

PERFDUB

APPROCHE **PERFORMANTIELLE**
DE LA **DURABILITÉ**
DES OUVRAGES EN **BÉTON**



Journées de restitution

www.perfdub.fr

Contractualisation de l'approche performantielle

Présentation du FD P 18-480

*Jean-Marc POTIER (SNBPE)
Lionel LINGER (VINCI Construction)*

- ▶ Introduction: Mandat du GT4 par rapport au PN
- ▶ Principes généraux
 - Champ d'application
 - Articulation FD P 18 480 avec NF EN 206/CN
 - Ajustement des classes d'exposition (XS3e, XS3m, XD3f, XD3tf)
- ▶ Méthodes d'essais
- ▶ Critères selon les classes XC, XS, XD et XA
- ▶ Mise en œuvre opérationnelle
 - ✓ Niveaux d'application de l'approche performantielle
 - ✓ Planification de la mise en œuvre d'une approche perf.
 - ✓ Essais initiaux
 - ✓ Essais durant la production
 - ✓ Contrôle qualité
- ▶ Conclusions: Intérêt de l'approche performantielle / Lien avec approche Solution Béton Bas Carbone



► Rappel du mandat du GT 4

- Contractualiser l'approche performantielle :
 - Définir les responsabilités et engagements des différents acteurs
 - Préciser le(s) cadre(s) contractuel(s) approprié(s)
 - Préciser les modalités de contrôle et de gestion des non-conformités, avec les tolérances associées
- Intégrer les craintes des maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre :
 - Durée de préparation du chantier
 - Variabilité des fournitures (cas des formules « pré qualifiées »)
 - Définition de l'incertitude des résultats risquant de conduire à une « sur-qualité »
- Assurer la communication transversale entre les différents GT afin de s'assurer que les travaux des autres groupes permettent de répondre à ces craintes en intégrant les 2 volets de l'approche contractuelle :
 - La mise au point de la formule, phase préalable
 - Le suivi et les contrôles : Besoin de contrôles « de routine », mais nécessité de « garde fous »



➤ Domaine d'application :

- ▶ Ouvrages de génie civil, bâtiments et produits préfabriqués en usine avec suivi qualité rigoureux prévu et mis en place aux différents stades :
 - Etude et qualification de la formule
 - Production du béton
 - Mise en œuvre et contrôle
- ▶ Il s'appuie sur des indicateurs de durabilité et des essais de performance pour vérifier que des formulations de béton, qui ne respectent pas les limites usuelles de composition (approche prescriptive) mais dont tous les constituants sont conformes à leur norme de référence et aptes à l'emploi selon la norme NF EN 206 + A2/CN, permettent de répondre aux exigences de durabilité spécifiées pour les classes d'expositions visées.
- ▶ Les règles d'utilisation sont fixées par le **FD P 18-480**, « Béton — Justification de la durabilité des ouvrages en béton par méthode performantielle ».



Le FD P 18-480

- ▶ propose un cadre contractuel, précisant les responsabilités de chaque acteur.
- ▶ propose des modalités de contrôle aux différentes étapes d'un projet (d'abord, essais de qualification initiale, y compris les essais de convenance; ensuite, contrôle pendant la production).
- ▶ précise les critères de conformité (et les tolérances associées à ces critères).
- ▶ conserve quelques garde-fous (teneur minimale en clinker : 15%, teneur minimale en liant total)



- ▶ Avant utilisation, la formulation du béton selon l'approche performantielle [AP] doit être approuvée (préqualifiée) au moyen d'un dossier technique pertinent détaillant la composition du béton, les performances obtenues et, en outre, les conditions limites d'application
- ▶ Au cours des phases d'essai de laboratoire et d'essais initiaux, les essais liés à la durabilité doivent être effectués par un laboratoire agréé avec des références probantes.
- ▶ Le choix de l'AP alternativement aux règles prescriptives de composition doit être acceptée par toutes les parties concernées et intégré dans les spécifications techniques du projet.
- ▶ Quelles que soient les motivations de la mise en œuvre de l'AP, elle doit être mise en œuvre de manière transparente pour toutes les parties prenantes et les justifications techniques fournies par l'entrepreneur et / ou l'usine de préfabrication et / ou le fournisseur prêt à l'emploi.



