ► Cas du Niveau N3

- Pour des **ouvrages de durée de vie de 100 ans ou bâtiments à caractère monumental ou exceptionnel**,
- Prévoir **classe d'exécution 3** au sens de la norme NF EN 13670
  - **MOE assisté d'un organisme indépendant de l'entreprise pour le contrôle extérieur des travaux**
  - **MOE qui établit le plan de contrôle, validé par MOA**
- Contenu du plan de contrôle

| Points abordés :                  | Précisions sur :   |
|-----------------------------------|--|
| Epreuves d'étude                  | Répartition contrôle intérieur (interne et/ou externe) et contrôle extérieur |
| Réception des produits            | Teneurs et fréquences minimales des essais et contrôles à réaliser           |
| Epreuves de convenance            | Moyens et méthodes de contrôle   |
| Contrôles d'exécution des travaux | Conditions d'acceptation contrôles et épreuves                               |
| Réception des travaux             |  |

- Points d'arrêt contractuels
- Contrat doit préciser la teneur minimale du contrôle intérieur attendu



## ETUDE

- Caractéristiques du béton frais
  - Justification sur béton durci (fc, Durabilité)
- Formule nominale**  
+  
**Dérivées (N2, N3)**

Cure humide 90j

**Mesure Grandeur Durabilité** de la classe d'exposition visée (**90j**)

Cure humide 28j

**Mesures :**

- **Indicateurs généraux de durabilité (28j)**
- **f<sub>CE</sub>(28j)**

*Option (anticipation convenance)  
Mesure Grandeur Durabilité (28j)  
(NB : ne dispense des mesures à 90j)*

## Dossier de préqualification du béton

(données de moins de 2 ans)

- Composition détaillée
- Limite de variations de dosage des constituants selon l'étude
- Résultats d'essais (caractéristiques du béton frais et durci : fCE, Durabilité)

## Dossier de qualification

Dossier préqualification

+

- Rapport de convenance
- Fiche de synthèse

## CONVENANCE

- Caractéristiques du béton frais
- Justification sur béton durci (fc, Durabilité)

**Formule nominale**

Cure humide 28j

**Mesures :**

- **Indicateur généraux de durabilité (28j)**
- **Fc(28j)**

**Si N3 :**  
Cure humide 90j

**Mesure Grandeur Durabilité** de la classe d'exposition visée (**90j**)

## CONTRÔLES DE PRODUCTION

# RAPPEL DES ESSAIS DURABILITE

| Classes d'exposition   | GRANDEURS DE DURABILITE (à mesurer après 90 J de cure humide du béton)                   |                   |   |                   | INDICATEURS GENERAUX DE DURABILITE (après 28 j de cure humide)  |  |
|------------------------|--|-------------------|---|-------------------|---|--|
|                        | Méthode de base  | Durée (hors cure) | Méthode alternative (cas particuliers)  | Durée (hors cure) |   | Critères   |
| XC1 / XC2              | <b>Vitesse de carbonatation accélérée</b><br>XP P18-458: 2022                            | 3 mois            | <b>Porosité à l'eau</b><br>NF P 18-459 : 2022   | 21-28 J           | Respect de valeurs limites (*) selon classe d'exposition et résistivité du béton.   | <b>Porosité à l'eau</b> (NF P18-458 : 2022)<br>ou<br><b>% absorption du béton</b> en préfabrication (Annexe F NF EN 13369)<br><br>Et<br><b>Résistivité électrique</b> du béton (XP P 18-481 : 2022)<br><br>NB : Valeurs mesurées en étude servant de critère d'acceptation du béton en convenueance et contrôle. |
| XC3 / XC4              | <b>Vitesse de carbonatation accélérée</b><br>XP P18-458 : 2022                           | 3 mois            | <b>Porosité à l'eau</b><br>NF P 18-459: 2022<br>+ essai de carbonatation accélérée en qualification.          | 21-28 J           |   |  |
| XS / XD                | <b>Coefficient de migration des ions chlorures</b><br>XP P18-462 : 2022                  | 4-7j              | X   |                   | Respect de valeurs limites (*) selon classe d'exposition et facteur de vieillissement du béton.                           |  |
| XA sulfates            | <b>Protocole RSE</b> par saturation ou par immersion/séchage (modes opératoires PerfDuB) | 12 semaines       | <b>Coefficient de migration des ions chlorures</b><br>(XP P18-462 : 2022) <i>si liant conforme FD P18-011</i> | 4-7j              | Comparaison avec béton de référence (**)<br><br>(sauf pour XA3 sulfates avec méthode de base : valeur seuil à respecter). |  |
| XA acides / eaux pures | <b>Lixiviation à pH constant</b><br>XP P18-482 : 2022                                    | 42 jours          | <b>Coefficient de migration des ions chlorures</b><br>(XP P18-462 : 2022) <i>si liant conforme FD P18-011</i> | 4-7j              |   |  |
| XA biodégradation      | <b>Biodétérioration</b><br>(modes opératoires PerfDuB)                                   | 4,5 mois          | X   |                   |   |  |

(\*) Un coefficient de sécurité est appliqué en étude : Valeurs moyennes < ou = Valeur limite – 1,5 x écart-type prévisionnel (NB : critère donné pour l'écart-type via un coefficient de variation minimum à respecter par type d'essai), cf. Présentation GT4 pour valeurs limites.

