

APPROCHE PERFORMANTIELLE DES BETONS

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

RESPONSABILITÉS RELATIVES À LA DÉCISION D'APPLICATION DE L'APPROCHE PERFORMANTIELLE

- Méthode performantielle : alternative autorisée par la norme NF EN 206+A2/CN
- Démarche transparente qui doit être acceptée par toutes les parties
- Proposée par le titulaire pour **tout ou partie des bétons de l'ouvrage et pour tout ou partie des classes d'expositions** ou imposée au CCTP

RESPONSABILITÉS RELATIVES À LA DÉCISION D'APPLICATION DE L'APPROCHE PERFORMANTIELLE

- NF EN 206+A2/CN 2022 : application de l'approche performantielle autorisée par application du fascicule FD P18-480
- Rôle du Maître d'Œuvre :
 - ➔ Définition du niveau d'application de la méthode
 - ➔ Mise en place d'un contrôle extérieur approprié

NIVEAUX D'APPLICATION

- Fonction de la catégorie d'ouvrage concernée.
- Définissent le “niveau de contrôle”.
- En général:
 - ➔ **Catégorie 1** : éléments à l'intérieur des bâtiments, non structurels ou ne contribuant pas à la stabilité structurelle des ouvrages, les éléments et ouvrages provisoires ou facilement remplaçables, les éléments situés en environnement peu agressifs,
 - ➔ **Catégorie 2** : bâtiments et certains ouvrages courants de génie civil conçus pour une durée de vie de 50 ans,
 - ➔ **Catégorie 3** : ouvrages conçus pour une durée de vie 100 ans et les ouvrages exceptionnels (centrales nucléaires, barrages, tunnels, bâtiments de prestige, ...).

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

NIVEAUX D'APPLICATION

- Choix décidé par le Maître d'Ouvrage/Maître d'œuvre
- Niveaux recommandés :

Classes d'exposition	XC1	XA	Autres classes
Catégories			
1. Eléments à l'intérieur des bâtiments, non structurels ou ne contribuant pas à la stabilité structurelle des ouvrages, les éléments et ouvrages provisoires ou facilement remplaçables	N1	N2	N1
2. Bâtiments et certains ouvrages courants de génie civil conçus pour une durée de vie de 50 ans	N1	N2	N2
3. Ouvrages conçus pour une durée de vie 100 ans et les ouvrages exceptionnels (centrales nucléaires, barrages, tunnels, bâtiments de prestige, ...)	N2	N3	N3

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

Approche prescriptive

- **Critères sur la nature du liant** selon classe d'exposition, le niveau de qualité des granulats à respecter selon classe mécanique (C35/45 et +), classe d'exposition (XA)
- Justification de la durabilité par **respect des limites de composition du béton**
- Epaisseurs d'enrobages minimales ($C_{min, dur}$) modulables selon classe mécanique du béton, nature du liant.