La norme NF EN 206 + A2 / CN :

► Précise :

- Que les dispositions en vigueur en France pour appliquer les méthodes performantielles sont données dans le FD P 18-480.
- Que l'application des préconisations de ce fascicule permet de déroger aux règles prescriptives sur les granulats (NA.5.2.3) et à celles des tableaux de l'Annexe NA.F.

► Reprend en outre les exigences listées sur la diapositive précédente concernant :

- La préqualification de la formule
- La qualification du laboratoire
- L'accord de toutes les parties prenantes
- La transparence de la démarche



- L'appellation normalisée du béton :
- ▶ **Béton conforme à la norme NF EN 206/CN**
 - **BPPS** (Béton Performantiel à Propriétés Spécifiées),
 - **BPCP** (Béton Performantiel à Composition Prescrite).
- ▶ **Les résistances aux classes d'exposition justifiées par l'approche performantielle devront faire l'objet d'une désignation spécifique, par exemple :**

BPPS C30/37 XF1/XS2p.

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



➤ Les nouvelles classes d'exposition (pour appliquer AP).

▶ La classe XD3 peut être subdivisée en deux classes en fonction de la fréquence de salage

- **XD3f** (salage fréquent, entre 10 et 30 jours / an)
- **XD3tf** (salage très fréquent, au-delà de 30 jours/an)

En l'absence de précision la classe XD3tf est à considérer par défaut.

▶ La classe XS3 peut être subdivisée en deux classes en fonction de la localisation des ouvrages

- **XS3m** : zone de marnage ou de projections ;
- **XS3e** : zone exposée aux embruns.

La classe XS3m intègre les parties immergées proches des zones pouvant se trouver à l'air libre (jusqu'à 5m au-dessous des plus basses eaux) et les zones de projections (jusqu'à 10 m au-dessus des plus hautes eaux).

En l'absence de précision, la classe XS3m est à considérer par défaut.



Les méthodes d'essais ont été actualisées et mise à jour dans la cadre des travaux du GT1, leurs références sont rappelées ci-après :

➤ 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



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

➤ Attaques 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

➤ Biodégradation

- Mode opératoires PERFDUB : Essais de biodégradation



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 ($\Omega.m$)	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*	2,2



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 ($\Omega.m$)	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%



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 %.



Classe d'exposition	Modulation selon la classe de facteur de vieillissement	Coefficient caractéristique de migration des ions chlorures selon XP P18-462 $D_{rcm,k,90j}$ ($\times 10^{-12}$ m ² /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 %.



- 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 UGE2021



► 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	0,50	0,45	0,40
DUP 100 ans	0,45	0,40	0,35



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 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 $D_{rcm,90j}$.



RESISTANCE AUX ATTAQUES ACIDES

Classes exposition	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 $D_{rcm,90j}$.



RESISTANCE AUX ATTAQUES PAR HYDROGENE SULFURE (H₂S)

Classe expositios	I _{bio/tem}	Béton de référe,ce	
		Ciment	Fraction volumique de pâte fVp Squelette granulaire
XA1	≤ I _{bio/tem} du béton de référence	CEM I	Equivalent au béton de référence
XA2	≤ I _{bio/tem} du béton de référence	CEM III/B SR	Equivalent au béton de référence
XA3	≤ 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)



- ▶ Planification AP = prise en compte :
 - De la période de préparation des travaux doit avoir une durée suffisante (de **4 à 6 mois**) ;
 - des essais et le dossier justificatif réalisés par un organisme expérimenté et un laboratoire d'essais disposant de références pour la réalisation de ces essais.
- ▶ Niveau de contrôles requis = f(complexité et/ou caractère exceptionnel de l'ouvrage à exécuter, agressivité de l'environnement, caractère structurel ou porteur des éléments, DUP).
- ▶ La mise en place de l'AP ne dispense pas de réaliser les essais classiques associés à la déclaration de la conformité du béton (résistance en compression, consistance...).