(\*\*) Critères à respecter pour la formule du béton d'étude.

## ► Performance formule nominale en étude (N1, N2, N3)

### ▪ 3 gâchées pour caractérisation béton frais et durci

#### ▪ béton frais

→ **Maintien consistance, % Air le cas échéant** (sur 1 gâchée).

#### ▪ béton durci

→ **Résistance mécanique en compression à 28 jours**

$$\text{Condition 1 : } f_{CE} \geq f_{ck} + \lambda(C_E - C_{\min})$$

$$\text{Condition 2 : } f_{CE} \geq f_{ck} + 2 \cdot S$$

- $f_{CE}$  : moyenne arithmétique des mesures effectuées sur trois éprouvettes
- $f_{ck}$  : la résistance caractéristique spécifiée
- $C_{\min}$  : la valeur minimale de la résistance à la compression à 28 jours pouvant être respectée pour le ciment choisi, observée pendant une durée significative au cours de l'autocontrôle du fournisseur
- $C_E$  : la résistance à la compression à 28 jours du ciment utilisé pour l'épreuve
- $\lambda$  : un coefficient pris égal à 1 sauf justification probante
- $S$  : l'écart-type prévisionnel de la distribution des résistances (> ou = 3 MPa)



## ► Performance formule nominale en étude (N1, N2, N3)

- 3 gâchées pour caractérisation béton frais et durci
  - béton durci (suite)

→ **Grandeur associée à la durabilité à 90 jours**

XA : Valeur moyenne  $\leq$  Valeur obtenue avec béton de référence

XC, XS, XD : Valeur moyenne  $\leq$  Seuil de performance – 1,5 x écart-type prévisionnel

NB : Critère sur l'écart-type prévisionnel  $\geq$  Moyenne mesurée \* CV mini admissible

| Grandeur   | Porosité à l'eau | Coeff de migration des chlorures | Vitesse de carbonatation accélérée |
|--|------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| Coefficient de Variation (CV) minimal admissible | 3%               | 20%                              | 20%                                |

→ **Indicateurs généraux à 28 jours**

Détermination de **% Porosité à l'eau** (ou **% Abs du béton** si préfa) + **résistivité électrique**

-> Valeurs de référence considérées pour acceptation du béton en convenance et contrôle de production



► Performance formules dérivées en étude (si N2 ou N3, hors XA)

- Dérivées obligatoires : dérivées en eau (+/- 10 Litres / m<sup>3</sup>, ou moins)

*Option : Dérivée sur poids de sable, granulats (+/-10%), sur poids de liant (+/- 20 kg/m<sup>3</sup>, modification dosage adjuvant)*

- 1 gâchée/dérivée pour caractérisation béton frais et durci

- béton frais : → **Consistance, maintien consistance, % Air le cas échéant**

- béton durci :

→ **Résistance mécanique en compression à 28 jours**

$$f_c(\text{dérivée}) = f_{CE} \pm 0,15 \cdot f_{CE}$$

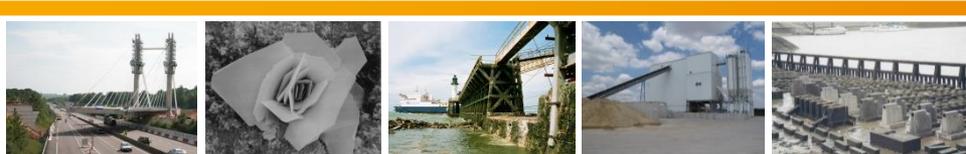
$f_c(\text{dérivée})$  : moyenne arithmétique obtenue avec la formule dérivée.

$f_{CE}$  : moyenne arithmétique obtenue avec la formule nominale

→ **Grandeur associée à la durabilité à 90 jours**

XC, XS, XD : **Valeurs moyennes ≤ Seuil de performance**

+ Différences 'cohérentes' avec formule nominale



## ► Performance du béton en convenance (N1, N2, N3)

- **Rappel du principe : vérifier a priori que le béton défini par sa formule nominale et fabriqué, transporté et mis en œuvre dans les conditions du chantier ou de l'usine de préfabrication satisfera aux exigences du marché**
- **3 gâchées pour caractérisation béton frais et durci (formule nominale)**  
 (mélangées dans camion malaxeur dans le cas du BPE)
  - béton frais : **Consistance, maintien consistance, % Air le cas échéant**
  - béton durci : **→ Résistance mécanique en compression à 28 jours**

$$\text{Condition 1 : } f_{CE} \geq f_{ck} + \lambda(C_E - C_{\min})$$

$$\text{Condition 2 : } f_{CE} \geq f_{ck} + 2 \cdot S$$

NB : Condition 1 à vérifier seulement si fabrication du béton du projet sur plus de 3 mois.