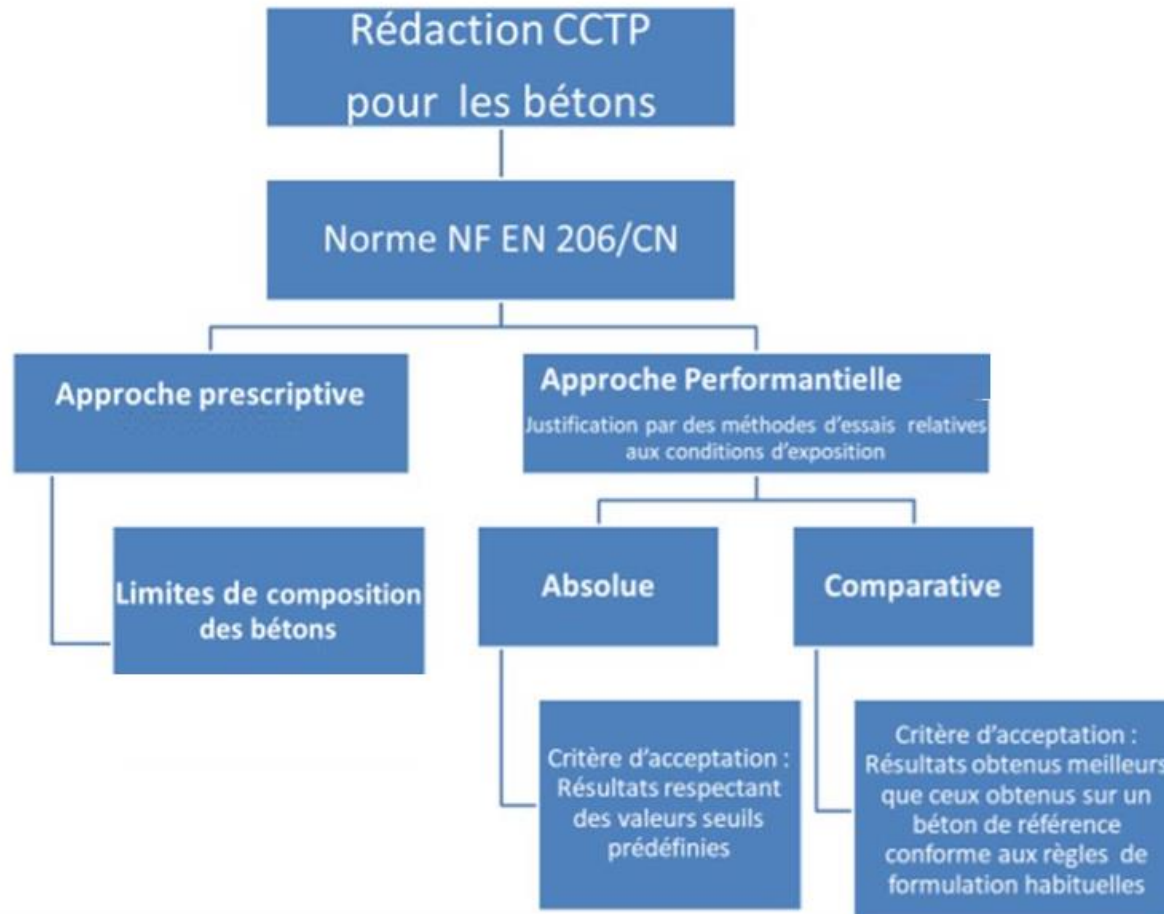
Approche performantielle

- **Composition du béton, composition du liant et qualité des granulats non imposées ***
- Justification de la durabilité par **respect de valeurs limites / essai(s) performantiel(s) sur béton, indicateurs de durabilité**
- Epaisseurs d'enrobages minimales ($C_{min, dur}$) modulables avec justification d'une durabilité supérieure.

* les constituants doivent toutefois être **aptés** à l'emploi selon la norme NF EN 206+A2/CN

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

APPROCHE PERFORMANTIELLE



Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

APPROCHE PERFORMANTIELLE



52 partenaires : Maîtres d'ouvrage, Maîtres d'œuvre, Entreprises, Fournisseurs BPE, Fournisseurs constituants, Laboratoires publics et privés



Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

APPROCHE PERFORMANTIELLE

Thème 1 : Essais de durabilité

- Corrélation indicateurs / carbonatation, optimisation de certains modes opératoires, essais croisés, étude « ageing effect », ...

Thème 2 : Définition des seuils de performance admissibles

- Exploitation de données expérimentales (base de données, corps d'épreuve, ouvrages anciens, ...), utilisation de modèles de vieillissement (synergie avec ANR Modevie)

Thème 3 : Bétons à étudier – Bétons de référence

- Paramètres (liant, granulats, Eeff/Leq, ...), tableaux NA F, variabilité spatiale et temporelle

Thème 4 : Contractualisation de l'approche

- Contexte contractuel, CCTP Type, contrôles de conformité

Thème 5 – Valorisation des résultats (France et Europe)

- CSI : Comité Scientifique International,
- Edition d'un ouvrage (ed. Eyrolles), Publications en ligne (à venir)
- **Journées de restitution du Projet National** (Paris, 28 octobre 2022 / Lyon, 17 novembre 2022 / Toulouse, 14 décembre 2022 / Nantes, le 18 Janvier 2023 / **Strasbourg, le 21 mars 2023** (cf. Site AFGC pour inscription)

LES MÉTHODES D'ESSAIS

Méthodes d'essais actualisées :