Les règles d'application de l'AP sont fonction de la **catégorie d'ouvrage** concernée. Ces règles définissent notamment le “niveau de contrôle” (constitution du dossier de (pré) étude, fréquence des essais, ...).

Ces catégories sont généralement les suivantes, mais le **choix définitif revient au maître d'ouvrage** :

- **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, ...).



Le choix du niveau pour l'application de la méthode de performance est décidée par le Client. Les niveaux recommandés pour l'application de la méthode de performance sont les suivants :

Catégories	Classes d'exposition	XC1	XA	Autres classes
1		N1	N2	N1
2		N1	N2	N2
3		N2	N3	N3



	Niveau	N1	N2	N3
ETUDE	Essais de durabilité en épreuve d'étude	Sur nominale : Indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité) + ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90j)	Sur nominale : Indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité) + ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90j)	Sur nominale : Indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité) + ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90j)
			Sur dérivées (pour les classes XC, XS et XD) : ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90j)	Sur dérivées (pour les classes XC, XS et XD) : ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90j)
	Interprétation des résultats d'étude	Conformité aux seuils avec marge de sécurité imposée	Sur nominale : Conformité des grandeurs associées à la durabilité aux seuils (avec marge de sécurité imposée pour l'approche absolue et les classes XC, XS et XD)	Sur nominale : Conformité des grandeurs associées à la durabilité aux seuils (avec marge de sécurité imposée pour l'approche absolue et les classes XC, XS et XD)
			Sur dérivées (pour les classes XC, XS et XD) : Conformité des grandeurs associées à la durabilité aux seuils et cohérence avec les variations de composition testées	Sur dérivées (pour les classes XC, XS et XD) : Conformité des grandeurs associées à la durabilité aux seuils et cohérence avec les variations de composition testées



	Niveau	N1	N2	N3
CONVENANCE	Essais de durabilité en épreuve de convenance	Sur nominale : Indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité)	Sur nominale : Indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité)	Sur nominale : Indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité) + ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90j)
	Interprétation des résultats de convenance	Conformité aux limites associées aux résultats d'étude	Conformité aux limites associées aux résultats d'étude	Conformité aux limites associées aux résultats d'étude et, pour les grandeurs associées à la durabilité (90j), conformité aux seuils



- ▶ Les **indicateurs associés à la durabilité** (selon les classes d'exposition) sont mesurés à 90 jours (voire 28 jours). Pour les classes XC/XD/XS, il faut justifier d'une **marge de sécurité suffisante**
- ▶ L'essai initial comprend également systématiquement la détermination des **indicateurs généraux de durabilité** suivants (pour chaque lot, 3 éprouvettes issues d'échantillons distincts) :
 - porosité à l'eau à 28 jours (dans le cas des produits préfabriqués en béton, l'absorption d'eau peut être utilisée comme alternative) ;
 - résistivité électrique à 28 jours.



Pour la formule nominale, pour les essais de performance de durabilité, en XC, XD et XS, une marge de sécurité égale à **1,5 fois l'écart type prévisionnel déclaré par le producteur de béton**.

Cet écart-type ne peut être inférieur aux valeurs déduites des coefficients de variation définis ci-dessous:

Essais	Porosité à l'eau(%)	Coefficient de migration des ions chlorures ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Essais de carbonatation accélérée ($\text{mm}/(\text{j})^{0.5}$)
COV minimal	3%	20%	20%

Pour les gâchées dérivées, les résultats obtenus pour les indicateurs/essais associés à la durabilité sont conformes aux valeurs limites admissibles et cohérents avec les variations de composition testées (e.g. les mélanges dérivés dans l'eau doivent présenter des performances supérieures pour un dosage en eau plus faible).