- $f_{CE}$  : moyenne arithmétique des mesures effectuées sur ces trois éprouvettes
- $f_{ck}$  : la résistance caractéristique spécifiée
- $C_{\min}$  : la valeur minimale de la résistance à la compression à 28 jours pouvant être respectée pour le ciment choisi, observée pendant une durée significative au cours de l'autocontrôle du fournisseur
- $C_E$  : la résistance à la compression à 28 jours du ciment utilisé pour l'épreuve
- $\lambda$  : un coefficient pris égal à 1 sauf justification probante
- $S$  : l'écart-type prévisionnel de la distribution des résistances (> ou = 3 MPa)



► **Performance du béton en convenance (N1, N2, N3)**

- **3 gâchées pour caractérisation béton frais et durci (formule nominale)**  
 (mélangées dans camion malaxeur dans le cas du BPE)

→ **Indicateurs généraux Durabilité à 28 jours**

**%Porosité à l'eau Convenance (28j) ≤ 1,1 \* %Porosité à l'eau Etude (28j)**

**ou (si préfa) %Ab eau Convenance (28j) ≤ 1,1 \* % Ab eau Etude (28j)**

**ET Résistivité Convenance (28j) ≥ 0,8 \* Résistivité Etude (28j)**

→ **Si N3 : Grandeur associée à la durabilité à 90 jours**

XC, XS, XD : **Valeurs moyennes ≤ Valeur limite par classe d'exposition**

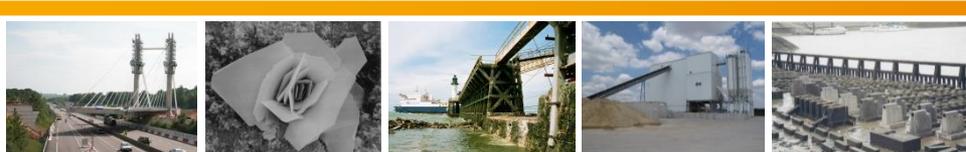
XA : **Valeurs moyennes ≤ Valeur obtenue avec béton de référence.**

→ **Si N3, et XC3 ou XC4, avec Porosité à l'eau comme grandeur de durabilité**

Réalisation d'un essai de carbonatation à réaliser pour vérifier la pertinence du choix de la porosité à l'eau comme grandeur de Durabilité :

$$V_{\text{acc } 28\text{j (ou } 90\text{j)}} \leq 0,08 * \%P_{\text{eau } 28\text{j (ou } 90\text{j)}} / fVp - 2,2$$

avec fVp : Fraction volumique de pâte



## ► Cas du Niveau N1

- Pas d'essai de durabilité en contrôle de production

## ► Cas du Niveau N2

- Indicateurs généraux : Mesure tous les 500 m<sup>3</sup> ou tous les mois (période initiale : 3 mois) puis tous les 1 000 m<sup>3</sup> ou tous les 2 mois
- Grandeur associée à la Durabilité : Mesure tous les 2 ans

## ► Cas du Niveau N3

- Indicateurs généraux : Mesure tous les 500 m<sup>3</sup> ou tous les mois (période initiale : 3 mois) puis tous les 1 000 m<sup>3</sup> ou tous les 2 mois
- Grandeur associée à la Durabilité :
  - tous les trimestres pour les classes XC, XF, XS et XD
  - tous les ans pour les classes XA

## ► N1, N2, N3

- Procéder aux vérifications habituelles des autres propriétés du béton



# ▶ EXEMPLES



|  | Centrale Préfa   | Centrale BPE   | Centrale BPE  | Centrale Préfa   |
|--|--|--|---|--|
|  | Béton C25/30 (exigences dimensionnement du BE) en XC1 ; formule dérogeant sur la teneur minimale en liant équivalent   | Béton C25/30 (classe minimale de la classe d'exposition visée) en XC4 ; formule dérogeant sur la teneur minimale en liant équivalent   | Béton C40/50 pour XS3(e) avec combinaison ciment (hors CEM I) + addition (hors calcaire) pour minorer d'une classe structurale (enrobage) | Béton C40/50 pour XA3 (sol acide) avec granulats dérogeant sur exigence de WA maximale   |
| Appellation normalisée                     | BPPS NF EN 206/CN C25/30 XC1(F)p D20 S4 ClO,4  | BPPS NF EN 206/CN C25/30 XC4(F)p D20 S4 ClO,4  | BPPS NF EN 206/CN C40/50 XS3(F)p D20 S3 ClO,4   | BPPS NF EN 206/CN C35/45 XA3(F)p D22,4 S4 ClO,4  |
| Niveau d'application                       | N1   | N2   | N3  | N2   |
| Classe(s) d'exposition                     | XC1p   | XC4p   | XS3(e)p   | XA3p (sol acide)   |
| DUP  | 50 ans   | 50 ans   | 100 ans   | 50 ans   |
| Indicateurs de durabilité généraux retenus | %Ab (béton)<br>Résistivité   | Porosité à l'eau<br>Résistivité  | Porosité à l'eau<br>Résistivité   | %Ab (béton)<br>Résistivité   |
| Grandeur associée à la durabilité retenue  | Méthode de base : Vitesse de carbonatation accélérée ( $v_{\text{carbo acc}}$ )<br><br><i>Méthode alternative si béton particulier : Porosité accessible à l'eau (<math>P_{\text{eau}}</math>)</i> | Méthode de base : Vitesse de carbonatation accélérée ( $v_{\text{carbo acc}}$ )<br><br><i>Méthode alternative si béton particulier : Porosité accessible à l'eau (<math>P_{\text{eau}}</math>)</i> | Coeff migration chlorures ( $D_{\text{rcm}}$ )  | Méthode de base : $I_{\text{ca}}$ (test de lixiviation à pH constant)<br><br><i>Méthode alternative : Coeff migration chlorures (<math>D_{\text{rcm}}</math>)</i><br><i>(si liant conforme au FD P18-011: 2022 pour XA3 sol acide)</i> |
| Laboratoire                                | W  | X  | Y   | Z  |