- **Pour les classes XC :**

- XP P 18-458 : Essai de carbonatation accélérée
- NF P 18-459 : Essai de porosité et de masse volumique
- XP P 18-481 : Essai de résistivité électrique

- **Pour les classes XD / XS :**

- XP P 18-462 : Essai accéléré de migration des ions chlorure en régime non stationnaire
- NF P 18-459 : Essai de porosité et de masse volumique
- XP P 18-481 : Essai de résistivité électrique

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

LES MÉTHODES D'ESSAIS

Pour les classes XA :

- **Lixiviation**

- XP P 18-482 – Béton - Essai sur béton durci - Essai de lixiviation à l'acide nitrique à pH constant »
- XP P 18-462 : Béton - Essai sur béton durci - Essai accéléré de migration des ions chlorure en régime non stationnaire

- **Attaque sulfatique externe**

- SIA 262-1 annexe D : Essai de résistance aux sulfates
- Mode opératoire PERFDUB : Protocole RSE par saturation
- XP P 18-462 : Béton - Essai sur béton durci - Essai accéléré de migration- des ions chlorure en régime non stationnaire (seulement si nature du liant conforme au fascicule FD P 18-011).

- **Biodégradation**

- Mode opératoires PERFDUB : 2 types d'Essais de biodégradation

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

CRITÈRES POUR LES CLASSES XC

Seuils de performance pour la vitesse de carbonatation accélérée

Classe d'exposition	Modulation selon la classe de résistivité à 90 j selon XP P18-481 (Ω.m)	Vitesse caractéristique de carbonatation accélérée selon XP P 18-458 $V_{acc,k,90j}$ (mm/(jour) ^{0,5})	
		DUP 50 ans	DUP 100 ans
XC1	< 100	4	4
	100 à 175		
	> 175		
XC2	< 100	3	2,6
	100 à 175	3,5	3
	> 175		
XC3	< 100	1,8	1,8
	100 à 175	2,2	
	> 175		
XC4	< 100	1,8	1,8
	100 à 175	2,2	
		> 175	3 *

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

CRITÈRES POUR LES CLASSES XC (ALTERNATIVE)

**Seuils de performance pour la porosité à l'eau
divisée par la fraction volumique de pâte**

Classes Exposition	Modulation selon la classe de résistivité à 90 j (Ω.m)	Porosité caractéristique accessible à l'eau / Fraction volumique de pâte $P_{eau,k,90d}/fV_p$ (%)	
		50 ans (S4)	100 ans (S6)
XC1	< 100	65%	65%
	100 à 175		
	> 175		
XC2	< 100	65%	60%
	100 à 175	65%	65%
	> 175		
XC3	< 100	50%	50%
	100 à 175	55%	
	> 175		
XC4	< 100	50%	50%
	100 à 175	55%	50%
	> 175	65%	55%

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

CRITÈRES POUR LES CLASSES XS

Classe d'exposition	Modulation selon la classe de facteur de vieillissement	Coefficient caractéristique de migration des ions chlorure selon XP P18-462 $D_{rcm,k,90j}$ ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	
		DUP 50 ans	DUP 100 ans
XS1	0,30 à 0,39	16 (28 [*])	9 (16 [*])
	0,40 à 0,49	28	22
	0,50 à 0,59		
	0,60 et plus		
XS2	0,30 à 0,39	5 (9 [*])	3 (5 [*])
	0,40 à 0,49	9	5
	0,50 à 0,59	16	9
	0,60 et plus		
XS3e	0,30 à 0,39	5	5
	0,40 à 0,49	9	9
	0,50 à 0,59	16	16
	0,60 et plus	22	22
XS3m	0,30 à 0,39	2	2
	0,40 à 0,49	3	3
	0,50 à 0,59	5	5
	0,60 et plus	9	9

* Les valeurs avec astérisque sont applicables pour des bétons dont la porosité à l'eau mesurée à 90 jours (valeur caractéristique associée à un fractile de 90 %) est inférieure ou égale à 13,5 %.