	Niveau	N1	N2	N3
CONTRÔLE	Essais de durabilité	Non Applicable	Indicateurs généraux à 28 jours + tous les indicateurs associés à la durabilité (90 jours)	Indicateurs généraux à 28 jours + tous les indicateurs associés à la durabilité (90 jours)
	Fréquence et interprétation	Non Applicable	Indicateurs généraux : tous les 500 m ³ ou tous les mois (période initiale : 3 mois) puis tous les 1000 m ³ ou tous les 2 mois Tous les 2 ans pour tous les indicateurs associés à la durabilité	Indicateurs généraux : tous les 500 m ³ ou tous les mois (période initiale : 3 mois) puis tous les 1000 m ³ ou tous les 2 mois Tous les 3 mois pour tous les indicateurs associés à la durabilité



► Indicateurs généraux :

- $P_{eau}(\text{témoin}) 28 \text{ jours} < 1,1. P_{eau}(\text{étude}) 28j$;

ou, dans le cas de produits en béton préfabriqués en usine pour lesquels l'absorption d'eau est utilisée comme alternative, $Ab_{eau}(\text{témoin}) 28j < 1,1 Ab_{eau}(\text{étude}) 28j$;

- La résistivité électrique à 28 jours n'est pas inférieure de moins de 20 % à celle mesurée lors des études béton.



- ▶ dans le cas de la méthode absolue (XC, XS, XD) :
 - $P_{\text{eau}, 90 \text{ jours}} \leq 1,1 \times P_{\text{eau}, (\text{limite autorisée}) 90 \text{ jours}}$;
 - $D_{\text{rcm}, 90\text{d}} \leq 1,3 * D_{\text{rcm}} (\text{limite autorisée}), 90\text{d}$;
 - Taux de carbonatation accéléré $\leq 1,3 \times (\text{limite autorisée})$;
 - Résistivité électrique $\geq 0,8 \times (\text{limite autorisée})$;
 - Allongement relatif lors des tests d'attaque aux sulfates \leq limite autorisée.

- ▶ dans le cas de la méthode comparative (XA) :
 - $D_{\text{rcm}, 90\text{d}} \leq 1,3 * D_{\text{rcm}, 90\text{d}}$ du béton de référence caractérisé lors de l'étude) ;
 - $\Delta L/L$ mesuré lors d'un essai d'attaque externe aux sulfates $\leq \Delta L/L$ du béton de référence caractérisé lors de l'étude ;
 - $I_{\text{Ca}} \leq I_{\text{Ca}}$ du béton de référence caractérisé lors de l'étude ;
 - $I_{\text{bio/tem}} \leq I_{\text{bio/tem}}$ du béton de référence caractérisé lors de l'étude.



► Exigences sur les systèmes Qualité

■ Producteur de béton

- Maîtrise de la production
 - Précisions dosage des constituants,
 - Suivi hebdomadaire teneurs en eau granulats,
 - Suivi continu humidité des sables,
 - Correction en eau +/- 10L /m3 maxi,
 - Suivi journalier des caractéristiques du béton frais.
- Contrôle externe si Niveaux N2 ou N3

■ Entreprise de construction

- Modalités de mise en œuvre du béton et d'exécution, de prélèvement pour essais de contrôle du béton, d'analyse des résultats selon FD P18-480
- Contrôle externe si Niveaux N2 ou N3

■ Laboratoire en charge des essais de qualification

- Justifie d'un système de management de la qualité
- Justifie sa performance par des campagnes interlaboratoires (PerfDuB inclus)
- Accréditation pour essais COFRAC Ok.

	Pour 100 % des gâchées
Ciment	± 4 %
Eau pesée	± max (4 %, 4 kg/m ³)
Adjuvant	± 5 %
Addition + ciment	± 4 %
Ensemble des granulats	± 4 %
Gravillon	± max (4 %, 30 kg/m ³)
Sable	± max (4 %, 30 kg/m ³)



- ▶ Le FD P 18-480 constitue un cadre réglementaire, complémentaire à la norme NF EN 206/CN pour mettre en œuvre une AP.
- ▶ L'AP peut permettre de réduire les dosages en clinker et promouvoir des approches plus vertueuses vis-à-vis de l'empreinte carbone selon le contexte donné.
- ▶ L'AP pousse tous les acteurs de l'acte de construire à travailler en étroite synergie afin de relever les enjeux majeurs de la construction durable.
- ▶ L'AP préfigure les futures évolutions de la normalisation européenne par les classes de résistance aux agressions.