# ESSAIS DURABILITE

INDICATEURS  
GENERAUX DE  
DURABILITE  
(après 28 j de  
cure humide)

GRANDEURS DE DURABILITE (à mesurer après 90 J de cure humide du béton)

| Classes d'exposition   | Méthode de base  | Durée                                     | Méthode alternative  | Durée                               | Critères  |   |
|------------------------|--|---|--|-------------------------------------|---|---|
| XC1 / XC2              | <b>Vitesse de carbonatation accélérée</b><br>XP P18-458: 2022  | 4 mois<br>Exemple 1,<br>Méthode de base   | <b>Porosité à l'eau</b><br>NF P 18-459 : 2022  | 21-28j<br>Exemple 1,<br>Alternative | Respect de valeurs limites (*) selon classe d'exposition et résistivité du béton.               | <b>Porosité à l'eau</b><br>(NF P18-458 : 2022)<br>ou<br>% <b>absorption du béton</b> en préfabrication<br>(Annexe F NF EN 13369)<br>Et                                    |
| XC3 / XC4              | <b>Vitesse de carbonatation accélérée</b><br>XP P18-458 : 2022   | 4 mois<br>Exemple 2,<br>Méthode de base   | <b>Porosité à l'eau</b><br>NF P 18-459: 2022<br>+ essai de carbonatation accélérée en qualification.     | 21-28j<br>Exemple 2,<br>Alternative |   |   |
| XS / XD                | <b>Coefficient de migration des ions chlorures</b><br>XP P18-462 : 2022<br>avec ciment PM ou liant conforme FD P18-011<br>Sinon, justif XA1 sulfates par approche perf en complément |   | Exemple 3  |                                     | Respect de valeurs limites (*) selon classe d'exposition et facteur de vieillissement du béton. | <b>Résistivité électrique</b> du béton<br>(XP P 18-481 : 2022)<br><br>NB : Valeurs mesurées en étude servant de critère d'acceptation du béton en convenance et contrôle. |
| XA sulfates            | <b>Protocole RSE</b> par saturation ou par immersion/séchage (modes opératoires PerfDuB)   | 12 semaines                               | <b>Coefficient de migration des ions chlorures</b><br>(XP P18-462 : 2022) avec liant conforme FD P18-011 | 4-7j                                | Comparaison avec béton de référence (**)  |   |
| XA acides / eaux pures | <b>Résistance à la lixiviation à pH constant</b><br>XP P18-482 : 2022  | 42 jours<br>Exemple 4,<br>Méthode de base | <b>Coefficient de migration des ions chlorures</b> (XP P18-462 : 2022) liant conforme FD P18-011         | 4-7j<br>Exemple 4,<br>Alternative   | (sauf pour XA3 sulfates avec méthode de base : valeur seuil à respecter).                       |   |
| XA biodégradation      | <b>Résistance à la biodétérioration</b><br>(modes opératoires PerfDuB)   |   |  |                                     | 4,5 mois  |   |

(\*) Un coefficient de sécurité est appliqué en étude : Valeurs moyennes < ou = Valeur limite – 3 x écart-type prévisionnel (NB : critère donné pour l'écart-type via un coefficient de variation minimum à respecter par type d'essai), cf. Présentation GT4 pour valeurs limites.

(\*\*) NB : La formule du béton d'étude doit satisfaire à des critères particuliers.

## Fiche de synthèse

|  |  |
|--|--|
| <b>EXEMPLE 1</b>                           | Centrale Préfa   |
|  | Béton C25/30 (exigences dimensionnement du BE) en XC1 ; formule dérogeant sur la teneur minimale en liant équivalent |
| Appellation normalisée                     | BPPS NF EN 206/CN C25/30 XC1(F)p D20 S4 Cl0,4  |
| Niveau d'application                       | N1   |
| Classe(s) d'exposition                     | XC1p   |
| DUP  | 50 ans   |
| Indicateurs de durabilité généraux retenus | %Ab <sub>28j</sub> (béton)<br>Résistivité  |
| Grandeur associée à la durabilité retenue  | <b>Vitesse de carbonatation accélérée (<math>V_{acc,90j}</math>)</b>   |
| Laboratoire                                | W  |

-> Grandeur de durabilité :  
Vitesse de carbonatation accélérée  
(Application de la Méthode de base)