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

CRITÈRES POUR LES CLASSES XD

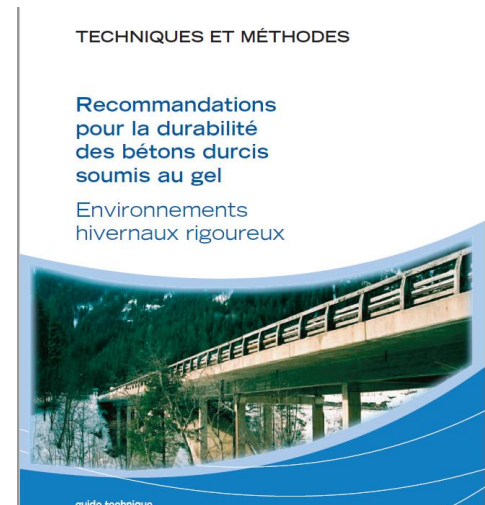
Classe d'exposition	Modulation selon la classe de facteur de vieillissement	Coefficient caractéristique de migration des ions chlorures selon XP P18-462 $D_{rcm,k,90j}$ ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	
		DUP 50 ans	DUP 100 ans
XD1	0,30 à 0,39	16 (28 *)	16 (22 *)
	0,40 à 0,49	28	28
	0,50 à 0,59		
	0,60 et plus		
XD2	0,30 à 0,39	9	9
	0,40 à 0,49	16	16
	0,50 à 0,59	22	22
	0,60 et plus		
XD3f (salage fréquent)	0,30 à 0,39	9	9
	0,40 à 0,49	16	16
	0,50 à 0,59	22	22
	0,60 et plus		
XD3tf (salage très fréquent)	0,30 à 0,39	5	5
	0,40 à 0,49	9	9
	0,50 à 0,59	16	16
	0,60 et plus		

* Les valeurs avec astérisque sont applicables pour des bétons dont la porosité à l'eau mesurée à 90 jours (valeur caractéristique associée à un fractile de 90 %) est inférieure ou égale à 13,5 %.

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

CRITÈRES POUR LES CLASSES XF

- XF1 : utiliser les critères du XC4
- XF2 : Utiliser les critères du XD3f (sauf si très exposé aux sels de déverglaçage)
- XF3 et XF4 : Qualifier / tester selon les Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel
(Guide Université Gustave Eiffel 2021).



CRITÈRES POUR LES CLASSES XA

- Méthode comparative avec béton de référence
 - Même ouvrabilité que le béton candidat à l'approche performantielle
 - Utilisation d'un ciment compatible au type d'attaque XA
 - Limitation du rapport $\text{Eau}_{\text{efficace}}/\text{Liant}_{\text{équivalent}}$:

Classe exposition	XA1	XA2	XA3
DUP 50 ans	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$	$\leq 0,40$
DUP 100 ans	$\leq 0,45$	$\leq 0,40$	$\leq 0,35$

CRITÈRES POUR LES CLASSES XA

RESISTANCE AUX ATTAQUES SULFATIQUES

	Protocole RSE par saturation (mode opératoire PerfDuB)	Protocole RSE par immersion séchage (SIA 262-1 annex D)	Ciment du béton de référence
Classe d'exposition	$\Delta L/L_M$	$\Delta L/L_S$	
XA1	$\leq \Delta L/L_M$ du béton de référence	$\leq \Delta L/L_S$ du béton de référence	CEM I PM
XA2	$\leq \Delta L/L_M$ du béton de référence	$\leq \Delta L/L_S$ du béton de référence	CEM I SR 3
XA3	$\leq 0,05\%$ valeur moyenne ($0,07\%$ max sur valeur individuelle)	$\leq 0,12\%$	N.A.

Dans le cas où la (les) dérogation(s) à la méthode prescriptive ne concerne(nt) pas la nature du liant (le liant est conforme aux exigences du FD P 18-011), il est possible alternativement de justifier le béton à qualifier en respectant un critère basé sur le coefficient de migration des chlorures (XP P 18-462: $D_{rcm,90j}$)

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

CRITÈRES POUR LES CLASSES XA

RESISTANCE AUX ATTAQUES ACIDES

Classes exposition	XP P 18-482 I_{Ca}	Béton de référence	
		Ciment	Fraction volumique de pâte fVp Squelette granulaire (dosage et nature)
XA1	$\leq I_{Ca}$ du béton de référence	CEM II/B-S ou CEM III/A	Equivalent au béton de référence
XA2	$\leq I_{Ca}$ du béton de référence	CEM II/B-S ou CEM III/A	Equivalent au béton de référence
XA3	$\leq I_{Ca}$ du béton de référence	CEM V/A ES	Equivalent au béton de référence

$$I_{Ca} = 1000 \times Ca_{\text{lixivié}} / Ca_{\text{initial}}$$

Dans le cas où la (les) dérogation(s) à la méthode prescriptive ne concerne(nt) pas la nature du liant (le liant est conforme aux exigences du FD P 18-011), il est possible alternativement de justifier le béton à qualifier en respectant un critère basé sur le $D_{rcm,90j}$.

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

CRITÈRES POUR LES CLASSES XA

RESISTANCE AUX ATTAQUES PAR HYDROGENE SULFURE (H₂S)

Classe exposition	Mode opératoire PerfDuB $I_{bio/tem}$	Béton de référence	
		Ciment	Fraction volumique de pâte fVp Squelette granulaire
XA1	$\leq I_{bio/tem}$ du béton de référence	CEM I	Equivalent au béton de référence
XA2	$\leq I_{bio/tem}$ du béton de référence	CEM III/B SR	Equivalent au béton de référence
XA3	$\leq I_{bio/tem}$ du béton de référence	CAC	Equivalent au béton de référence

$I_{bio/tem}$: index de dégradation, normalisé en relation avec celui du béton de référence à base de CEM I SR0

$I_{bio/tem}$: épaisseur de dégradation (test développé par l'UGE)

$I_{bio/tem}$: Calcium lixivié (BacTest)

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

PRINCIPES GÉNÉRAUX DE L'APPROCHE PERFORMANTIELLE

- Justification par **dossier technique** détaillant la composition du béton, les performances obtenues et leur interprétation
- Essais effectués par un **laboratoire agréé** avec des références probantes.
- Choix de l'Approche Performantielle **accepté par toutes les parties concernées.**
- Démarche **transparente pour toutes les parties prenantes.**

PRINCIPES GÉNÉRAUX DE L'APPROCHE PERFORMANTIELLE

L'appellation normalisée du béton :

- **Béton conforme à la norme NF EN 206+A2/CN**
 - **BPPS** (Béton Performantiel à Propriétés Spécifiées),
 - **BPCP** (Béton Performantiel à Composition Prescrite).
- **Désignation spécifique, exemple :**

BPPS C30/37 XF1/XS2p.

- respect des exigences prescriptives de la norme (XF1)
- **justification performantielle (XS2).**

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

BIEN PRESCRIRE LES BETONS

EXEMPLES AVEC FICHES DE SYNTHÈSE

	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 du Tabl 8B Fasc 65	Béton C30/37 (classe minimale de la classe d'exposition visée) en XC4 ; formule dérogeant sur la teneur minimale en liant équivalent du Tabl 8B Fasc 65	Béton C40/50 pour XS3(e) avec combinaison ciment (hors CEM I) + addition (hors calcaire). Formule conforme Tabl 8B Fasc 65. Justification pour minorer d'une classe structurale (enrobage cmin, dur)	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 Cl0,4	BPPS NF EN 206/CN C30/37 XC4(F)p D20 S4 Cl0,4	BPPS NF EN 206/CN C40/50 XS3(F)p D20 S3 Cl0,4	BPPS NF EN 206/CN C35/45 XA3(F)p D22,4 S4 Cl0,4
Niveau d'application	N2	N3	N3	N3
Classe(s) d'exposition	XC1p	XC4p	XS3(e)p	XA3p (sol acide)
DUP	100 ans	100 ans	100 ans	100 ans
Indicateurs de durabilité généraux retenus	%Ab (béton) Résistivité	Porosité à l'eau Résistivité	Porosité à l'eau Résistivité	%Ab (béton) Résistivité
Grandeur associée à la durabilité retenue	Méthode de base : Vitesse de carbonatation accélérée ($v_{carbo\ acc}$) Méthode alternative si béton particulier : Porosité accessible à l'eau (P_{eau})	Méthode de base : Vitesse de carbonatation accélérée ($v_{carbo\ acc}$) Méthode alternative si béton particulier : Porosité accessible à l'eau (P_{eau})	Coefficient de migration des chlorures (D_{rcm})	Méthode de base : I_{ca} (test de lixiviation à pH constant) Méthode alternative : Coeff migration chlorures (D_{rcm}) (si liant conforme au FD P18-011: 2022 pour XA3 sol acide)
Laboratoire (*)	W	X	Y	Z