Tableau 2 — Seuils de performance (à 50 et 100 ans) sur la base d'essais de carbonatation accélérée

| Classe d'exposition | Modulation selon la classe de résistivité à 90 j selon XP P 18-481 ( $\Omega.m$ ) | Vitesse caractéristique de carbonatation accélérée selon XP P 18-458<br>$V_{acc,k,90j}$ (mm / (jour) <sup>0,5</sup> ) |             |
|---------------------|---|---|-------------|
|                     |   | DUP 50 ans  | DUP 100 ans |
| XC1                 | < 100   | 4   | 4           |
|                     | 100 à 175   |   |             |
|                     | > 175   |   |             |

### En étude :

- $V_{acc,90j}$  (nominale, moyenne sur 3 gâchées)  $\leq$  Seuil – 1,5 \* écart-type prévisionnel

+ Vérif béton frais,  $f_{c28j}$

### En convenueance :

- %Ab<sub>28j</sub>, convenueance, (nominale, moyenne sur 3 gâchées)  $\leq$  1,1 \* % Ab<sub>28j</sub>, étude
- Résistivité<sub>28j</sub>, convenueance, (nominale, moyenne sur 3 gâchées)  $\geq$  0,8 \* Résistivité<sub>28j</sub>, étude, (nominale)

### En production : pas d'essai de durabilité



## Fiche de synthèse

|  |   |
|--|---|
| <b>EXEMPLE 1</b>                           | Centrale Préfa  |
|  | Béton C25/30 (exigences dimensionnement du BE) en XC1 ; formule dérogeant sur la teneur minimale en liant équivalent. |
| Appellation normalisée                     | BPPS NF EN 206/CN C25/30 XC1(F)p D20 S4 C10,4   |
| Niveau d'application                       | N1  |
| Classe(s) d'exposition                     | XC1p  |
| DUP  | 50 ans  |
| Indicateurs de durabilité généraux retenus | %Ab <sub>28j</sub> (béton)  |
|  | Résistivité   |
| Grandeur associée à la durabilité retenue  | <b>Cas particulier : Porosité accessible à l'eau (P<sub>eau, 90j</sub>)</b>   |
| Laboratoire                                | W   |

-> Grandeur de durabilité :  
**Porosité accessible à l'eau**

(Cas particulier, si béton avec microstructure suffisamment fermée)

Tableau 3 — Seuils de performance (à 50 ans et 100 ans) pour la porosité à l'eau divisée par la fraction volumique de pâte

| Classe d'exposition | Modulation selon la classe de résistivité à 90 j selon XP P 18-581 (Ω.m) | Porosité caractéristique accessible à l'eau (selon NF P 18-459)/Fraction volumique de pâte<br>$P_{eau,k,90j} / fV_p$ (%) |             |
|---------------------|--|--|-------------|
|                     |  | DUP 50 ans   | DUP 100 ans |
| XC1                 | < 100  | 65 %   | 65 %        |
|                     | 100 à 175  |  |             |
|                     | > 175  |  |             |

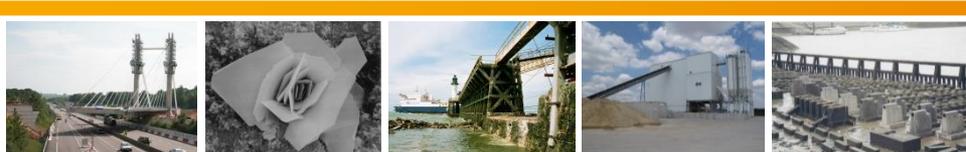
### En étude :

- $P_{eau, 90j} \leq \text{Seuil} * fV_{p \text{ formule béton}} - 1,5 * \text{écart-type prévisionnel}$   
+ Vérif béton frais,  $f_{c28j}$

### En convenance :

- $\%Ab_{28j, \text{ convenance (nominale)}} \leq 1,1 * \%Ab_{\text{ Etude (28j)}}$
- $\text{Résistivité}_{28j, \text{ convenance (nominale)}} \geq 0,8 * \text{Résistivité}_{28j, \text{ étude (nominale)}}$

En production : pas d'essai de durabilité



EXEMPLE 1 : BPPS NF EN 206/CN C25/30 XC1(F)p D20 S4 Cl0,4

Béton C25/30 (exigences dimensionnement du BE) en XC1 ; formule dérogeant sur la teneur en liant équivalent minimale du Tableau

Niveau d'application : N1. DUP : 50 ans

Indicateurs généraux de durabilité : % Abs du béton et Résistivité

Grandeur de durabilité : Vitesse de carbonatation accélérée (Méthode de base) ou Porosité accessible à l'eau (Cas particulier)

## ETUDE : 3 gâchées avec la formule nominale + Vérification résistance de l'échantillon de ciment utilisé

| (Gâchée 1) Temps  | 10 min | 30 min | 90 min |
|-------------------|--------|--------|--------|
| Affaissement (mm) | 180    | 180    | 170    |

| Ciment de l'étude : résistance mortier EN (MPa) |                                |
|---|--------------------------------|
| $C_E$ (mesuré) = 50                             | $C_{min}$ (fournisseur) = 42,5 |

| N° Gâchée               | #1  | #2  | #3  | Moyenne                       | Critère d'acceptation   | Calculs   |
|-------------------------|-----|-----|-----|-------------------------------|---|---|
| $f_c$ (28j)             | 35  | 34  | 32  | <b>33,7 MPa</b>               | $\geq f_{ck} + \lambda * (C_E - C_{min})$<br>$\geq f_{ck} + 2 * S$                                  | $33,7 \geq 25 + 1 * (50 - 42,5) = 32,5 \text{ MPa}$<br>$33,7 \geq 25 + 2 * 3 = 31 \text{ MPa}$  |
| $\rho_{90j}$            | 140 | 160 | 150 | <b>150 Ohm.m</b>              | Oriente le choix des valeurs seuils à respecter pour les grandeurs de durabilité                    |   |
| $V_{acc, 90j}$          | 2,5 | 3,2 | 2,7 | <b>2,8 mm/j<sup>0,5</sup></b> | $\leq \text{Valeur seuil (tableau 2)}$<br>$- 1,5 * \text{écart-type prévisionnel de } v_{acc, 90j}$ | $2,8 \leq 4 - 1,5 * 0,65 = 3,025 \text{ mm/j}^{0,5}$<br><u>Vérif du Coeff de variation de <math>v_{acc}</math></u> :<br>$CV = \text{Ecart-type} / \text{Moyenne} = 0,65 / 2,8 = 23,2\% > 20\%$ (tableau 13) -> Ok |
| $\rho_{28j}$            | 120 | 150 | 130 | <b>133,3 Ohm.m</b>            | Pas de critère d'acceptation en étude ; ces valeurs serviront pour acceptation du béton en convenue |   |
| %Ab <sub>eau, 28j</sub> | 6,1 | 5,8 | 6,5 | <b>6,1%</b>                   |   |   |



EXEMPLE 1 : BPPS NF EN 206/CN C25/30 XC1(F)p D20 S4 Cl0,4

Béton C25/30 (exigences dimensionnement du BE) en XC1 ; formule dérogeant sur la teneur en liant équivalent minimale du Tableau

Niveau d'application : N1. DUP : 50 ans

Indicateurs généraux de durabilité : % Abs du béton et Résistivité

Grandeur de durabilité : Vitesse de carbonatation accélérée (Méthode de base) ou Porosité accessible à l'eau (Cas particulier)

## ETUDE : 3 gâchées avec la formule nominale + Vérification résistance de l'échantillon de ciment utilisé

| (Gâchée 1) Temps  | 10 min | 30 min | 90 min |
|-------------------|--------|--------|--------|
| Affaissement (mm) | 180    | 180    | 170    |

| Ciment de l'étude : résistance mortier EN (MPa) |                                |
|---|--------------------------------|
| $C_E$ (mesuré) = 50                             | $C_{min}$ (fournisseur) = 42,5 |

| N° Gâchée                           | #1  | #2   | #3   | Moyenne            | Critère d'acceptation   | Calculs  |
|-------------------------------------|-----|------|------|--------------------|---|--|
| $f_c$ (28j)                         | 35  | 34   | 32   | <b>33,7 MPa</b>    | $\geq f_{ck} + \lambda * (C_E - C_{min})$<br>$\geq f_{ck} + 2 * S$                                      | $33,7 \geq 25 + 1 * (50 - 42,5) = 32,5 \text{ MPa}$<br>$33,7 \geq 25 + 2 * 3 = 31 \text{ MPa}$   |
| $\rho_{90j}$                        | 140 | 160  | 150  | <b>150 Ohm.m</b>   | Oriente le choix des valeurs seuils à respecter pour les grandeurs de durabilité                        |  |
| $P_{eau, 90j}$<br>(Cas particulier) | 17  | 16,5 | 17,4 | <b>17 %</b>        | $\leq \text{Valeur seuil (tableau 3)} * f_{Vp}$<br>$- 1,5 * \text{écart-type prévisionnel de } P_{eau}$ | $17 \leq 65 * 0,32 - 1,5 * 0,8 = 19,6 \%$<br><u>Vérif du Coeff de variation de <math>P_{eau}</math></u> :<br>$CV = \text{Ecart-type} / \text{Moyenne} = 0,8 / 17 = 4,7\% > 3\%$ (tableau 13) -> Ok |
| $\rho_{28j}$                        | 120 | 150  | 130  | <b>133,3 Ohm.m</b> | Pas de critère d'acceptation en étude ; ces valeurs serviront pour acceptation du béton en convenue     |  |
| $\%Ab_{eau, 28j}$                   | 6,1 | 5,8  | 6,5  | <b>6,1%</b>        |   |  |



## Fiche de synthèse

|  |   |
|--|---|
|  | Centrale BPE  |
| Exemple 2                                  | Béton C25/30 (classe minimale de la classe d'exposition visée) en XC4 ; formule dérogeant sur la teneur minimale en liant équivalent. |
| Appellation normalisée                     | BPPS NF EN 206/CN C25/30 XC4(F)p D20 S4 Cl0,4   |
| Niveau d'application                       | N2  |
| Classe(s) d'exposition                     | XC4p  |
| DUP  | 50 ans  |
| Indicateurs de durabilité généraux retenus | Porosité à l'eau ( $P_{eau}$ )<br><br>Résistivité ( $\rho_{28j}$ )  |
| Grandeur associée à la durabilité retenue  | <b>Vitesse de carbonatation accélérée (<math>V_{carbo\ acc}</math>)</b>   |
| Laboratoire                                | X   |

-> Grandeur de durabilité :  
**Vitesse de carbonatation accélérée**  
(Application de la Méthode de base)

Tableau 2 — Seuils de performance (à 50 et 100 ans) sur la base d'essais de carbonatation accélérée

| Classe d'exposition | Modulation selon la classe de résistivité à 90 j selon XP P 18-481 ( $\Omega.m$ ) | Vitesse caractéristique de carbonatation accélérée selon XP P 18-458<br>$V_{acc,k,90j}$ ( $mm / (jour)^{0.5}$ ) |             |
|---------------------|---|---|-------------|
|                     |   | DUP 50 ans  | DUP 100 ans |
| XC4                 | < 100   | 1,8   | 1,8         |
|                     | 100 à 175   | 2,2   |             |
|                     | > 175   | 3 *   | 2,2 *       |

\* Les valeurs avec astérisque sont liées à un enrobage supérieur à celui correspondant à la classe XC3 et à une forte résistivité du béton qui freine la propagation de la corrosion.

### En étude :

- $V_{acc,90j}$  (nominale, moyenne sur 3 gâchées)  $\leq$  Seuil – 1,5 \* écart-type prévisionnel
- $V_{acc,90j}$  (dérivées)  $\leq$  Seuil pour formules dérivées  
(NB : dérivées en eau obligatoires)

+ Vérif béton frais,  $f_{c28j}$

### En convenueance et production :

- $\%P_{eau\ 28j, convenueance}$  (nominale)  $\leq 1,1 * \%P_{eau\ 28j, étude}$  (nominale)
- Résistivité  $_{28j, convenueance}$  (nominale)  $\geq 0,8 * Résistivité_{28j, étude}$  (nominale)



## Fiche de synthèse

|  |   |
|--|---|
|  | Centrale BPE  |
| Exemple 2                                  | Béton C25/30 (classe minimale de la classe d'exposition visée) en XC4 ; formule dérogeant sur la teneur minimale en liant équivalent. |
| Appellation normalisée                     | BPPS NF EN 206/CN C25/30 XC4(F)p D20 S4 ClO,4   |
| Niveau d'application                       | N2  |
| Classe(s) d'exposition                     | XC4p  |
| DUP  | 50 ans  |
| Indicateurs de durabilité généraux retenus | Porosité à l'eau ( $P_{eau}$ )<br>Résistivité ( $\rho_{28j}$ )  |
| Grandeur associée à la durabilité retenue  | <b>Porosité accessible à l'eau (<math>P_{eau}</math>)</b>   |
| Laboratoire                                | X   |

-> Grandeur de durabilité : Porosité accessible à l'eau  
(Application de la méthode alternative dans le cas particulier d'un béton avec microstructure assez fermée)

Tableau 3 — Seuils de performance (à 50 ans et 100 ans) pour la porosité à l'eau divisée par la fraction volumique de pâte

| Classe d'exposition | Modulation selon la classe de résistivité à 90 j selon XP P 18-581 ( $\Omega.m$ ) | Porosité caractéristique accessible à l'eau (selon NF P 18-459)/Fraction volumique de pâte<br>$P_{eau,k,90j} / fV_p$ (%) |             |
|---------------------|---|--|-------------|
|                     |   | DUP 50 ans   | DUP 100 ans |
| XC4                 | < 100   | 50 %   | 50 %        |
|                     | 100 à 175   | 55 %   | 50 %        |
|                     | > 175   | 65 %*  | 55 %*       |

\* Les valeurs avec astérisque sont liées à un enrobage supérieur à celui correspondant à la classe XC3 et à une forte résistivité du béton qui freine la propagation de la corrosion.

### En étude :

- $P_{eau, 90j}$  (nominale, moyenne sur 3 gâchées)  $\leq$  Seuil \*  $fV_{p, formule\ béton} - 1,5 *$   
écart-type prévisionnel
  - $V_{acc, 90j}$  (nominale, 1 gâchée)  $\leq 0,08 * P_{eau, 90j}$  (nominale, 1 gâchée) /  $fV_p - 2,2$
  - $P_{eau, 90j}$  (dérivées)  $\leq$  Seuil \*  $fV_{p, béton}$   
(NB : dérivées en eau obligatoires)
- + Vérif béton frais,  $f_{c28j}$

### En convenance et production :

- $\%P_{eau, 28j, Convenance}$  (nominale)  $\leq 1,1 * \%P_{eau, 28j, étude}$  (nominale)
- Résistivité  $_{28j, convenance}$  (nominale)  $\geq 0,8 * Résistivité_{28j, étude}$  (nominale)



## Fiche de synthèse

|  |   |
|--|---|
|  | Centrale BPE  |
| Exemple 3                                  | Béton C40/50 pour XS3(e) avec combinaison ciment (hors CEM I) + addition (hors calcaire) pour minorer d'une classe structurale (enrobage) |
| Appellation normalisée                     | BPPS NF EN 206/CN C40/50 XS3(F)p D20 S3 Cl0,4   |
| Niveau d'application                       | N3  |
| Classe(s) d'exposition                     | XS3(e)p   |
| DUP  | 100 ans   |
| Indicateurs de durabilité généraux retenus | Porosité à l'eau<br>Résistivité   |
| Grandeur associée à la durabilité retenue  | <b>Coeff migration chlorures (<math>D_{rcm,90j}</math>) car utilisation d'un ciment PM</b>  |
| Laboratoire                                | Y   |

Tableau A.3 — Seuils de performance (à 50 et 100 ans) permettant la minoration d'une classe structurale sur la base d'un essai de migration des chlorures

| Classe d'exposition | Modulation selon la classe de facteur de vieillissement | Coefficient caractéristique de migration des ions chlorure selon XP P 18-462<br>$D_{rcm,k,90j}$ ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s) |             |
|---------------------|---|--|-------------|
|                     |   | DUP 50 ans   | DUP 100 ans |
| XS3e                | 0,30 à 0,39   | 3  | 3           |
|                     | 0,40 à 0,49   | 5  | 5           |
|                     | 0,50 à 0,59   | 9  | 9           |
|                     | 0,60 et plus  | 16   | 16          |

Selon composition du liant (type et % additions)

*XS3e : éléments de structure exposés aux embruns lorsqu'ils sont situés à moins de 100 m de la côte, parfois plus, jusqu'à 500 m, suivant la topographie particulière (XS3e)*

*XS3m : éléments de structures en zone de marnage ou de projections*

### En étude :

- $D_{rcm,90j}$  (nominale, moyenne sur 3 gâchées)  $\leq$  Seuil – 1,5 \* écart-type prévisionnel
- $D_{rcm,90j}$  (dérivées)  $\leq$  Seuil pour formules dérivées (NB : dérivées en eau obligatoires)

+ Vérif béton frais,  $f_{c28j}$

### En convenance et production :

- $\%P_{\text{eau } 28j, \text{ convenance (nominale)}} \leq 1,1 * \% P_{\text{eau } 28j, \text{ étude (nominale)}}$
- Résistivité<sub>28j, convenance (nominale)</sub>  $\geq 0,8 * \text{Résistivité}_{28j, \text{ étude (nominale)}}$
- $D_{rcm,90j}$  (nominale)  $\leq$  Seuil (convenance) ou 1,3\*Seuil (contrôle)



|  |   |
|--|---|
|  | Centrale Préfa  |
| Exemple 4                                  | Béton C35/45 pour XA3 (sol acide) avec granulats dérogeant sur exigence de WA maximale.   |
| Appellation normalisée                     | BPPS NF EN 206/CN C35/45 XA3(F)p D22,4 S4 Cl0,4   |
| Niveau d'application                       | N2  |
| Classe(s) d'exposition                     | XA3p (sol acide)  |
| DUP  | 50 ans  |
| Indicateurs de durabilité généraux retenus | %Ab (béton)<br>Résistivité  |
| Grandeur associée à la durabilité retenue  | <b>Profondeur de lixiviation</b><br>$I_{Ca}$<br>(test de lixiviation à pH constant)<br>Ou <b>Coeff migration chlorures (<math>D_{rcm,90j}</math>)</b><br>Cas particulier si liant conforme au FD P18-011: 2022 pour XA3 sol acide |
| Laboratoire                                | Z   |

## Grandeur de durabilité : $I_{Ca}$

En étude : cf. Tableau 9

- $I_{Ca}$  (nominale, 1 gâchée)  $\leq I_{Ca}$ , Béton de référence (CEM V/A ES)

En convenance et production :

+ Vérif béton frais,  $fc_{28j}$

- $\%P_{\text{eau } 28j, \text{ convenance}} \leq 1,1 * \%P_{\text{eau } 28j, \text{ étude (nominale)}}$
- **Résistivité**  $_{28j, \text{ convenance (nominale)}} \geq 0,8 * \text{Résistivité}_{28j, \text{ étude (nominale)}}$

## Grandeur de durabilité : Coefficient de migration des chlorures (Cas particulier car liant conforme au FD P18-011: 2022 pour XA3 sol acide)

En étude : cf. Tableau 10

- $D_{rcm, 90j}$  (nominale, 1 gâchée)  $\leq D_{rcm, 90j}$  (béton de référence, CEM V/A ES)

+ Vérif béton frais,  $fc_{28j}$

En convenance et production :

- $\%P_{\text{eau } 28j, \text{ convenance (nominale)}} \leq 1,1 * \%P_{\text{eau } 28j, \text{ étude (nominale)}}$
- **Résistivité**  $_{28j, \text{ convenance (nominale)}} \geq 0,8 * \text{Résistivité}_{28j, \text{ étude (nominale)}}$



*Merci pour votre attention*