(*) Justifie d'un système de management de la qualité, assure la réalisation des essais selon norme ou Mode opératoire, assure la validité des résultats avec des campagnes interlaboratoires (CIL, dont la participation à PerfDuB) sur périmètre considéré avec courrier de validation de l'organisateur du CIL pour le laboratoire (Si COFRAC ou éq., Ok)

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

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

EXEMPLE 1 (PRÉFA) – C25/30 XC1(F)p, 100 ANS

Fiche de synthèse

EXEMPLE 1	Centrale Préfa
	Béton C25/30 (exigences dimensionnement du BE) en XC1 ; formule dérogeant sur la teneur minimale en liant équivalent du Tabl 8B Fasc 65
Appellation normalisée	BPPS NF EN 206/CN C25/30 XC1(F)p D20 S4 Cl0,4
Niveau d'application	N2
Classe(s) d'exposition	XC1p
DUP	100 ans
Indicateurs de durabilité généraux retenus	%Ab _{28j} (béton) Résistivité
Grandeur associée à la durabilité retenue	Vitesse de carbonatation accélérée ($V_{acc, 90j}$)
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 $V_{acc, 90j}$ (mm / (jour) ^{0,5})	
		DUP 50 ans	DUP 100 ans
XC1	< 100	4	4
	100 à 175		
	> 175		



En étude : Justification de la durabilité du béton

- $V_{acc, 90j}$ (nominale, moyenne sur 3 gâchées) \leq Seuil – 1,5 * écart-type prévisionnel
+ Vérif béton frais, fc_{28j}
+ Détermination des indicateurs généraux



En convenance : Vérification des indicateurs et de la résistance

- %Ab_{28j}, convenance, (nominale, moyenne sur 3 gâchées) \leq 1,1 * % Ab_{28j}, étude
- Résistivité_{28j}, convenance, (nominale, moyenne sur 3 gâchées) \geq 0,8 * Résistivité_{28j}, étude, (nominale)
+ Vérif béton frais, fc_{28j}



En production : Contrôle courants (pas d'essai de durabilité)

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

EXEMPLE 1 (PRÉFA) – C25/30 XC1(F)p, 100 ANS

Fiche de synthèse

EXEMPLE 1	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	N2
Classe(s) d'exposition	XC1p
DUP	100 ans
Indicateurs de durabilité généraux retenus	%Ab _{28j} (béton) Résistivité
Grandeur associée à la durabilité retenue	Cas particulier : Porosité accessible à l'eau (P_{eau, 90j})
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 $P_{eau,k,90j} / fV_p$ (%)	
		DUP 50 ans	DUP 100 ans
XC1	< 100	65 %	65 %
	100 à 175		
	> 175		

En étude :

- $P_{eau, 90j} \leq \text{Seuil} * fVp_{\text{formule béton}} - 1,5 * \text{écart-type prévisionnel}$
- + Vérif béton frais, fc_{28j}
- + Détermination des indicateurs généraux

En convenueance :

- $\%Ab_{28j, \text{convenueance (nominale)}} \leq 1,1 * \%Ab_{\text{Etude (28j)}}$
- $\text{Résistivité}_{28j, \text{convenueance (nominale)}} \geq 0,8 * \text{Résistivité}_{28j, \text{étude (nominale)}}$
- + Vérif béton frais, fc_{28j}

En production : Contrôle courants (pas d'essai de durabilité)

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

DÉTAIL DE L'ÉTUDE POUR L'EXEMPLE 1

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 8B du fascicule 65. Niveau d'application : N1. DUP : 100 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
fc (28j)	35	34	32	33,7 MPa	$\geq f_{ck} + \lambda * (C_E - C_{min})$ $\geq f_{ck} + 2 * S$	$33,7 \geq 25 + 1 * (50 - 42,5) = 32,5 \text{ MPa}$ $33,7 \geq 25 + 2 * 3 = 31 \text{ MPa}$
ρ_{90j}	140	160	150	150 Ohm.m	Oriente le choix des valeurs seuils à respecter pour les grandeurs de durabilité	
$V_{acc, 90j}$	2,5	3,2	2,7	2,8 mm/j^{0,5}	$\leq \text{Valeur seuil (tableau 2)}$ $- 1,5 * \text{écart-type}$ prévisionnel de $v_{acc, 90j}$	$2,8 \leq 4 - 1,5 * 0,65 = 3,025 \text{ mm/j}^{0,5}$ <i>Vérif du Coeff de variation de v_{acc} :</i> $CV = \text{Ecart-type} / \text{Moyenne} = 0,65/2,8$ $= 23,2\% > 20\%$ (tableau 13) -> Ok
ρ_{28j}	120	150	130	133,3 Ohm.m --> 130 Ohm.m	Pas de critère d'acceptation en étude ; ces valeurs serviront pour acceptation du béton en convenance	
%Ab_{eau, 28j}	6,1	5,8	6,5	6,1%		

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

DÉTAIL DE L'ÉTUDE POUR L'EXEMPLE 1

EXEMPLE 1 : BPPS NF EN 206/CN C25/30 XC1(F)p D20 S4 CI0,4

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

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

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

EXEMPLE 2 (BPE) – C25/30 XC4(F)p, 100 ANS

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 C10,4
Niveau d'application	N3
Classe(s) d'exposition	XC4p
DUP	100 ans
Indicateurs de durabilité généraux retenus	Porosité à l'eau (P_{eau}) Résistivité (ρ_{28j})
Grandeur associée à la durabilité retenue	Vitesse de carbonatation accélérée ($V_{carbo\ acc}$)
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 $V_{acc,90j}$ (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, fc_{28j}
+ Détermination des indicateurs généraux

En convenue et production :

- Vérification du béton frais et fc_{28j}
- $\%P_{eau\ 28j}$, convenue (nominale) $\leq 1,1 * \%P_{eau\ 28j}$, étude (nominale)
- Résistivité $_{28j}$, convenue (nominale) $\geq 0,8 * Résistivité_{28j}$, étude (nominale)

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

EXEMPLE 2 (BPE) – C25/30 XC4(F)p, 100 ANS

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 C10,4
Niveau d'application	N3
Classe(s) d'exposition	XC4p
DUP	50 ans
Indicateurs de durabilité généraux retenus	Porosité à l'eau (P_{eau}) Résistivité (ρ_{28j})
Grandeur associée à la durabilité retenue	Porosité accessible à l'eau (P_{eau})
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 résistance 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 $P_{eau,90j} / f_{vp}$ (%)	
		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 * f_{vp} formule béton – 1,5 *
écart-type prévisionnel
- $V_{acc, 90j}$ (nominale, 1 gâchée) $\leq 0,08 * P_{eau, 90j}$ (nominale, 1 gâchée) / $f_{vp} - 2,2$
- $P_{eau, 90j}$ (dérivées) \leq Seuil * f_{vp} béton
(NB : dérivées en eau obligatoires)

+ Vérif béton frais, fc_{28j}
+ Détermination des indicateurs généraux

En convenance et production :

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

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

EXEMPLE 3 (BPE) – C40/50 XS3(F)p, 100 ANS

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 Résistivité
Grandeur associée à la durabilité retenue	Coeff migration chlorures ($D_{rcm, 90j}$) car utilisation d'un ciment PM
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 $D_{rcm, k, 90j}$ ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	
		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, fc_{28j}
+ Détermination des indicateurs généraux

En convenance et production :

- Vérification du béton frais et fc_{28j}
- $\%P_{\text{eau } 28j, \text{ convenance (nominale)}} \leq 1,1 * \% P_{\text{eau } 28j, \text{ étude (nominale)}}$
- Résistivité $_{28j, \text{ convenance (nominale)}} \geq 0,8 * \text{Résistivité}_{28j, \text{ étude (nominale)}}$
- $D_{rcm, 90j}$ (nominale) \leq Seuil (convenance) ou 1,3*Seuil (contrôle)

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

EXEMPLE 4 (PRÉFA)– C35/45 XA3(F)p (SOL ACIDE), 100 ANS

Fiche de synthèse

	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	N3
Classe(s) d'exposition	XA3p (sol acide)
DUP	100 ans
Indicateurs de durabilité généraux retenus	%Ab (béton) Résistivité
Grandeur associée à la durabilité retenue	Profondeur de lixiviation I_{Ca} (test de lixiviation à pH constant) Ou Coeff migration chlorures ($D_{rcm,90j}$) 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 convenueance et production :

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

+ Vérif béton frais, fc_{28j}
+ Détermination des indicateurs généraux

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)

En convenueance et production :

- Vérification du béton frais et fc_{28j}
- $\%P_{\text{eau } 28j, \text{ convenueance (nominale)}} \leq 1,1 * \%P_{\text{eau } 28j, \text{ étude (nominale)}}$
- Résistivité $_{28j, \text{ convenueance (nominale)}} \geq 0,8 * \text{Résistivité}_{28j, \text{ étude (nominale)}}$

+ Vérif béton frais, fc_{28j}
+ Détermination des indicateurs généraux

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

EXEMPLE DE RÉDACTION DU CCTP

Les bétons des parties d'ouvrage pour lesquelles des classes d'exposition sont spécifiées avec l'indication du suffixe « p », renvoyant à une justification par approche performantielle, sont à justifier suivant le fascicule de documentation FD P18-480 selon le niveau d'application N3 correspondant à une durée d'utilisation de projet de 100 ans.

Pour l'application du fascicule 65, les spécifications relatives à l'application de la méthode performantielle sont à remplacer par celles du FD P18-480 associées au niveau N3 d'application de cette méthode et à la durée d'utilisation de projet de 100 ans.

EXEMPLE DE TABLEAU DE DÉFINITION DES BÉTONS INCLUANT L'APPROCHE PERFORMANTIELLE (SELON CLAUSE A DÉFINIE CI-AVANT)

Partie d'ouvrage	Classe d'exposition	Type de béton	Classe de résistance caractéristique minimale en compression à 28 jours	Niveau de prévention RAG	Niveau de prévention RSI	Nature du ciment *	Prescriptions complémentaires
Tablier précontraint	XC4/XF1 (F)	BP	C40/50	B	Bs	CP1 ou CP2	A justifier par approche performantielle

* : caractéristiques complémentaires (PM, ES, SR, CP1 ou CP2)

INTÉRÊTS POSSIBLES DE L'APPROCHE PERFORMANTIELLE

- Résolution de cas où les **exigences de moyens** sont **difficilement compatibles** (exemple : pièces massives en béton de type G+S avec problématique RSI)
- Minimisation de l'**empreinte environnementale** de l'ouvrage
- Réduction des **valeurs d'enrobage** minimal (abaissement des classes structurales selon l'Eurocode 2)
- Justification d'utilisation de **granulats locaux non-conformes aux règles usuelles** de formulation dans l'environnement considéré (exemple : granulats présentant des absorptions d'eau supérieures à 2,5% en classe XA3)
- Utilisation d'un **taux supérieur de granulats de béton recyclés**
- **Optimisation de formulation de béton** avec un ciment combiné avec deux additions (le concept de liant équivalent ne permet la prise en compte que d'une seule addition)

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

CONTRAINTES ASSOCIÉES

- **Délai de réponse de certains essais :**
(28 ou 90 j) + (3 à 45 j) *soit 1 à 4,5 mois*
Maîtrise de la relation formulation/durabilité (base de données AFGC)
- **Prise en compte de la démarche dans le PAQ** de l'opération
(compétences, moyens, modes opératoires d'essai, contrôles...)
- Intérêt de disposer de **formules locales préqualifiées**
*concept de références probantes d'emploi disposant
de mesures des indicateurs*

CONTRAINTES ASSOCIÉES

UN OUTIL CONTRAIGNANT MAIS QUI PEUT ETRE BENEFIQUE.

Selon le cas,

- **Intérêt technique**
- **Intérêt environnemental**
- **Intérêt économique**

Merci pour votre attention

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre