

Béton prêt
à l'emploi

APPROCHE PERFORMANTIELLE

GUIDE 2026







sommaire



Sommaire

1

Préambule

- 1.1. Objet du guide
- 1.2. Approche performantielle versus approche prescriptive
- 1.3. Historique de l'approche performantielle en France

2

Ouvrages éligibles, matériaux concernés et exigences

- 2.1. La catégorie d'ouvrage
- 2.2. La classe d'exposition

3

Conditions d'application dans le cas d'une approche performantielle par composition unique

- 3.1. Niveaux d'application
- 3.2. Qualification de la composition unique
- 3.3. Qualité des constituants
- 3.4. Teneur en ciment ou en liant
- 3.5. Spécifications selon DTU, fascicule 65 ou autre exigence
- 3.6. Règles de mise en œuvre et de dimensionnement
- 3.7. Les autres exigences et contrôles
- 3.8. Classes d'expositions
- 3.9. Appellation normalisée du béton

4

Conditions d'application dans le cas d'un domaine de composition

- 4.1. Étape 1 : Identification des constituants et du domaine de formulation
 - 4.1.1. Définir le domaine de formulation
 - 4.1.2. Qualité des constituants
- 4.2. Étape 2 : Étude Générique et ses formules — teneur en ciment et en liant total
- 4.3. Spécifications selon DTU ou autre exigence
- 4.4. Règles de mise en œuvre et de dimensionnement
- 4.5. Les autres exigences et contrôles
- 4.6. Classes d'expositions
- 4.7. Appellation normalisée du béton



5 Les étapes pour un projet (la « check-list »)

5.1. Cas de l'approche par composition unique

5.1.1. Si l'approche performantielle est prévue au marché

5.1.2. Si la variante en approche performantielle est proposée par le fournisseur de béton

5.1.3. Dossier technique et fiche de synthèse

5.2. Cas de l'approche par domaine de composition

5.2.1. Rôle des différents acteurs

5.2.2. Si la variante en approche performantielle est proposée par le fournisseur de béton

6 Essais de durabilité de l'approche performantielle

6.1. Les indicateurs et les grandeurs associés à la durabilité

6.2. Vérification de la durabilité d'une formule de béton

7 Épreuves d'étude et de convenance dans le cas d'une approche par composition unique

7.1. Épreuve d'étude (§ 7.2 et tableau 12 du FD P 18-480)

7.1.1. Essais en épreuve d'étude

7.1.2. Critères d'acceptation en épreuve d'étude

7.1.2.1. Critères d'acceptation de la formule nominale (N1, N2, N3)

7.1.2.2. Critères d'acceptation des formules dérivées (niveaux N2, N3)

7.1.2.3. Critères sur le béton de référence pour les classes XA

7.2. Épreuves de convenance

7.2.1. Essais

7.2.2. Critères d'acceptation

8 Épreuves d'étude et de convenance dans le cas d'une approche par domaine de composition

8.1. Exigences pour les bétons (domaine des bétons validés par l'EG)

8.2. Épreuve d'étude

8.3. Épreuve de convenance

9 Exigences en termes de Système Qualité du Producteur de béton, de l'Entreprise de construction, et du laboratoire en charge des essais

9.1. Producteur de béton

9.2. Entreprise de mise en œuvre

9.3. Laboratoire

Sommaire

10 Exemples de réalisation d'études

10.1. Approche par composition unique

10.1.1. Exemple n°1

- 10.1.1.1. Étape préliminaire : Vérifier la possibilité de recourir à l'approche performantielle
- 10.1.1.2. Étape 1 : Obtention de l'accord des parties
- 10.1.1.3. Étape 2 : Définition du niveau d'application
- 10.1.1.4. Étape 3 : Réalisation de l'étude en laboratoire
- 10.1.1.5. Étape 4 : Validation de l'étude et de la fiche de synthèse
- 10.1.1.6. Étape 5 : Épreuve de convenance avec l'entreprise
- 10.1.1.7. Étape 6 : Validation de la convenance
- 10.1.1.8. Étape 7 : Mise en place des systèmes d'assurance qualité
- 10.1.1.9. Étape 8 : Validation par la MOE des systèmes d'assurance qualité
- 10.1.1.10. Variante en étude avec la méthode alternative pour l'exemple 1

10.1.2. Exemple n°2

- 10.1.2.1. Étape préliminaire : Vérifier la possibilité de recourir à l'approche performantielle
- 10.1.2.2. Étape 1 : Obtenir l'accord des parties
- 10.1.2.3. Étape 2 : Définir le niveau d'application
- 10.1.2.4. Étape 3 : Réaliser l'étude en laboratoire
- 10.1.2.5. Étape 4 : Validation de l'étude et de la fiche de synthèse
- 10.1.2.6. Étape 5 : Épreuve de convenance avec l'entreprise
- 10.1.2.7. Étape 6 : Validation de la convenance
- 10.1.2.8. Étape 7 : Mise en place des systèmes d'assurance qualité
- 10.1.2.9. Étape 8 : Validation par la MOE des systèmes d'assurance qualité
- 10.1.2.10. Variante en étude avec la méthode alternative

10.1.3. Exemple n°3

- 10.1.3.1. Étape 1 : Obtenir l'accord des parties
- 10.1.3.2. Étape 2 : Définir le niveau d'application
- 10.1.3.3. Étape 3 : Réaliser l'étude en laboratoire
- 10.1.3.4. Étape 4 : Validation de l'étude et de la fiche de synthèse
- 10.1.3.5. Étape 5 : Épreuve de convenance avec l'entreprise
- 10.1.3.6. Étape 6 : Validation de la convenance
- 10.1.3.7. Étape 7 : Mise en place des systèmes d'assurance qualité
- 10.1.3.8. Étape 8 : Validation par la MOE des systèmes d'assurance qualité



10.1.4. Exemple n°4

- 10.1.4.1.** Étape préliminaire : Vérifier la possibilité de recourir à l'approche performantielle
- 10.1.4.2.** Étape 1 : Obtenir l'accord des parties
- 10.1.4.3.** Étape 2 : Définir le niveau d'application
- 10.1.4.4.** Étape 3 : Réaliser l'étude en laboratoire
- 10.1.4.5.** Étape 4 : Validation de l'étude et de la fiche de synthèse
- 10.1.4.6.** Étape 5 : Épreuve de convenance avec l'entreprise
- 10.1.4.7.** Étape 6 : Validation de la convenance
- 10.1.4.8.** Étape 7 : Mise en place des systèmes d'assurance qualité
- 10.1.4.9.** Étape 8 : Validation par la MOE des systèmes d'assurance qualité

10.2. Approche par domaine de composition

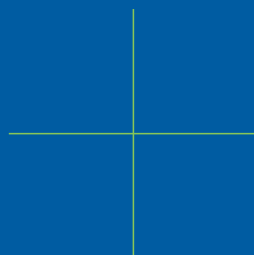
10.2.1. Exemple n°1

- 10.2.1.1.** Étape préliminaire – vérification de pouvoir recourir à l'approche performantielle
- 10.2.1.2.** Réalisation et validation de l'Étude Générique (EG)
- 10.2.1.3.** Étape 1 : Obtenir l'accord des parties
- 10.2.1.4.** Étape 2 : Définir la catégorie d'ouvrage, DUP
- 10.2.1.5.** Étape 3 : Réaliser l'étude en laboratoire
- 10.2.1.6.** Étape 4 : Validation de l'étude et de la fiche de synthèse
- 10.2.1.7.** Étape 5 : Épreuve de convenance avec l'entreprise
- 10.2.1.8.** Étape 6 : Validation de la convenance
- 10.2.1.9.** Étape 7 : Mise en place des systèmes d'assurance qualité
- 10.2.1.10.** Étape 8 : Validation par la MOE des systèmes d'assurance qualité

ANNEXE A

Facteur de vieillissement

- A.1** Définition
- A.2.** Le concept
- A.3.** L'utilisation dans le FDP 18-480



1

Préambule

1.1. Objet du guide

Ce guide, rédigé par les membres de la commission technique du SNBPE, vise à orienter et aider à l'application de l'approche performantielle pour la formulation, la production et le contrôle du béton. Cette approche, dont une première version avait été introduite par le complément national de la norme Béton NF EN 206+A2/CN:2022 et le fascicule de documentation FD P18-480:2022, vient de connaître de récentes évolutions normatives.

Les versions 2025 de ces documents élargissent les possibilités d'application de cette approche à un domaine de composition des bétons associés à un ensemble de composition de liants totaux.

Ce guide, dont l'objet est de permettre de mieux comprendre ces évolutions, s'adresse à tous les acteurs impliqués dans l'utilisation de béton pour

un projet d'ouvrage (prescripteurs, producteurs, entreprises, maîtrise d'œuvre, bureaux de contrôle) tant pour le domaine du Béton Prêt à l'Emploi (BPE) que de la préfabrication, bien qu'en étant principalement focalisé sur le premier domaine.

Cette approche constitue une nouveauté importante dans la construction en béton, et comporte de nombreuses implications, tant dans sa conception que dans sa mise en œuvre pratique. Ces implications sont brièvement indiquées dans la suite, pour être détaillées dans les chapitres suivants.

N.B. : Ce guide présuppose une connaissance de base de la norme béton NF EN 206+A2/CN (notamment les concepts de classe d'exposition, de "liant équivalent" (L_{eq} et rapport E_{eff}/L_{eq}), de taux de substitution maximal de ciment par une addition (rapport $A/(A+C)$)).

1.2. Approche performantielle versus approche prescriptive

La fabrication et le contrôle du béton prêt à l'emploi sont régis en France par les déclinaisons nationales successives de la norme béton européenne EN 206.

La version nationale la plus récente de cette norme avec son complément national (NF EN 206+A2/CN : 2025) spécifie notamment :

- **les constituants** admis pour la fabrication du béton;
- **les limites de composition** ou les préconisations de matériaux spécifiques en fonction des classes d'exposition du béton ;
- **les conditions de fabrication** ;
- **les méthodes de contrôle** qui permettent d'assurer la conformité normative.

Ce texte a été fondé historiquement sur une **approche dite "prescriptive" : selon cette approche, les propriétés de durabilité du béton, en fonction des classes d'exposition, sont assurées lorsque des valeurs limites de composition du béton sont respectées**

et certaines de ces propriétés vérifiées.

Les limites de composition (données dans l'annexe NA.F de la norme Béton) sont relatives :

1. aux dosages minimaux en Liant équivalent (L_{eq}) ;
2. aux valeurs maximales du ratio Eau efficace / Liant équivalent (E_{eff}/L_{eq}) ;
3. à la nature des constituants (notamment les types de ciment ou le respect de codes pour les granulats) à utiliser dans certaines classes d'exposition ;
4. aux valeurs maximales du rapport $A/(A+C)$ dans le cas de combinaisons d'un ciment avec une addition.

En complément de ces limitations de composition, des prescriptions sont également fournies sur la classe de résistance mécanique minimale du béton à respecter et sur la quantité maximum de granulats recyclés autorisés. Pour certaines classes d'exposition liées au gel, des teneurs minimales en air du béton sont également exigées.

Dans le cadre de l'approche **prescriptive**, le respect des limitations de composition (**obligation de moyens**) et la vérification expérimentale des résistances mécaniques (**obligation de résultats**), permet de considérer que les propriétés de durabilité sont atteintes, ceci sur la base des acquis historiques de l'expérience et de la pratique.

La nouveauté principale introduite par l'**approche performantielle** consiste dans la possibilité de justifier les **propriétés de durabilité d'un béton** par le biais d'**essais expérimentaux directs** sur la formule du béton candidat ou les extrémités d'un domaine de composition, ceci tant pour leur composition cible que pour le contrôle qualité en production et en mise en œuvre.

La réalisation de ces essais, et la vérification du respect de limites pour des paramètres de durabilité, permet donc de déroger aux limites compositionnelles de l'approche prescriptive. Le principe qui préside à la démarche est l'**équivalence de durabilité du béton pour l'utilisateur final**, qui doit être évidemment la même, quelle que soit l'approche choisie.

IMPORTANT :

- La dérogation du béton à la classe mécanique minimale spécifiée pour la ou les classes d'exposition visée(s) n'est pas autorisée.
- Les matériaux utilisés doivent être autorisés par la norme béton NF EN 206+A2 / CN, et conformes à une norme produit appelée par la norme béton.
- L'approche performantielle du FD P 18-480 ne couvre pas la justification par approche performantielle pour les classes d'exposition XF2 (sauf si assimilable à XD3), XF3 et XF4. En cas de dérogation sur une ou plusieurs exigences de l'annexe NA.F, il faut se reporter aux "Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel" (guide de 2021 de l'Université Gustave Eiffel, nouveau guide qui remplace les précédentes Recommandations LCPC de 2003).
- Pour les classes d'exposition XS2 et XS3, lors de l'utilisation de l'approche performantielle, des règles complémentaires s'appliquent, cf. § 6.2 du présent document.
- L'approche performantielle ne permet pas de déroger aux éventuelles exigences de composition d'un DTU spécifié par le marché (cas des bétons de dallage par exemple, devant répondre au DTU 13.3).

Il est important de rappeler également que l'application de l'approche performantielle pour un béton dans un projet ne peut se faire qu'avec l'accord explicite de l'ensemble des parties (notamment maîtrise d'œuvre et maîtrise d'ouvrage) et la mise en place d'un système qualité spécifique des différents intervenants (fournisseur de béton, laboratoire, entreprise de mise en œuvre). Dans le cas d'un ouvrage de génie civil, le rôle du maître d'œuvre et du contrôle extérieur est précisé dans le fascicule FDP 18-480.

L'attention des parties prenantes doit porter sur le phasage et la charge relative à la mise en œuvre de l'approche performantielle. L'organisation des essais, leur anticipation par rapport au calendrier de fourniture du béton, le repérage des laboratoires qualifiés pour la réalisation des essais et les coûts correspondants devront être pris en compte en amont pour une bonne application de cette approche.



* Guide technique, collection « techniques et méthodes », « Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel. Environnements hivernaux rigoureux », Université Gustave Eiffel, novembre 2021.

1.3. Historique de l'approche performantielle en France

Historiquement, la recherche dans le domaine de l'approche performantielle s'est concrétisée par la parution de plusieurs documents :

2004 : publication d'un Guide de l'AFGC (*Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages*) ;

2009 : publication de recommandations provisoires de la FNTP / FFB / CERIB / FIB (*Méthodologie d'application du concept de performance équivalente des bétons*) ;

2010 : publication des recommandations provisoires du LCPC (*Maîtrise de la durabilité des Ouvrages d'art en béton*) ;

L'initiative la plus vaste dans le domaine a été **le Projet National PERFDUB coordonné par l'IREX²**, qui a impliqué 52 partenaires, et s'est déroulé entre **2015** et **2020**.

Ce projet de recherche, en s'appuyant sur les travaux précédemment cités, a notamment coordonné :

- l'identification des grandeurs et indicateurs de durabilité nécessaires,
- une vaste série d'essais de durabilité en laboratoire pour définir ou revisiter des modes opératoires,
- des diagnostics d'ouvrages anciens,
- une proposition de modélisation de la durée de service pour les classes XC, XS et XD (en synergie avec le projet ANR Modevie),
- la proposition de valeurs seuils pour les grandeurs de durabilité permettant de justifier la durabilité d'un béton en fonction, entre autres, de la classe d'exposition et la durée d'utilisation du projet (DUP) visées,
- une proposition de contractualisation de l'approche performantielle.

Le travail de ce projet national a été résumé dans une publication scientifique . Il a permis d'alimenter la rédaction d'un **fascicule de documentation** relatif à l'approche performantielle :

FD P 18-480, Justification de la durabilité des ouvrages en béton par méthode performantielle, avec une première version en **octobre 2022**.

La norme béton NF EN 206+A2/CN:2022, prévoyait donc la possibilité d'application de cette méthode via son paragraphe NA. 5.3.3 qui appelle le fascicule FD P18-480.

Depuis 2022, les travaux du groupe d'expert GE SBC (Solution Bas Carbone) de la commission P18B de l'AFNOR (en charge des normes relatives au béton) ont conduit à la révision du fascicule FD P18-480 ainsi que du complément national pour introduire la notion d'approche performantielle par domaine de composition.

Toute référence à «l'approche performantielle» dans ce document, est à entendre comme l'application de cette approche selon la formalisation du FD P 18-480:2025.



² IREX : Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil.

³ « Approche performantielle de la durabilité des ouvrages en béton : de la qualification en laboratoire au suivi d'exécution » - Ed. Eyrolles Ou en téléchargement : [Approche performantielle de la durabilité des ouvrages en béton \(perfdub.fr\)](http://Approcheperformantielle.de.la.durabilite.des.ouvrages.en.beton(perfdub.fr))

Tableau 1

Les principales différences entre l'approche prescriptive et les 2 approches performantielles.

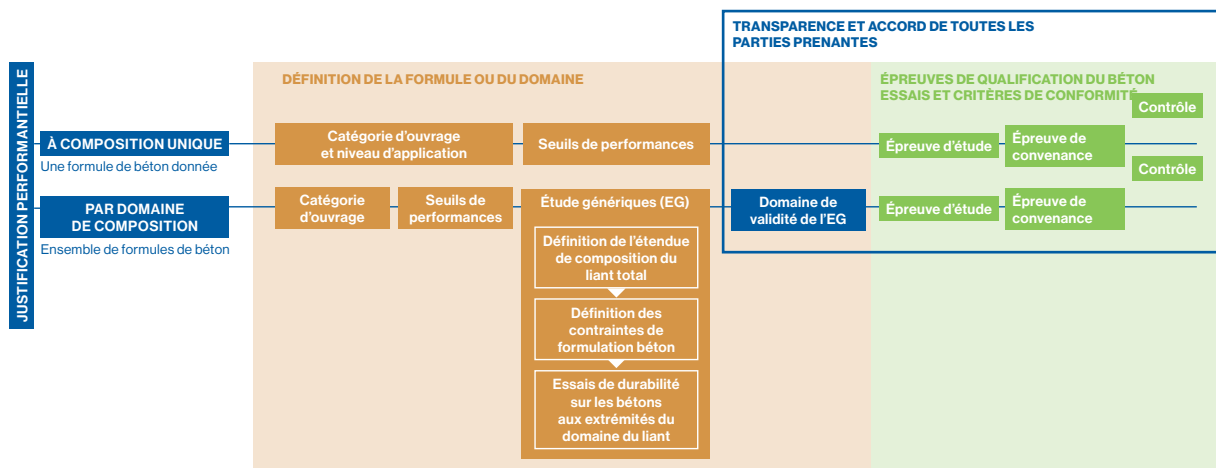
POINTS DE COMPARAISON	APPROCHE PRESCRIPTIVE	APPROCHE PERFORMANTIELLE	
		PAR COMPOSITION UNIQUE	PAR DOMAINE DE COMPOSITION
DUP	50 ans	50 ou 100 ans	50 ou 100 ans
CLASSES EXPOSITION	toutes	toutes sauf XF3 et XF4* XF2 si assimilable à XD3	toutes sauf XF3 et XF4* XF2 si assimilable à XD3
CIMENTS	Ciments NF EN 197-1, 5	Ciment NF EN 197-1, 5 et 6	Ciment NF EN 197-1, 5 et 6
COMPOSITION DU LIANT	tableaux NA.10	dérogations	dérogations
GRANULATS NATURELS	articles 5.1.3 et NA.5.1.3.1	dérogations	articles 5.1.3 et NA.5.1.3.1
GRANULATS RECYCLÉS	articles NA.4.3.3 et NA.5.1.3.2	pas de limitation de Tx**	R0 ou R1 pour type 1
LIMITES DE COMPOSITION	tableaux NA.F.	dérogations avec validation à faire	dérogations avec validation à faire
	liant équivalent	liant total avec clinker $\geq 15\%$ et teneurs minimales imposées selon l'exposition	liant total avec clinker $\geq 25\%$ et teneurs minimales imposées selon l'exposition
MENTION XC1(++) XC4(++)	oui, article NA.F.1	oui en fonction des essais de durabilité	oui en fonction des essais de durabilité

* Pour les bétons XF3 et XF4, se reporter au guide technique IFSTTAR « recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel ».

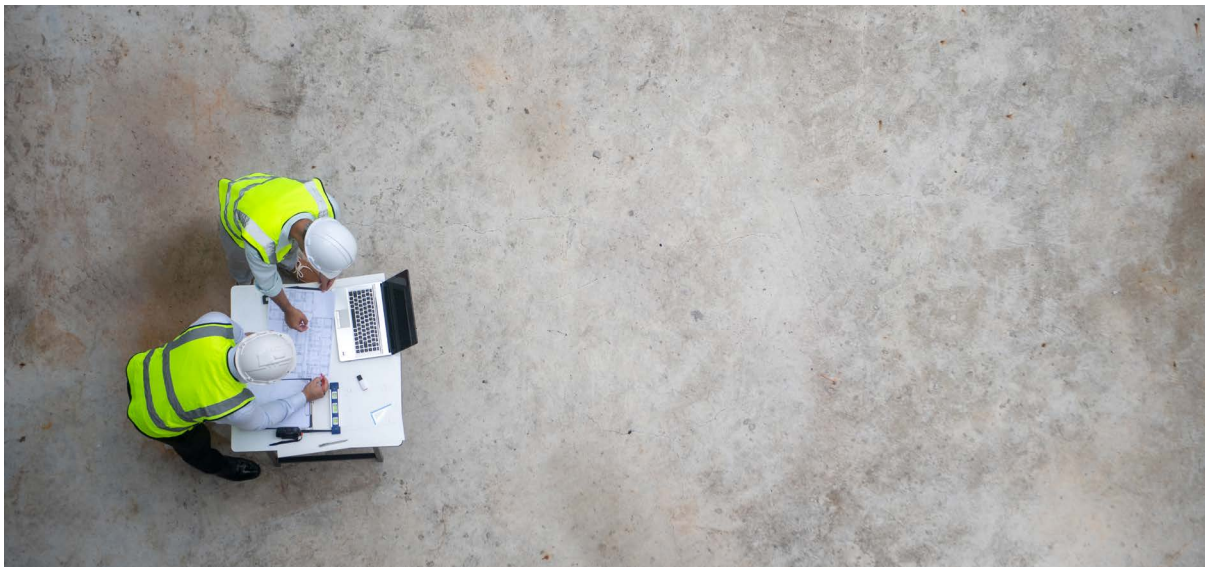
** En fonction du Tx des exigences complémentaires peuvent être à vérifier pour le dimensionnement ou la tenue au feu de l'ouvrage.

Figure 1

Les grandes étapes des 2 approches performantielles



* Par exemple : E_{eff}/L_{tot} max ; classe de résistance minimale ; consistance limite...



2

**Ouvrages
éligibles,
matériaux
concernés
et exigences**

L'approche performantielle peut être appliquée à des ouvrages de Bâtiment ou de Génie Civil pour des Durées d'Utilisation du Projet (**DUP**) de **50 ou 100 ans**.

Le processus applicable (c'est-à-dire le niveau et l'exigence de la démarche) dépend de la catégorie d'ouvrage (ou de la partie d'ouvrage) concernée et de la (ou les) classe(s) d'exposition visées.

2.1. La catégorie d'ouvrage

La catégorie d'ouvrage peut être 1, 2 ou 3.

- **Catégorie 1 - Eléments intérieurs des bâtiments, non structurels ou ne contribuant pas à la stabilité structurelle ; ouvrages provisoires ou facilement remplaçables**

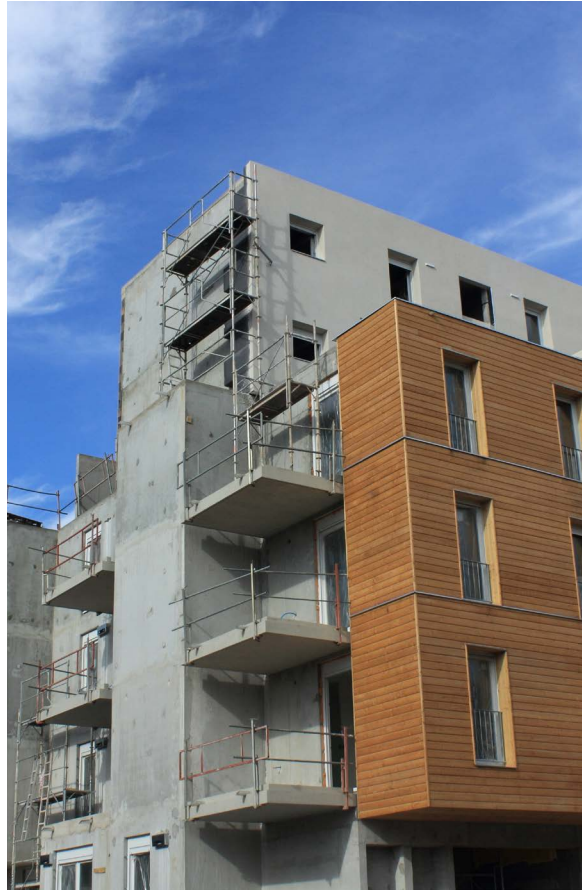
(exemples non exhaustifs : garde-corps ; éléments préfabriqués pour voirie piétonne...).

- **Catégorie 2 – Bâtiments et certains ouvrages courants de génie civil avec DUP = 50 ans**

(exemples non exhaustifs : planchers, poteaux, poutres BA ; prédalles PC ; fondations ou radiers...).

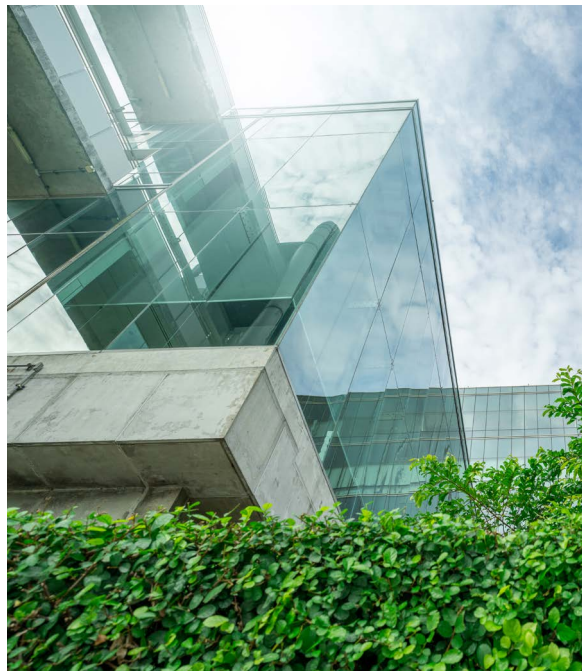
- **Catégorie 3 – Ouvrages conçus pour une DUP = 100 ans ou ouvrages exceptionnels**

(exemples non exhaustifs : centrales nucléaires, barrages, tunnels, bâtiments de prestige, etc.).



2.2. La classe d'exposition

Selon le type de l'approche, formule unique ou domaine de composition, la classe d'exposition conditionnera le type d'essais à réaliser et, le cas échéant, le niveau d'application (voir article 3.1 de ce document).



3

**Conditions
d'application
dans le cas
d'une approche
par composition
unique**



3.1. Niveaux d'application

Le niveau d'application de la démarche dépend, outre de la catégorie d'ouvrage, de la **classe d'exposition** de la partie d'ouvrage concernée.

Ces deux critères permettent en effet d'établir le niveau d'application (c'est-à-dire la sévérité) de l'approche performantielle à choisir, selon le tableau 2 suivant :

Tableau 2

Niveaux recommandés d'application de la méthode performantielle (Tableau 2 du FD P 18-480)

Catégorie d'ouvrage	Classe d'exposition		
	XC1	XA1, XA2, XA3	Autres classes sauf XF2*, XF3 et XF4
1	N1	N2	N1
2	N1	N2	N2
3	N2	N3	N3

* Sauf si assimilables à XD3, application des règles pour XD3.

Sur la base du niveau d'application (N1, N2 ou N3), défini par le maître d'ouvrage, sont déterminées les exigences à respecter pour l'utilisation de l'approche performantielle par composition unique, notamment en termes d'essais expérimentaux à produire pour la justification de la durabilité (étude et convenance), ainsi que le niveau de contrôle pendant la production.

3.2. Qualification d'une formule unique

Cette approche performantielle s'applique à une formule unique parfaitement définie, aussi bien pour les constituants entrant dans la composition que pour leur dosage (sauf quelques ajustements relatifs au dosage en adjuvant cf. § 7.1.1 du présent document), cela pour une classe de résistance minimale et une ou des classes d'exposition données.

Note 1 : il peut être admis qu'une qualification pour une classe d'exposition donnée s'étende aux classes d'exposition inférieures du même type d'exposition (par exemple, un béton qualifié pour la classe d'exposition XS3 l'est aussi pour la classe d'exposition XS2 ou XS1; l'exception concerne la qualification de béton pour la classe d'exposition XC3 pour laquelle la qualification en XC4 n'est pas forcément suffisante).

Note 2 : L'étude peut couvrir plusieurs classes d'exposition si les essais correspondants sont effectués (par exemple XC4 et XS1).

3.3. Qualité des constituants

Les constituants du liant (ciment (s) et addition(s)) doivent être conformes aux normes produits relatives, mentionnées dans la norme béton NF EN 206 +A2/CN (§ NA.5.1.2, NA.5.1.6).

Les seuls **ajouts autorisés** (au sens de de la norme NF EN 206 +A2/CN § NA.5.1.7) sont les **fibres** et les **agents de viscosité**⁴.

Note : Les constituants faisant l'objet d'un agrément technique européen ne sont pas acceptés.

3.4. Teneur en ciment ou en liant

Le fascicule FD P 18-480 définit la notion de « liant total » qui correspond à la somme du ou des ciments et additions éventuelles du béton visé. Cette définition ne s'applique que dans le contexte particulier de l'approche performantielle, et pas en approche prescriptive où c'est la notion de liant équivalent qui s'applique.

Un certain nombre de « garde-fous » s'appliquent à la teneur minimale en liant et à la composition de ce liant total :

- Dans tous les cas, la teneur en clinker du liant total doit être supérieure à 15% de l'ensemble « ciment (s) + addition(s) ».
- Le clinker doit provenir de ciments conformes aux normes NF EN 197-1, NF EN 197-5 ou NF EN 197-6, la valeur à considérer étant la teneur en clinker minimale garantie pour le ciment considéré, hors sulfate de calcium.

Note : Pour le calcul de la teneur en clinker, on pourra prendre les hypothèses suivantes :

• Dans le cas de ciments conformes à la NF EN 197-1, NF EN 197-5 ou NF EN 197-6 et bénéficiant de la marque NF Liants Hydrauliques, on peut considérer la valeur minimale garantie par le fabricant

• Dans le cas de ciment conforme à la norme NF EN 197-1 non-détenteur de la marque NF Liants hydrauliques, il faut considérer la teneur minimale par type de ciment tel que donné dans le tableau de la norme NF EN 197-1 (exemple : 80 % pour un CEM II/A).

• Pour les classes XC et la classe XF1, la teneur en liant total doit être supérieure à 260 kg/m³.

• Pour les autres classes, la teneur en liant total doit être supérieure à 300 kg/m³.

3.5. Spécifications selon DTU, fascicule 65 ou autre exigence

Si le marché spécifie d'autres textes de références concernant la formulation du béton, en complément, de la norme NF EN 206+A2/CN, ces textes doivent également s'appliquer.

C'est le cas des bétons de dallage par exemple, pour lesquels des spécifications sont imposées en termes de teneur minimale en liant équivalent et type de ciment selon le DTU 13.3 et qui doivent être respectées.

⁴ Il est rappelé que, selon la NF EN 206+A2/CN, les **pigments de coloration** (colorants) sont à considérer comme des **additions**, sans caractère liant (coefficient $k = 0$ dans le calcul du liant équivalent) ; ils sont autorisés lorsqu'ils respectent la norme NF EN 12878.

3.6. Règles de mise en œuvre et de dimensionnement

Il est important de noter que les règles de mise en œuvre du béton et d'exécution restent inchangées. Selon le cas, la mise en œuvre s'effectue conformément à la norme NF EN 13670/CN pour le béton prêt à l'emploi, la norme NF EN 13369 pour les bétons fabriqués en centrale de préfabrication, le fascicule 65 pour les ouvrages de Génie Civil, le DTU 21 pour les travaux de bâtiment...

Il convient de noter l'importance du respect des règles sur la durée de "cure" des bétons selon le rapport $f_{c(2j)} / f_{c(28j)}$ du béton et la classe de cure, car certains bétons formulés selon cette approche pouvant avoir des cinétiques de durcissement lentes.

Les règles de dimensionnement de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage restent inchangées. En particulier,

la classe de résistance du béton doit être conforme à la classe de résistance minimale de la classe d'exposition concernée, et bien évidemment, il convient de respecter les classes de résistance mécanique du Bureau d'Études pour la partie d'ouvrage concernée.

En revanche, 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. Il existe néanmoins une possibilité de réduction du $C_{min,dur}$ si une démonstration d'une durabilité supérieure est apportée (voir les exemples du chapitre 10 de ce guide).

3.7. Les autres exigences et contrôles

A l'exception des dérogations explicitées ci-dessus, les autres exigences de la NF EN 206+A2/CN s'appliquent aux bétons formulés par approche performantielle :

- **Classe de consistance ;**
- **Valeur du D_{max} ;**
- **Classe de chlorures...**

Les contrôles de résistance mécanique sont effectués aux mêmes fréquences que celles s'appliquant aux bétons formulés par approche prescriptive, **la notion de famille ne s'appliquant pas à ce type de béton.**



3.8 Classes d'expositions

Dans le cas des classes d'expositions XD3 et XS3, le FD P 18-480 distingue deux sous-classes selon l'intensité de l'agression

1. Pour la classe XD3 :

Suivant la fréquence de salage, évaluée selon les critères donnés dans la norme béton, une classe XD3f (salage fréquent) ou XD3tf (salage très fréquent) peut être retenue.

Note 1: En l'absence de précision du prescripteur, la classe XD3tf est à considérer par défaut.

Note 2: Pour la formulation du béton, cette distinction ne s'applique que dans le cadre de cette approche performantielle

2. Pour la classe XS3 :

Il est possible de distinguer deux sous classes :

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

La classe XS3m intègre les parties immergées qui sont proches de zones aérées (typiquement jusqu'à 5 m au-dessous des plus basses eaux) et les zones de projections (typiquement jusqu'à 10 m au-dessus des plus hautes eaux).

Note 3: En l'absence de précision du prescripteur, la classe XS3m est à considérer par défaut.

Note 4: Pour la formulation du béton, cette distinction ne s'applique que dans le cadre de cette approche performantielle.

Note 5: En cas de conditions particulières (telles que la topographie), les distances précitées pourront être portées à 5 km pour la classe XS1 et à 500 m pour la classe XS3.

3.9 Appellation normalisée du béton

Pour les bétons formulés par une approche performantielle, la mention BPPS ou BPCP, selon le cas, doit figurer explicitement sur le bon de livraison. De plus, les classes d'exposition dont la conformité est justifiée par la méthode performantielle par formule unique, doivent être identifiées par ajout du suffixe « p ».

EXEMPLE POUR UN BÉTON RESPECTANT L'APPROCHE PRESCRIPTIVE POUR XF1, MAIS L'APPROCHE PERFORMANTIELLE POUR XA2, IL SERA APPELÉ BPPS C35/45 XF1 XA2p.



4

**Condition
d'application
dans le cas
d'une approche
par domaine
de composition**

L'approche performantielle a été initialement introduite pour des formules de béton à **composition unique** (voir § 3 du présent guide) : l'étude se cantonnant à une seule formule béton, destinée à un chantier spécifique (version FD P 18-480 de 2022).

La nouvelle version du FD P 18-480 (2025) introduit une nouvelle approche complémentaire, celle du **domaine de formulation du béton**.

L'étude ne se limite pas à une formule, mais **vise plutôt à définir un domaine de formulation du béton, associé à un ensemble de composition de liants totaux qui est étudié dans son entièreté quant à ses propriétés de durabilité** (« Etude Générique : EG »).

Il est possible ensuite, sur la base de cette étude, de décliner son application à des formules spécifiques, **dont le liant reste dans l'ensemble de liants étudiés**, à travers différentes étapes (« épreuve d'étude », « étude de convenance », « contrôle de production »).

Cette nouvelle approche n'est pas applicable aux classes XF3 et XF4 ni aux classes XF2 non assimilables à XD3.

Les différentes phases de la démarche sont décrites dans les paragraphes suivants.

4.1. Étape 1 : Identification des constituants et du domaine de formulation à valider par étude générique

4.1.1. Définir le domaine de formulation

Cette **première étape** se décompose en trois sous-phases :

1. Identifier les constituants du liant que l'on souhaite utiliser, c'est à dire le liant total :

Le liant total est à considérer comme l'ensemble des constituants (**ciments** et **additions**, au sens précisé par la NF EN 206+A2 :2025, voir § 3.3 ci-dessus) intervenant dans les recettes bétons qu'on souhaite fabriquer.

Le liant total doit satisfaire à ces conditions :

- être constitué par **2 ciments d'un même fournisseur**, ou bien par **un ciment et une ou deux additions** ;
- correspondre, pour sa composition, **à des ciments selon la norme EN 197-1, EN 197-5 ou EN 197-6**, avec l'obligation complémentaire d'une teneur en clinker minimale de 25% de la masse de liant total.

Le liant total ainsi reconstitué peut être de nature **binaire, ternaire ou quaternaire** (au sens de la combinaison de clinker de ciment Portland avec des additions).

Note : Des additions de nature siliceuse ou calcaire peuvent être incluses, en tout ou en partie, dans le calcul du liant total (indépendamment de leur fonction de correcteur granulaire).

2. Définir les extrémités de l'ensemble de composition du liant total

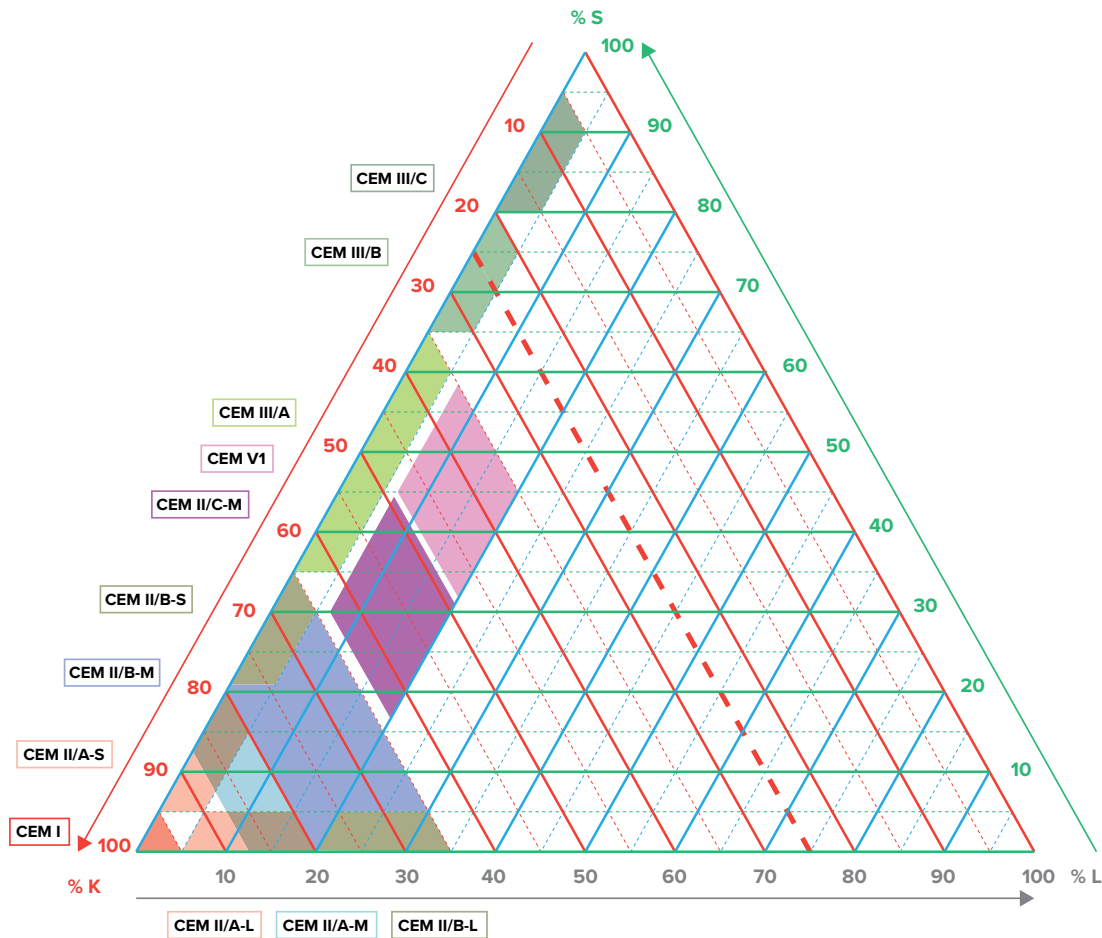
Le béton que l'on souhaite produire devra respecter les limites de composition du liant total ainsi définis (voir exemples ci-dessous).

Comme indiqué au paragraphe précédent, la composition du liant total ainsi définie doit respecter les règles de composition pour un ciment conforme à la NF EN 197-1, NF EN 197-5 ou NF EN 197-6.

Cet ensemble peut être typiquement représenté dans un diagramme ternaire (voir figure 2) ; pour reprendre l'exemple cité dans le FD P 18-480 (2025) :

Figure 2

Cas des ciments conformes à la NF EN 197-1 ou 197-5 dans le cas d'un mélange K (clinker), S (laitier de haut-fourneau), LL (calcaire)



K, **S**, et **LL** représentant les pourcentages massiques, respectivement de clinker (**K**), laitier (**S**) et calcaire (**LL**) dans le liant total ;

Ex1 et Ex2 : L'ensemble de liants totaux peut avoir une extension dans les 2 dimensions du plan du diagramme (triangles).

Ex3 et Ex4 : L'ensemble de liants peut se réduire à une seule dimension (segment, **Ex3** – en pratique, un mélange binaire de clinker (**K**) et de calcaire (**LL**); **Ex4** – un mélange de clinker (**K**) avec des quantités égales entre elles de laitier (**S**) et de calcaire (**LL**)).

Le domaine doit avoir une amplitude maximale de $\pm 10\%$ (compositions massique) pour la teneur du clinker et des autres constituants.

Note : Cette amplitude doit tenir compte de la variabilité de la composition du ciment utilisé (garantie du fabricant).

L'étendue de la composition ne peut pas être réduite à un point⁵ et doit être au minimum de $\pm 5\%$ pour le clinker et les autres constituants

Enfin, pour le cas de l'approche performantielle par domaine de composition, la **teneur massique minimale du clinker dans le liant total est de 25%⁶.**

⁵ On applique alors l'approche par composition unique.

⁶ Contrairement au cas de l'approche performantielle en composition unique, où cette teneur peut être ramenée à 15%.

4.1.2. Qualité des constituants

Comme pour le cas de l'approche par composition unique, les constituants du liant (ciment (s) et addition(s)) doivent être conformes aux normes produits relatives, mentionnées dans la norme béton NF EN 206 +A2/CN (§ NA.5.1.2, NA.5.1.6).

Les seuls **ajouts autorisés** (au sens de de la norme NF EN 206 +A2/CN § NA.5.1.7) sont les **fibres** et les **agents de viscosité**.

Note : Les constituants faisant l'objet d'un agrément technique européen ne sont pas acceptés.

4.2. Étape 2 : Étude Générique et ses formules - teneur en ciment et en liant total

Une fois établi l'ensemble **de composition des liants totaux**, il est nécessaire de définir, dans le cadre de « **l'étude générique** » (EG), les formules de béton aux extrémités du domaine, ainsi que celle se situant au milieu de ce dernier (c'est-à-dire, le barycentre du domaine).

Ces formules seront évaluées du point de vue expérimental pour en établir la durabilité, ainsi que les caractéristiques à l'état frais et durci.

De plus, toutes ces formules (« formules de l'étude générique ») doivent respecter des contraintes de dosage sur le m³ de béton :

1. Pour les classes **XC** et la classe **XF1**, la teneur en **liant total doit être supérieure ou égale à 260 kg/m³**.
2. Pour les **autres classes**, la teneur **en liant total doit être supérieure ou égale à 300 kg/m³**.

3. Dans tous les cas, la **teneur en clinker du liant total doit être supérieure à 25%** de l'ensemble « ciment(s) + addition(s) ».

Note : Pour le calcul de la teneur en clinker, on pourra prendre les hypothèses suivantes :

a. Dans le cas de ciments conforme à la NF EN 197-1, NF EN 197-5 ou NF EN 197-6 et bénéficiant de la marque NF Liants Hydrauliques, on peut considérer la valeur déclarée par le fabricant ;

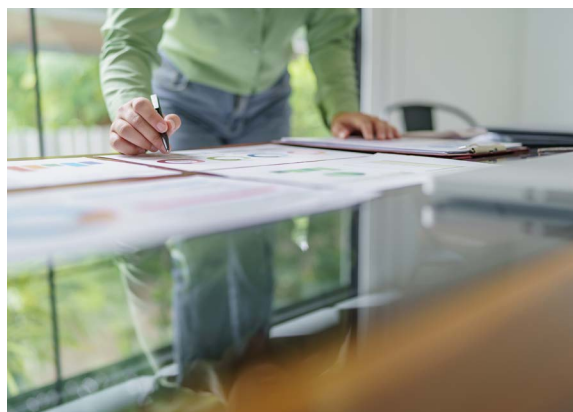
b. Dans le cas de ciment conforme à la norme NF EN 197-1 mais non-détenteur de la marque NF Liants hydrauliques, il faut considérer la teneur minimale par type de ciment tel que donné dans le tableau de la norme NF EN 197-1 (exemple : 80 % pour un CEM II/A).

Les détails des essais à réaliser pour justifier l'ensemble des formules de l'EG sont précisés au paragraphe 6.2 du présent document.

4.3. Spécifications selon DTU ou autre exigence

Comme pour le cas de l'approche performantielle à composition unique, si le marché spécifie d'autres textes de références concernant la formulation du béton, les contraintes précisées par ces derniers s'appliquent en plus des celles de la norme béton NF EN 206+A2/CN.

C'est le cas, notamment, des bétons de dallage, pour lesquels des spécifications sont imposées en termes de teneur minimale en liant équivalent et type de ciment selon le DTU 13.3, et qui doivent être respectées.



4.4. Règles de mise en œuvre et de dimensionnement

Idem § 3.6 du présent document.

4.5. Les autres exigences et contrôles

Idem § 3.7 du présent document.

4.6. Classes d'expositions

Idem § 3.8 du présent document. Par ailleurs, pour les classes XS2 et XS3 voir le § 6.2 du présent document.

4.7. Appellation normalisée du béton

Pour les bétons formulés par une approche performantielle, la mention BPPS ou BPCP, selon le cas, doit figurer explicitement sur le bon de livraison

Dans le cas de l'approche performantielle par domaine de composition, la mention doit inclure les lettres « d » suivi du chiffre 1, 2 ou 3 selon la catégorie d'ouvrage retenue.

PAR EXEMPLE :

BPPS C35/45 XC4 XD3d2 S3 D22,4 CI

0,40 désigne un béton qui répond selon l'approche prescriptive aux contraintes de la classe d'exposition XC4 ; selon la **méthode performantielle par domaine de composition** en catégorie d'ouvrage 2, pour la classe d'exposition XD3.



5

Les étapes pour un projet (la 'check-list')

5.1. Cas de la formulation unique

5.1.1. Si l'approche performantielle est prévue au marché

Dans le cas où l'approche performantielle est prévue dans le marché, les rôles des différents acteurs aux différentes phases du chantier sont définis dans le tableau 3 ci-dessous.

Tableau 3

Rôle des acteurs dans la démarche (approche prévue au marché).

	ACTEURS					REMARQUES
	MOA	MOE	ENT.	PROD	LABO	
ACCORD DES PARTIES PRENANTES	I	A	A	A		Implicite car dans le CCTP.
DÉFINITION DU NIVEAU D'APPLICATION PAR PARTIE D'OUVRAGE	I					-
RÉALISATION DE L'ÉTUDE EN LABORATOIRE				I	A	Si références probantes, cette étape n'est pas nécessaire.
PROPOSITION D'UN BÉTON SUR LA BASE D'UNE FICHE DE SYNTHÈSE (*) AVEC DOSSIER TECHNIQUE (*).			I si BPCP	I si BPPS		Sur la base d'études dépendant du niveau d'application ou de références probantes selon FD P 18-480 pour le même niveau d'application.
VALIDATION DE L'ÉPREUVE D'ÉTUDE EN LABORATOIRE ET DE SA FICHE DE SYNTHÈSE		V				Sur la base du rapport d'étude.
RÉALISATION DE L'ÉPREUVE DE CONVENANCE			A	I	A	Permet de vérifier a priori que le béton, défini par sa formule nominale et fabriqué, transporté et mis en œuvre dans les conditions du chantier/de l'usine de préfabrication, satisfait aux exigences du marché.
VALIDATION EN ÉPREUVE DE CONVENANCE		V				Sur la base du rapport de convenance. La formule est alors qualifiée pour le projet.
MISE EN PLACE DE SYSTÈMES D'ASSURANCE QUALITÉ			I	I	I	Selon le niveau d'application. Toutes les parties doivent mettre en place ce système.
VALIDATION DES SYSTÈMES D'ASSURANCE QUALITÉ		V				
DÉMARRAGE DE LA PRODUCTION ET RÉALISATION DE CONTRÔLES DE DURABILITÉ EN PRODUCTION DU BÉTON				I	A	Types d'essais et fréquences correspondant au niveau d'application ; ces contrôles de durabilité sont complémentaires des contrôles sur béton prévus dans l'approche prescriptive de la norme.
CONTRÔLE UTILISATEUR SUR BÉTON			I			A adapter selon niveau.
VALIDATION DES CONTRÔLES		V				Sur la base des résultats transmis.

* cf. section 5.1.3 de ce guide.

Légende pour les tableaux 3 à 6 : **MOA** : Maître d'ouvrage • **MOE** : Maître d'œuvre (y compris bureau de contrôle) • **Ent.** : Entreprise de mise en œuvre • **Prod** : Producteur de Béton • **Labo** : Laboratoire qualifié en charge des essais de durabilité • **A** : Pour accord ou action • **I** : Initiateur de la démarche • **V** : Validation.

5.1.2. Si la variante en approche performantielle est proposée par le fournisseur de béton en réponse à l'appel d'offre

Dans le cas où l'approche performantielle n'est pas prévue dans le marché et est proposée par le fournisseur de béton en réponse à l'appel d'offre, les rôles des différents acteurs aux différentes phases du chantier sont les suivants :

Tableau 4

Rôle des acteurs dans la démarche (approche non prévue au marché, proposée par le fournisseur de BPE)).

	ACTEURS					REMARQUES
	MOA	MOE	ENT.	PROD	LABO	
ACCORD DES PARTIES PRENANTES	A	A	A	I		À obtenir.
CONFIRMATION DU NIVEAU D'APPLICATION PAR PARTIE D'OUVRAGE	I					
RÉALISATION DE L'ÉTUDE EN LABORATOIRE				I	A	En l'absence de formule préqualifiée ou de références probantes.
PROPOSITION D'UN BÉTON SUR LA BASE D'UNE FICHE DE SYNTHÈSE (*) AVEC DOSSIER TECHNIQUE (*)				I		Sur la base d'études dépendant du niveau d'application ou de références probantes pour le même niveau d'application.
VALIDATION DE L'ÉPREUVE DE L'ÉTUDE EN LABORATOIRE ET DE SA FICHE DE SYNTHÈSE		V				Sur la base du rapport d'étude fourni. Le béton est alors "préqualifié".
RÉALISATION DE L'ÉPREUVE DE CONVENANCE			A	I	A	Permet de vérifier a priori que le béton défini par sa formule nominale et fabriqué, transporté et mis en œuvre dans les conditions du chantier/de l'usine de préfabrication satisfait aux exigences du marché.
VALIDATION EN CONVENANCE		V				Sur la base du rapport de convenance. La formule devient qualifiée pour le projet.
MISE EN PLACE DE SYSTÈMES D'ASSURANCE QUALITÉ			I	I	I	Selon le niveau d'application. Toutes les parties doivent mettre en place ce système.
VALIDATION DES SYSTÈMES D'ASSURANCE QUALITÉ		V				
DÉMARRAGE DE LA PRODUCTION ET RÉALISATION DE CONTRÔLES DE DURABILITÉ EN PRODUCTION DU BÉTON				I	A	Types d'essais et fréquences correspondant au niveau d'application ; ces contrôles de durabilité sont en plus des contrôles sur béton prévus dans l'approche prescriptive de la norme.
CONTRÔLE ACQUÉREUR			I			A vérifier selon niveau.
VALIDATION DES CONTRÔLES		V				Sur la base des résultats transmis.

* cf. section 5.1.3 de ce guide.

Il convient de noter que l'accord préalable de toutes les parties est nécessaire afin que ces parties prennent conscience :

- Des contrôles spécifiques relatifs à ce type de béton ;
- Des éventuelles implications sur le dimensionnement (enrobage en particulier) ;
- Des obligations en ce qui concerne le contrôle qualité des intervenants.

5.1.3. Dossier technique et fiche de synthèse

Le contenu minimum du dossier technique est donné dans la section 7.1 du fascicule FD P 18-480 et est repris ci-dessous :

- **composition détaillée de la formule nominale ;**
- **caractéristiques de l'ensemble des constituants ;**
- **rapport d'étude (et limites de variations sur les dosages des différents constituants autorisés conformément aux épreuves d'études en laboratoire) ;**
- **rapport de convenance ;**
- **fiche synthèse (selon paragraphe 7.2.2 et annexe C du FDP 18-480) :**
 - appellation normalisée du béton performantiel ;
 - niveau d'application de la méthode performantielle ;
 - 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.

5.2. Cas du domaine de composition

5.2.1. Rôle des différents acteurs

Dans ce cas, l'approche ne peut être imposée au marché car elle nécessite la réalisation d'une étude générique en amont.

Si elle est proposée par le fournisseur de béton en réponse à l'appel d'offre, les rôles des différents acteurs aux différentes phases du chantier sont indiqués dans le tableau 5.



Tableau 5

Rôle des différents acteurs dans le cas du domaine de composition.

	ACTEURS					REMARQUES
	MOA	MOE	ENT.	PROD	LABO	
DÉFINITION DE LA CATÉGORIE D'OUVRAGE ET DES CLASSES D'EXPOSITION POUR L'EG			I	I		
DÉFINITION DU DOMAINE DE COMPOSITION DU LIANT				I	A	Le domaine de composition respecte les contraintes du § 4.
RÉALISATION DE L'ÉTUDE GÉNÉRIQUE EN LABORATOIRE				I	A	
RESPECT DES CRITÈRES SUR LES GRANDEURS DE DURABILITÉ POUR LES BÉTONS DE L'ÉTUDE GÉNÉRIQUE				V		
VALIDATION DE L'ÉTUDE GÉNÉRIQUE ET DE SA FICHE DE SYNTHÈSE				I		validation par tierce partie indépendante. (*) (**)
PROPOSITION D'UNE FORMULE BÉTON AVEC LIANT DANS LE DOMAINE VALIDÉ PAR L'ÉTUDE GÉNÉRIQUE, AVEC DOSSIER TECHNIQUE (***).			I si BPCP	I si BPPS		Sur la base d'études dépendant de la catégorie d'ouvrage ou de références probantes selon FD P 18-480 pour la même catégorie.
ACCORD DES PARTIES PRENANTES	A	A	A	I		
VALIDATION DE L'ÉPREUVE D'ÉTUDE EN LABORATOIRE		V				Sur la base du rapport d'étude.
RÉALISATION DE L'ÉPREUVE DE CONVENANCE			A	I	A	Permet de vérifier a priori que le béton défini par sa formule nominale et fabriqué, transporté et mis en œuvre dans les conditions du chantier/de l'usine de préfabrication satisfait aux exigences du marché.
VALIDATION EN ÉPREUVE DE CONVENANCE		V				Sur la base du rapport de convenance. La formule est alors qualifiée pour le projet.
MISE EN PLACE DE SYSTÈMES D'ASSURANCE QUALITÉ			I	I	I	Selon la catégorie d'ouvrage toutes les parties doivent mettre en place ce système.
VALIDATION DES SYSTÈMES D'ASSURANCE QUALITÉ		V				
DÉMARRAGE DE LA PRODUCTION ET RÉALISATION DE CONTRÔLES DE DURABILITÉ EN PRODUCTION DU BÉTON				I	A	Types d'essais et fréquences correspondant à la catégorie d'ouvrage; ces contrôles de durabilité sont complémentaires des contrôles sur béton prévus dans l'approche prescriptive de la norme.
CONTRÔLE UTILISATEUR SUR BÉTON			I			À adapter selon catégorie.
VALIDATION DES CONTRÔLES		V				Sur la base des résultats transmis.

* L'Étude Générique et ses conclusions doivent être validées par une tierce partie (indépendante du demandeur de l'étude), qui peut être :

- soit en amont de la production, un laboratoire qualifié (au sens du paragraphe 5.6.3 du FD P 18-480) et indépendant du demandeur (au sens du § 5.3.4). Ce laboratoire peut être celui ayant réalisé les essais de durabilité moyennant une organisation interne assurant une indépendance entre la réalisation des essais et leur validation
- soit en amont ou en aval de la production, un organisme certificateur si le béton correspondant fait l'objet d'une marque de certification. Dans ce cas, le règlement de certification doit couvrir la validation en amont du dossier d'Étude Générique

** La validation de l'Étude Générique et de ses conclusions porte sur la conformité au fascicule PD P 18-480 et sur les données contenues dans le dossier technique et dans la fiche de synthèse (documents indissociables).

*** Cf. section 5.2.3 de ce guide.

5.2.2. Dossier technique et fiche de synthèse

L'ENSEMBLE DES RÉSULTATS OBTENUS EN PHASE D'ÉTUDE GÉNÉRIQUE FAIT L'OBJET D'UN DOSSIER TECHNIQUE INCLUANT LES ÉLÉMENTS SUIVANTS :

- la catégorie de l'ouvrage ;
- la durée d'utilisation de projet ;
- les classes d'exposition ;
- la modulation éventuelle de classe structurale (0, 1 ou 2) ;
- la date de réalisation de l'Étude Générique ;
- la composition détaillée des formules de béton d'Étude Générique ;
- les caractéristiques de l'ensemble des constituants incluant les dernières versions des fiches techniques ;
- le rapport d'étude intégrant l'ensemble des résultats des essais réalisés à l'état frais et à l'état durci sur les bétons d'Étude Générique ;
- les limites de composition des liants totaux validés par l'Étude Générique ; cette limite peut être représentée par exemple dans un diagramme ternaire ;
- le domaine de formulations des bétons validés (rapport maximal E_{eff}/L_{tot} ; teneur minimale en liant total...);
- la fiche de synthèse de l'Étude Générique.

LA FICHE DE SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE GÉNÉRIQUE DOIT COMPRENDRE A MINIMA LES ÉLÉMENTS SUIVANTS :

- limites de composition,
- domaine d'emploi (y compris catégorie),
- références du dossier d'Étude Générique,
- désignation complète des constituants du liant total,
- essais de caractérisation et valeurs de références associées,
- identification du laboratoire en charge des essais de durabilité,
- identification du valideur de l'Étude Générique et de ses conclusions.





6

**Essais
de durabilité
des méthodes
performantielles**

6.1. Les indicateurs et les grandeurs associés à la durabilité

Deux notions préalables à la description des méthodes performantielles, et dont la distinction est importante :

- **La grandeur associée à la durabilité** : il s'agit de la grandeur physique qui décrit directement l'attaque subi par le béton pour une classe d'exposition donnée. Par exemple, pour les classes XS et XD (associées à l'action des chlorures sur les armatures du béton armé) la grandeur associée **à la durabilité** est le **coefficient de migration des ions chlorures**. Selon le cas, la mesure d'une *grandeur* de durabilité peut être assez complexe ; elle demande des équipements expérimentaux spécifiques, et est réalisée après une cure humide de 90j après la confection du béton.

- **L'indicateur de durabilité général** : il s'agit d'une mesure *indirecte* du comportement du béton vis-à-vis de la durabilité ; Pour toutes les classes d'exposition il n'y a que deux indicateurs de durabilité : **la porosité accessible à l'eau** et **la résistivité du béton**.

Note : La porosité peut être remplacée par l'absorption d'eau uniquement dans le cas de la préfabrication en usine.

Pour utiliser une métaphore médicale, nous pouvons imaginer associer le suivi de l'état d'inflammation pulmonaire d'un patient avec une **radiographie thoracique** : il s'agit d'une mesure complexe, qui doit être organisée à l'avance, dont l'appareillage n'est pas disponible partout ; elle donne une information directe et complète sur l'état inflammatoire du patient.

L'approche performantielle

GRANDEURS ASSOCIÉES À LA DURABILITÉ

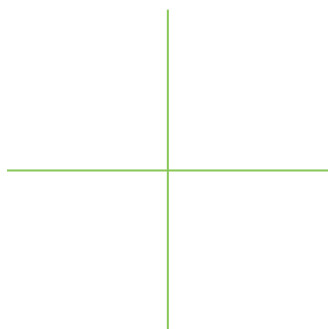


Mesure directe de la grandeur que l'on veut apprécier (état inflammatoire) complexe, longue, détaillée.

INDICATEURS DE DURABILITÉ



Mesure simple, rapide, qui indique *indirectement* la condition du patient (état inflammatoire).



Une fois le diagnostic posé, il n'est pas nécessaire de réaliser une radiographie par jour pour suivre l'évolution de l'inflammation ; on peut par exemple se limiter à suivre, à l'aide d'un simple thermomètre, la **température corporelle** du patient, et vérifier dans quel sens elle évolue. La mesure de la température est rapide, ne demande qu'une faible organisation préalable, et est plus simple à réaliser qu'une radiographie.

6.2. Vérification de la durabilité d'une formule de béton

Cette vérification se fait au stade de l'étude de laboratoire par des mesures sur béton et, dans le cas de l'application de niveau N3 (approche par composition unique), en contrôle de production béton selon des fréquences définies.

Chaque grandeur de durabilité est mesurée sur des corps d'épreuve conservés pendant **90 jours après fabrication en conditions humides normalisées** à 20°C +/-2 selon la norme NF EN 12390-2 (comme pour les corps d'épreuve de vérification de la résistance mécanique en compression par exemple). Les conditions de réalisation de l'étude comme le nombre de gâchées sont données dans le tableau 13 (composition unique) ou 18 (domaine de composition) du FDP 18-480.

• Pour les classes d'exposition XC1 à XC4 (risque de corrosion par carbonatation) :

La grandeur de durabilité à vérifier est la vitesse de carbonatation en conditions accélérées ($V_{acc,k,90}$) selon la norme d'essai NF P 18-458:2022 (méthode dite "de base").

En alternative, on peut recourir au ratio entre la porosité accessible à l'eau ($P_{eau,k,90}$) mesurée selon la norme NF P 18-459:2022 et la fraction volumique de pâte (f_{Vp}).

Note 1: Pour les classes XC3 et XC4, un essai de carbonatation en conditions accélérées doit tout de même être réalisé pour justifier le recours à la porosité accessible à l'eau comme grandeur de durabilité (cf. exemple 2).

• Pour les classes XS1 à XS3 (risque de corrosion par les chlorures de l'eau de mer) :

La grandeur de durabilité à vérifier est le **coefficient de migration** des ions chlorures selon la norme d'essai XP P 18-462:2022.

Pour les classes d'exposition XS2 et XS3, le ciment doit être "PM" selon la norme NF P 15-317 pour tenir compte de l'agressivité de l'eau de mer. Uniquement pour l'approche par composition unique, en l'absence de ciment PM, l'alternative est de vérifier la tenue chimique du béton par un essai performantiel. Cet essai est effectué comme pour la classe d'exposition XA1 pour les milieux riches en sulfates, en plus de la vérification du coefficient de migration sous champ électrique (§4.3 du fascicule FDP 18-480).

• Pour les classes XD1 à XD3 (risque de corrosion par les chlorures autres que ceux de l'eau de mer) :

La grandeur de durabilité à vérifier est le **coefficient de migration** des ions chlorures selon la norme d'essai XP P 18-462:2022.

Pour la classe d'exposition XD3, le ciment doit respecter la note h) des tableaux de la norme NF EN 206+A2/CN : "En cas d'utilisation de sels de déverglaçage, utiliser un ciment SR conforme à la NF EN 197-1 dont la teneur en SO₃ ne doit pas excéder 3,5 % pour les SR 0 et les SR 3 et 2,5 % pour les SR 5 et dont, pour les ciments CEM I et CEM II, les teneurs en C3A et C4AF du clinker doit satisfaire à la condition suivante : $(C4AF) + 2(C3A) \leq 20\%$, ou un ciment conforme à NF P 15-317 (PM) ou à NF P 15-319 (ES). S'il est prévu de n'utiliser que des sels de déverglaçage conformes aux classes A ou B de NF P 98-180, ou conformes à XP P 98-181, pendant toute la vie de l'ouvrage, il est possible de déroger à cette exigence." En cas d'approche performantielle, uniquement par composition unique, l'alternative au non-respect de ces exigences est de vérifier la tenue chimique du béton par un essai performantiel. Cet essai est effectué comme pour la classe d'exposition XA1 pour les milieux riches en sulfates, en plus de la vérification du coefficient de migration sous champ électrique.

• Pour les classes d'exposition XA1 à XA3 (risque d'attaque chimique) :

La grandeur de durabilité à vérifier dépend du type de milieu. Le choix se fait sur la base du tableau 2 de la norme béton NF EN 206+A2/CN complété du fascicule FDP 18-011 comme explicité ci-dessous.

- **Milieu riche en sulfates** : La grandeur de durabilité à vérifier est la **variation dimensionnelle relative ($\Delta L/L_m$)** du béton des corps d'épreuve en béton immergés dans des solutions concentrées en sulfates. Deux protocoles sont possibles et donnés en annexe de ce guide :

- Protocole "RSE" (Réaction sulfatique externe) par saturation ;
- Protocole "RSE" (Réaction sulfatique externe) par immersion / séchage.

Cas spécifique : Si la nature du liant utilisé pour le béton candidat respecte les critères du fascicule FD P 18-011 de la classe d'exposition visée (XA2 ou XA3 pour milieu contenant des sulfates), en alternative au protocole "RSE", la durabilité du béton peut être justifiée par la vérification du coefficient de migration sous champ électrique des ions de type chlorures selon la norme d'essai XP P 18-462.

- Milieu acide ou eaux pures : La grandeur de durabilité à vérifier est **la quantité de calcium lixivié ("I_{Ca}")** mesurée selon la norme d'essai XP P 18-482:2022.

- Milieu propice à la biodétérioration - Cas des bétons pour assainissement, attaqués par hydrogène sulfuré (H₂S) : la grandeur de durabilité à vérifier est **l'épaisseur de béton dégradé ("I_{bio}")** mesurée selon un des deux modes opératoires issus du projet national PerfDuB "Essai accéléré de biodétérioration pour qualifier les matériaux cimentaires destinés à l'assainissement en présence d'hydrogène sulfuré"⁷.

Note : Dans le cas de l'approche par domaine de composition, en XA, on ne peut pas déroger sur la nature du liant. C'est donc le cas spécifique qui s'applique systématiquement.

• Pour les classes XF (risque d'attaque par le gel-dégel) :

- Classe d'exposition XF1 : en cas de dérogation aux spécifications prescriptives pour la classe d'exposition XF1, la durabilité du béton doit être justifiée par l'approche performantielle avec les critères de la classe d'exposition XC4.

- Classe d'exposition XF2 : en cas de dérogation aux spécifications prescriptives pour la classe d'exposition XF2, la durabilité du béton doit être justifiée par approche performantielle avec les critères de la classe d'exposition XD3f sauf pour les parties d'ouvrages très exposées aux sels de déverglaçage, et donc au risque de dégradation par écaillage du béton. Dans ce cas, ce sont les règles des Recommandations de 2021 de l'Université Gustave Eiffel (Ref) qui s'appliquent. Ce guide ne s'appliquant qu'aux classes XF3 et XF4, pour la

classe d'exposition XF2, il conviendra d'appliquer les préconisations établies par ces règles pour la classe XF4.

- Classes d'exposition XF3 et XF4 : L'approche performantielle du FD P 18-480 ne couvre pas la justification pour ces classes d'exposition. Il faut se reporter aux Recommandations de 2021 de l'Université Gustave Eiffel (Université Gustave Eiffel et Cerema, Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel. Environnements hivernaux rigoureux, Techniques et Méthodes, GIT6, Octobre 2021).

• Pour les classes XM :

Les classes liées à l'abrasion (XM) ne sont pas concernées par l'approche performantielle selon le FD P 18-480.

IMPORTANT :

- La ou les grandeur(s) de durabilité sont propres à la classe d'exposition visée.

- Si le béton candidat déroge à l'approche prescriptive pour plusieurs classes d'exposition visées, les grandeurs relatives à ces différentes classes d'exposition doivent être vérifiées.

Le tableau ci-après résume les grandeurs de durabilité mentionnées précédemment par famille de classe d'exposition (méthode de base et méthode alternative éventuelle).

Comme indiqué en 6.1 du présent guide, l'approche performantielle introduit également la notion « d'indicateurs généraux de durabilité » qui permet de vérifier la conformité du béton en épreuve de convenance et en contrôle de fabrication des bétons, en plus de la résistance mécanique en compression. Dans le cas du BPE, les indicateurs généraux de durabilité sont **la résistivité électrique du béton** selon la norme d'essai XP P 18-481 et **la porosité accessible à l'eau** selon la norme d'essai NF P 18-459⁸.

Les indicateurs généraux sont mesurés sur des corps d'épreuve conservés 28 jours en conditions humides normalisées selon NF EN 12390-2 (comme les corps d'épreuve pour la vérification de la résistance mécanique à 28 jours). Comme indiqué dans le tableau récapitulatif ci-après, la mesure d'indicateurs généraux de durabilité doit être effectuée quelle que soit la classe d'exposition.

⁷ des normes sont en cours de rédaction au moment de la publication de ce guide, pour remplacer ces modes opératoires.

⁸ En usine de préfabrication, les indicateurs généraux de durabilité sont la résistivité électrique du béton et l'absorption d'eau du béton mesurée selon l'annexe F de la norme NF EN 13369.

Tableau 6

Essais relatifs à la durabilité pour l'approche performantielle.

CLASSE D'EXPOSITION	GRANDEURS DE DURABILITÉ (*)		INDICATEURS GÉNÉRAUX DE DURABILITÉ (**)
	MÉTHODE DE BASE	MÉTHODE ALTERNATIVE	
XC1, XC2	Vitesse de carbonatation accélérée $V_{acc,90j}$ (XP P18-458:2022) et Résistivité électrique du béton ρ_{90j} (XP P 18-481: 2022) pour XC2, XC3 et XC4	Porosité accessible à l'eau $P_{eau,90j}$ divisée par le volume de pâte (NF P 18-459:2022)	Porosité accessible à l'eau $P_{eau, 28j}$ (NF P18-458:2022) et Résistivité électrique du béton ρ_{28j} (XP P 18-481:2022)
XC3, XC4		Porosité accessible à l'eau $P_{eau,90j}$ divisée par le volume de pâte (NF P 18-459:2022) et Vitesse de carbonatation accélérée $V_{acc,28j}$ ou $V_{acc,90j}$ (***) (XP P18-458:2022)	
XS XD	Coefficient de migration des ions chlorure $D_{rcm,90j}$ (XP 18-462: 2022)	<i>Pas de méthode alternative</i>	
XA-Milieu riche en sulfates	Variation dimensionnelle relative $\Delta L/L_M$ (Protocole RSE issu de PerfDuB, par saturation ou immersion/séchage)	Coefficient de migration des ions chlorures $D_{rcm,90j}$ (XP P 18-462:2022) si liant conforme FD P18-011 pour classe XA sulfates visée	
XA-Milieu acide	Quantité de calcium lixivié I_{Ca} (XP P 18-482:2022)	Coefficient de migration des ions chlorures $D_{rcm,90j}$ (XP P18-462:2022) si liant conforme FD P18-011 pour classe XA acide visée	
XA-Biodégradation par H2S (acide sulfurique)	Épaisseur de béton dégradé I_{Bio} (selon un des deux essais accélérés de biodétérioration PerfDuB)	<i>Pas de méthode alternative</i>	

Légende : RSE : Réaction sulfatique externe.

* À mesurer après 90 jours de conservation humide normalisées avec des corps d'épreuve issus de 3 gâchées de la formule nominale pour XC, XS et XD et issus d'une gâchée pour la formule nominale en XA et pour les formules dérivées pour XC, XS et XD, le cas échéant.

** À mesurer après 28 jours de conservation humide normalisées avec des corps d'épreuve issus de 3 gâchées de la formule nominale.

*** Cas particulier où la vitesse de carbonatation peut être mesurée après 28 ou 90 jours de cure normalisées et avec des corps d'épreuve issus d'une seule des trois gâchées de la formule nominale.

Il convient de noter que les délais de cure (cf. préparation des éprouvettes avant essais) sont généralement de 90 jours, ce qui conduit à un délai global avec cure d'environ 6 mois pour les essais de carbonatation ou bien de 3,5 mois pour les essais les plus courts (coefficient de migration des ions chlorure).

Note : 1. La porosité accessible à l'eau utilisée en tant qu'indicateur général de durabilité est mesurée après 28 jours de cure humide • 2. La porosité accessible à l'eau prise en compte dans la grandeur associée à la durabilité : porosité accessible à l'eau divisée par le volume de pâte est mesurée après 90 j de cure humide • 3. La résistivité utilisée en tant qu'indicateur général de durabilité est mesurée après 28 jours de cure humide • 4. La résistivité permettant la modulation de valeur seuil de vitesse de carbonatation accélérée est mesurée à 90 jours de cure humide • 5. Dans le cas de la vitesse de carbonatation accélérée et de migration des chlorures, le respect des valeurs seuils à 28 jours permet d'anticiper la justification du béton.

7

**Épreuves
d'étude et de
convenance
dans le cas
d'une formule
unique**



7.1. Épreuve d'étude (§ 7.2 et tableau 12 du FD P 18-480)

7.1.1. Essais en épreuve d'étude

Tableau 7

Essais performantiels pour l'épreuve d'étude et interprétation de ces essais.

NIVEAU	N1	N2	N3
	<p>Sur formule nominale :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Prélèvement du ciment utilisé pour détermination de CE. • 3 gâchées de béton : <ul style="list-style-type: none"> - Consistance et autres propriétés du béton frais si spécifiées. - Rc à 2 jours ; Rc à 28 jours (sur chaque gâchée). - Indicateurs généraux à 28 jours (*) (porosité ou absorption d'eau, résistivité) (sur chaque gâchée). - XC, XS ou XD : ensemble des grandeurs associées à la durabilité selon classes d'exposition (90 jours de cure humide) (*) (sur chaque gâchées). 	<p>Sur formule nominale :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Prélèvement du ciment utilisé pour détermination de CE. • 3 gâchées de béton : <ul style="list-style-type: none"> - Consistance et autres propriétés du béton frais si spécifiées (sur chaque gâchée). - Rc à 2 jours ; Rc à 28 jours (sur chaque gâchée). - Indicateurs généraux à 28 jours (*) (sur chaque gâchée). - XC, XS ou XD : ensemble des grandeurs associées à la durabilité selon classes d'exposition (90 jours de cure humide) (*) (sur chaque gâchée). - XA : ensemble des grandeurs associées à la durabilité selon classes d'exposition (90 jours de cure humide) pour le béton candidat et le béton de référence (**) sur 1 seule gâchée. 	
	<p>Pas de dérivées sauf si le producteur veut pouvoir modifier les compositions en cours de production.</p>	<p>Sur formules dérivées :</p> <p>A minima, dérivées en eau et éventuellement S/(S+G) et/ou liant total et/ou dosage des adjuvants.</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 gâchée de béton par dérivée. • Consistance (et autres propriétés du béton frais si spécifiées). • Rc à 28 jours. • Pour les classes XC, XS et XD, ensemble des grandeurs associées à la durabilité selon classes d'exposition (90 jours de cure humide) (*). • Pour les classes XA, pas de détermination des grandeurs associées à la durabilité pour les dérivées. 	
INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS D'ÉTUDE	<p>Conformité aux seuils avec marge de sécurité imposée.</p>	<p>Sur formule nominale :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pour les classes XC, XS et XD : conformité des grandeurs associées à la durabilité aux seuils avec marge de sécurité imposée. • Pour les classes XA : grandeurs associées à la durabilité inférieures à celle du béton de référence (sauf cas particulier XA3 sulfates : valeur seuil à respecter). <p>Sur formules dérivées (pour les classes XC, XS et XD, hors XA) : Conformité des grandeurs associées à la durabilité aux seuils et cohérence avec les variations de composition testées.</p>	

Rc : Valeur de résistance en compression du béton mesurée selon la norme d'essai NF EN 12390-3. **CE** : Résistance "vraie" à 28 jours du ciment utilisé en étude. Résistance moyenne mesurée à 28 jours sur mortier normalisé fabriqué et conservé selon la norme NF EN 196-1. **Dans le cas de mélange de ciments, le CE devra être mesuré pour chaque ciment.**

* Mesures avec 3 corps d'épreuve prélevés dans 3 éprouvettes différentes pour chaque gâchée.

** Cas particulier de la grandeur de durabilité en XA : 3 corps d'épreuves prélevés dans 3 éprouvettes différentes d'une seule gâchée du béton visé. Le béton de référence est également testé (voir § 4.3.5 du FD P 18 480).

La consistance du béton frais, la résistance mécanique et la durabilité du béton candidat sont vérifiées en épreuve d'étude de laboratoire pour la formule nominale. La ou les grandeurs de durabilité sont vérifiées avec des corps d'épreuve issus de trois gâchées (une seule dans le cas de la classe XA) ; (cf. exemples de ce document en § 10).

Pour les niveaux d'application N2 et N3, et pour les classes d'exposition XC, XS et XD, l'étude de formules nominale s'accompagne de l'étude de formules dérivées, ceci pour vérifier la robustesse de la formule du béton.

Les formules dérivées pour l'étude en laboratoire peuvent être :

- **Dérivées en eau de la formule** : - 10 Litres d'eau / m³ et +10 Litres d'eau /m³. (Elles sont obligatoires en niveau N2 et N3) ;

Remarque : La variation en eau peut être plus faible que 10 l/m³ si nécessaire, notamment pour les formules connues comme plus sensibles (bétons autoplaçants (BAP) ou bétons à hautes performances (BHP)). La variation peut être alors de +/- 5 litres/m³ par exemple, et devra être respectée en production.

- **Dérivées du rapport entre le poids de sable et le poids total sable + gravillons S/(S+G)** : - 10% et +10% (Elles sont optionnelles en niveau N2 et N3) ;
- **Dérivées de la quantité de liant total** : - 20 kg/m³ et +20 kg/m³. (Elles sont optionnelles en niveau N2 et N3) ;

7.1.2. Critères d'acceptation en épreuve d'étude

Les critères d'acceptation du béton portent sur la consistance du béton frais, la résistance mécanique à 28 jours, et la (ou les) grandeur(s) de durabilité mesurée(s) après 90 jours de cure humide de la formule nominale et, dans le cas des niveaux d'application N2 et N3 et pour les classes d'exposition XC, XS et XD, des formules dérivées.

- **Dérivées du dosage en adjuvant** : (Elles sont optionnelles en niveau N2 et N3).

L'étude des formules dérivées consiste à vérifier la résistance mécanique en compression à 28 jours, la consistance du béton frais sur la durée prévue d'utilisation et, dans le cas des classes d'exposition XC, XS ou XD, à vérifier la ou les grandeurs de durabilité. Les corps d'épreuve sont issus d'une gâchée de chaque formule dérivée, au lieu de trois dans le cas de l'étude de la formule nominale.

Remarques :

- *La vérification de la grandeur de durabilité pour les classes XA n'est pas requise pour les formules dérivées.*
- *Les formules dérivées ne sont pas ajustées au m³ de béton. Par exemple, dans le cas des dérivées en eau, il s'agit de gâchées pour lesquelles 10 litres d'eau par m³ de béton ont été soustraits pour la dérivée -10 l/m³ et 10 litres d'eau par m³ de béton ont été ajoutés pour la dérivée +10 l/m³.*
- *En niveau d'application N1, l'étude de formules dérivées n'est pas obligatoire, mais peut être prévue de façon à pouvoir autoriser des modifications de composition dans la limite des gâchées dérivées validées en cours de production (notamment dérivées en adjuvant pour l'adaptation saisonnière si chantier de longue durée).*
- **Les tolérances de fabrication du béton doivent être incluses dans l'intervalle des dérivées testées.**



7.1.2.1 Critères d'acceptation de la formule nominale (N1, N2, N3)

Pour les niveaux d'application N1, N2 et N3, les critères d'acceptation de la formule nominale concernent la consistance du béton frais, la résistance mécanique à 28 jours, et la (ou les) grandeur(s) de durabilité. Ils sont récapitulés dans le tableau ci-après.

Tableau 8

Critères d'acceptation de la formule nominale en étude.

ESSAIS		NORME D'ESSAI	N° DE GÂCHÉES			CRITÈRE D'ACCEPTATION (N1, N2, N3)
			1	2	3	
BÉTON FRAIS	Consistance initiale du béton frais	NF EN 12350-2, -4 ou -5 selon spécification du marché	X	X	X	Valeurs mesurées conformes aux exigences du marché.
	% Air (si spécifié)	NF EN 12350-2	X	X	X	
	Si béton autoplaçant (BAP) : - Stabilité au tamis - Essai à la boîte en L	NF EN 12350-11 NF EN 12350-10	X	X	X	
	Maintien de la consistance pendant la durée prévue d'utilisation du béton frais	NF EN 12350-2, -4 ou -5 selon spécification du marché	X			
BÉTON DURCI (*)	f_c (2 jours)	NF EN 12390-3	X			Pour information sur la montée en résistance du béton.
	f_{CE} (28 jours)	NF EN 12390-3	X	X	X	2 conditions à remplir (****) : $f_{CE} \geq f_{ck} + \lambda(C_E - C_{min})$ **** $f_{CE} \geq f_{ck} + 2 \cdot S$
	Grandeur(s) de durabilité	Selon classe(s) d'exposition visée(s)	X	X	X	Pour XC, XS, et XD : Valeur moyenne \leq Seuil de performance – 1,5 x écart-type prévisionnel (**)
			X			Pour XA : Valeur \leq Valeur obtenue avec béton de référence (***)
Indicateurs généraux : - Porosité accessible à l'eau $P_{eau, 28j}$ - Résistivité électrique ρ_{28j}	NF P 18-458 XP P 18-481	X	X	X	Pas de critère d'acceptation en étude. Les valeurs servent de référence pour l'acceptation en convenance et contrôle de production.	

* Échantillons conservés en cure humide normalisée (NF EN 12390 -2).

** L'écart-type prévisionnel annoncé est fonction de l'expérience du producteur de sa formule et de l'essai considéré. Dans tous les cas, le coefficient de variation correspondant à l'écart-type prévisionnel doit être supérieur ou égal aux valeurs du tableau 13 du fascicule FDP 18-480 (cf. complément ci-après).

*** Le béton de référence doit répondre à des critères spécifiques donnés en section 6.5 du FDP 18-480 (cf. § 7.2.3).

**** Dans le cas de mélange de ciment, la valeur de $(C_E - C_{min})$ à prendre en compte correspond à la valeur la plus élevée de celle obtenue pour chacun des ciments (cf. fascicule 65 2026).

***** Légende ci-après.

(*****) Légende :

f_{CE} (MPa) : moyenne arithmétique des mesures de résistance mécanique en compression suivant la norme NF EN 12390-3, et effectuées sur trois éprouvettes à 28 jours.

Important : les valeurs de résistance mécanique mesurées sur des échantillons autres que des cylindres 150/300 mm, 160/320 mm ou des cubes de 150 mm sont transposées suivant les règles du NA.5.5.1.1 de la norme NF EN 206+A2/CN en fonction des dimensions des éprouvettes pour obtenir les valeurs effectives de $f_{c,cyl}$ ou $f_{c,cube}$.

f_{ck} (MPa) : résistance caractéristique spécifiée par le marché.

En l'absence de spécification du marché, la résistance caractéristique à considérer est la valeur minimale correspondant à la ou les classes d'exposition visées (prendre en compte la valeur la plus contraignante si plusieurs classes d'exposition visées).

CE (MPa) : Résistance moyenne mesurée à 28 jours sur mortier normalisé fabriqué et conservé selon la norme NF EN 196-1 avec le lot de ciment utilisé pour l'étude.

f_{min} (MPa) : valeur minimale de la résistance à la compression à 28 jours pouvant être respectée sur mortier normalisé pour le ciment choisi, observée pendant une durée significative au cours de l'autocontrôle du fournisseur. Par défaut, la valeur considérée est la résistance minimale garantie selon la classe mécanique du ciment.

Lambda : coefficient pris égal à 1 sauf justification probante.

S : écart-type prévisionnel pour la résistance mécanique en compression à 28 jours (au minimum égal à 3 MPa).

Compléments au tableau 8

• Critères sur l'écart-type prévisionnel de la grandeur de durabilité considérée (XC, XS, XD) :

Pour les classes XC, XS et XD, chaque grandeur de durabilité considérée doit être inférieure ou égale à une valeur seuil affectée d'une marge de sécurité égale à 1,5 fois l'écart-type prévisionnel. La valeur de

l'écart-type prévisionnel annoncé par le producteur est fonction de son expérience du béton et de l'essai.

Dans tous les cas, le coefficient de variation correspondant doit être supérieur ou égal aux valeurs spécifiées dans le tableau 13 du fascicule FD P 18-480 et rappelées ci-après :

Tableau 9

Coefficient de variation (Tableau 13 du FD P 18-480)

GRANDEUR DE DURABILITÉ	POROSITÉ ACCESSIBLE À L'EAU (P_{EAU})	COEFFICIENT DE MIGRATION DES IONS DE TYPE CHLORURE (D_{RCM})	VITESSE DE CARBONATATION ACCÉLÉRÉE (V_{ACC})
NORME D'ESSAI	NF P 18-459:2022	XP P 18-462:2022	XP P 18-458:2022
COEFFICIENT DE VARIATION MINIMAL ADMISSIBLE (CV)	3 %	20 %	20 %

Pour rappel, en théorie des probabilités et statistiques, le coefficient de variation permet de mesurer la dispersion relative de données. Il est calculé comme le ratio entre l'écart-type et la valeur moyenne des grandeurs mesurées. Dans notre cas, le coefficient de variation correspondant à l'écart-type prévisionnel annoncé par le producteur est donc calculé ainsi :

$$\text{Coefficient de variation (CV)} = \frac{\text{écart-type prévisionnel}}{\text{valeur moyenne}}$$

L'application de cette règle est illustrée dans les exemples de ce guide (Voir § 10).



7.1.2.2. Critères d'acceptation des formules dérivées (niveaux d'application N2, N3)

Pour les niveaux d'application N2 et N3, la robustesse de la formule du béton à qualifier doit être vérifiée avec l'étude de formules dérivées, avec obligatoirement l'étude de dérivées en eau, et de façon optionnelle les dérivées pour la teneur en sable, en liant, en adjuvant.

Les critères d'acceptation des formules dérivées portent sur la consistance du béton frais, la résistance à la compression à 28 jours, et la ou les grandeurs de durabilité de la classe d'exposition visée (cf. tableau récapitulatif ci-après).

Tableau 10

Critères d'acceptation des formules dérivées.

ESSAIS		NORME D'ESSAI	GÂCHÉE	CRITÈRE D'ACCEPTATION (N2, N3)
BÉTON FRAIS	Consistance du béton frais	NF EN 12350-2, -4 ou -5	X	Valeurs mesurées conformes aux exigences du marché (classe et norme d'essai)
	% Air (si spécifié)	NF EN 12350-2	X	
	Si béton autoplaçant (BAP) : - Stabilité au tamis - Essai à la boîte en L	NF EN 12350-11 NF EN 12350-10	X	
	Maintien de la consistance pendant la durée prévue d'utilisation du béton frais	NF EN 12350-2, -4 ou -5	X	
BÉTON DURCI (*)	$f_{c, dérivée}$ (28 jours)	NF EN 12390-3	X	$0,85 \cdot f_{CE} \leq f_{c, dérivée} \leq 1,15 \cdot f_{CE}^{**}$
	Grandeur(s) de durabilité	Selon classe(s) d'exposition visée(s)	X	Pour XC, XS, et XD (***) : Valeur moyenne \leq Seuil de performance

* Échantillons conservés en cure humide normalisée (NF EN 12390 -2)

** Légende :

f_{CE} (MPa) : moyenne arithmétique des mesures de résistance en compression suivant la norme NF EN 12390-3, et effectuées sur ces trois éprouvettes à 28 jours avec la formule nominale.

$f_{c, dérivée}$ (MPa) : moyenne arithmétique des mesures de résistance en compression suivant la norme NF EN 12390-3, et effectuées sur ces trois éprouvettes à 28 jours.

Important : les valeurs de résistance mécanique mesurées sur des échantillons autres que des cylindres 150/300 mm, 160/320 mm ou des cubes de 150 mm sont transposées suivant les règles du NA.5.5.1.1 de la norme NF EN 206+A2/CN en fonction des dimensions des éprouvettes pour obtenir les valeurs effectives de $f_{c, cyl}$ ou $f_{c, cube}$.

**** Les valeurs des grandeurs de durabilité mesurées doivent être en cohérence avec les variations de composition étudiées.*

Typiquement, les valeurs mesurées pour la dérivée en eau $-10l/m^3$ (respectivement $+10l/m^3$) sont attendues comme inférieures ou égales (respectivement supérieures ou égales) à celles obtenues pour la formule nominale.

En niveau N1, si des formules dérivées ont été étudiées (option pour rappel), on se référera aux critères d'acceptation des formules dérivées détaillées en niveau N2 et N3. Les critères d'acceptation obligatoires portent seulement sur la formule nominale.

7.1.2.3. Critères sur le béton de référence pour les classes XA

Pour les classes XA, hormis le cas spécifique de la classe d'exposition XA3 en milieu riche en sulfates, la grandeur de durabilité considérée est comparée à celle obtenue pour un béton de référence conforme aux exigences données dans la section 6.5 du FD P 18-480 et reprises ci-après :

- **Le béton de référence doit être conforme aux exigences de composition**, classe mécanique minimale et nature de liant, de la norme béton NF EN 206+A2/CN (annexe NA.F) pour une durée d'utilisation du projet (DUP) de 50 ans ou bien du fascicule 65 du CCTG pour une DUP de 100 ans,

ET

- **Le béton de référence doit répondre aux exigences additionnelles suivantes :**

- Même consistance à l'état frais que le béton à qualifier,
- Mêmes granulats que ceux du béton à qualifier (sauf si la dérogation pour laquelle l'approche performantielle est mise en œuvre porte sur la nature des granulats),
- Même volume de pâte que celui du béton à qualifier si milieu acide ou eaux pures, ou bien un milieu propice à la biodétérioration avec attaque par H₂S (acide sulfurique),
- Être composé d'un type de ciment précis et respecter un rapport maximal Eau efficace / Liant équivalent (E_{eff} / L_{eq}) comme indiqué dans le tableau 11 ci-dessous :

Tableau 11

Ciment pour le béton de référence.

	XA1	XA2	XA3
MILIEU CONTENANT DES SULFATES	CEM I PM $E_{eff} / L_{eq} \leq 0,50$	CEM I SR3 $E_{eff} / L_{eq} \leq 0,45$	CEM I SR3* $E_{eff} / L_{eq} \leq 0,40$
MILIEU ACIDE ET EAUX PURES	CEM II/B-S ou CEM III/A $E_{eff} / L_{eq} \leq 0,50$	CEM II/B-S OU CEM III/A $E_{eff} / L_{eq} \leq 0,45$	CEM V/A ES $E_{eff} / L_{eq} \leq 0,40$
MILIEU PROPICE À LA BIODÉTÉRIORATION (H ₂ S)	CEM I $E_{eff} / L_{eq} \leq 0,50$	CEM III/B SR $E_{eff} / L_{eq} \leq 0,45$	CAC (ciment alumineux) $E_{eff} / L_{eq} \leq 0,40$

* Non applicable sauf dans le cas spécifique où la nature du liant respecte les prescriptions du FD P 18-011, dans les autres cas, l'essai est un essai absolu et non comparatif.



7.2. Épreuves de convenance

Les épreuves de convenance sont traitées au § 7.3 et dans le tableau 12 du FDP 18-480.

7.2.1. Essais

Les épreuves de convenance doivent être réalisées sur toutes les unités de production prévues pour le marché.

Tableau 12

Détails de l'épreuve de convenance en fonction du niveau d'application

NIVEAU	N1	N2	N3
ESSAIS EN ÉPREUVE DE CONVENANCE	Sur nominale : <ul style="list-style-type: none"> • Dans le cas de références probantes : 1 gâchée répondant à la formule nominale ; • Sans références probantes : au minimum 3 gâchées répondant à la formule nominale, mélangées dans camion malaxeur ; • Indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité) ; • Consistance et résistance mécanique. 		
			+ ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90j)
INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DE CONVENANCE	Conformité de la consistance du béton et de la résistance mécanique. Conformité des indicateurs généraux aux limites associées aux résultats d'étude		
			Conformité des grandeurs associées à la durabilité (90j), aux seuils de performance.

Note : Le passage de l'épreuve d'étude à l'épreuve de convenance peut nécessiter un ajustement du dosage en adjuvant pour tenir compte de l'effet d'échelle (taille et efficacité du malaxeur)



7.2.2. Critères d'acceptation

Tableau 13

Critères d'acceptation des essais d'une éprouvette de convenance en fonction du niveau d'application

ESSAIS		NORME D'ESSAI	N° DE GÂCHÉES			CRITÈRE D'ACCEPTATION (N1, N2, N3)
			1	2	3	
BÉTON FRAIS	Consistance initiale du béton frais	NF EN 12350-2, -4 ou -5		X		Valeurs mesurées conformes aux exigences du marché.
	% Air (si spécifié)	NF EN 12350-2		X		
	Si béton autoplaçant (BAP) : - Stabilité au tamis - Essai à la boîte en L	NF EN 12350-11 NF EN 12350-10		X		
	Maintien de la consistance pendant la durée prévue d'utilisation du béton frais	NF EN 12350-2, -4 ou -5		X		
BÉTON DURCI (*)	f_{CE} (28 jours)	NF EN 12390-3		X		2 conditions à remplir (****) : $f_{CE} \geq f_{ck} + \lambda * (CE - C_{min})$ $f_{CE} \geq f_{ck} + 2 * S$
	Indicateurs généraux : - Porosité accessible à l'eau $P_{eau, 28j}$ - Résistivité électrique ρ_{28j}	NF P 18-458 XP P 18-481		X		$\%P_{eau, 28j}$ (Convenance) $\leq 1,1 * \%P_{eau, 28j}$ (étude) ρ_{28j} (convenance) $\geq 0,8 * \rho_{28j}$ (étude)
	Grandeur(s) de durabilité (en niveau N3 seulement)	Selon classe(s) d'exposition visée(s)		X		Si N3 : Pour XC, XS, et XD : Valeur moyenne \leq Seuil de performance. Complément : Si N3 et XC3 ou XC4 avec $P_{eau, 90j}$ comme grandeur de durabilité : $V_{acc 90j (ou 28j)} \leq (0,08 * \%P_{eau, 90j (ou 28j)} / fV_p) - 2,2$

* Échantillons conservés en cure humide normalisée (NF EN 12390-2).

*** Le béton de référence doit répondre à des critères spécifiques donnés en section 6.5 du FDP 18-480 (cf. Complément ci-après).

**** Légende :

f_{CE} (MPa) : moyenne arithmétique des mesures de résistance mécanique en compression suivant la norme NF EN 12390-3, et effectuées sur ces trois éprouvettes à 28 jours. Important : les valeurs de résistance mécanique mesurées sur des échantillons autres que des cylindres 150/300 mm, 160/320 mm ou des cubes de 150 mm sont transposées suivant les règles du NA.5.5.1.1 de la norme NF EN 206+A2/CN en fonction des dimensions des éprouvettes pour obtenir les valeurs effectives de $f_{c,cyl}$ ou $f_{c,cube}$.

f_{ck} (MPa) : résistance caractéristique spécifiée par le marché. En l'absence de spécification du marché, la résistance caractéristique à considérer est la valeur minimale correspondant à la ou les classes d'exposition visées (prendre en compte la valeur la plus contraignante si plusieurs classes visées).

C_E (MPa) : Résistance moyenne mesurée à 28 jours sur mortier normalisé fabriqué et conservé selon la norme NF EN 196-1 avec le lot de ciment utilisé pour l'étude.

C_{min} (MPa) : valeur minimale de la résistance à la compression à 28 jours pouvant être respectée sur mortier normalisé pour le ciment choisi, observée pendant une durée significative au cours de l'autocontrôle du fournisseur. Par défaut, la valeur considérée est la résistance minimale garantie selon la classe mécanique du ciment.

Lambda : coefficient pris égal à 1 sauf justification probante.

S : écart-type prévisionnel pour la résistance mécanique en compression à 28 jours (au minimum égal à 3 MPa).

Tableau 14

Modalités d'application des épreuves d'études, de convenance et de contrôle du béton
(cf. tableau 13 du FD P 18-480)

	NIVEAU	N1	N2	N3
ÉTUDE	Essais de durabilité en épreuve d'étude (paragraphe 4.4.2)	Sur nominale : Indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité) + ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90 j)	Sur nominale : Indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité) + ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90 j)	Sur nominale : Indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité) + ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90 j)
			Sur dérivées (pour les classes XC1 à XC4, XS1 à XS3 et XD1 à XD3) : ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90 j)	Sur dérivées (pour les classes XC1 à XC4, XS1 à XS3 et XD1 à XD3) : ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90 j)
	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 XC1 à XC4, XS1 à XS3 et XD1 à XD3)	Sur nominale : Conformité des grandeurs associées à la durabilité aux seuils (avec marge de sécurité imposée pour l'approche absolue et les classes XC1 à XC4, XS1 à XS3 et XD1 à XD3)
			Sur dérivées (pour les classes XC1 à XC4, XS1 à XS3 et XD1 à XD3) : Conformité des grandeurs associées à la durabilité aux seuils et cohérence avec les variations de composition testées	Sur dérivées (pour les classes XC1 à XC4, XS1 à XS3 et XD1 à XD3) : Conformité des grandeurs associées à la durabilité aux seuils et cohérence avec les variations de composition testées
CONVENANCE	Essais de durabilité en épreuve de convenance (paragraphe 4.4.3)	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 (90 j)
	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 (90 j), conformité aux seuils
CONTRÔLE	Essais de durabilité en épreuve de contrôle (paragraphe 4.4.4)	Non Applicable	Indicateurs généraux à 28 jours + ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90 j)	Indicateurs généraux à 28 jours + ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90 j)
	Fréquence des résultats de contrôle	Non Applicable	Indicateurs généraux : tous les 500 m ³ ou tous les mois (période initiale : 3 mois) puis tous les 1 000 m ³ ou tous les 2 mois Grandeurs associées à la durabilité : tous les 2 ans pour l'ensemble des classes d'exposition	Indicateurs généraux : tous les 500 m ³ ou tous les mois (période initiale : 3 mois) puis tous les 1 000 m ³ ou tous les 2 mois Grandeurs associées à la durabilité : - tous les trimestres pour les classes XC1 à XC4, XF1 à XF4, XS1 à XS3 et XD1 à XD3 - tous les ans pour les classes XA1 à XA3

8

**Épreuves
d'étude et de
convenance
dans le cas
du domaine
de composition**

8.1. Exigences pour les bétons destinés à être mise en œuvre (domaine des bétons validés par l'EG)

Ci-dessous une liste d'exigences qui doivent être respectées pour formuler un béton destiné à être mis en œuvre (aussi appelé « béton d'Etude ») :

• **La composition du liant total du béton d'Etude doit être comprise dans l'ensemble des liants totaux du Domaine de Composition des bétons défini et validé par l'étude générique (EG).**

L'utilisateur doit donc vérifier que la formulation fait bien partie du domaine couvert par l'EG (voir exemple au chapitre 10 du présent document). Les vérifications sont les suivantes :

• **La quantité d'additions calcaires ou siliceuses comptées en correcteurs granulaires dans le béton d'Etude doit être supérieure ou égale à celle des Bétons d'EG (le cas échéant).**

• **Les constituants doivent respecter les exigences fondamentales relatives aux constituants décrits dans la norme NF EN 206+A2/CN (§ 5.1.2 à 5.1.6).**

• **La méthode performantielle n'est pas applicable aux formulations contenant des constituants bénéficiant d'un ETE.**

• **Le ciment et les additions utilisées dans le béton d'Etude doivent être les mêmes que ceux utilisés dans l'Étude Générique (mêmes produits).**

Note : on entend par même produit, un matériau provenant d'un même producteur, d'une même provenance et répondant à la même appellation normalisée. La similitude est démontrée par la fourniture par le producteur d'une fiche technique actualisée.

• **Les granulats (sable(s) et gravillon(s)) du béton d'Etude doivent présenter un coefficient d'absorption d'eau inférieure ou égale à celui du granulats (sable(s) et gravillon(s)) utilisé dans l'EG, majoré de 0,5 point de pourcent (correspond à l'incertitude de la méthode d'essai).**

À titre d'exemple, si les granulats utilisés dans l'EG présentent une absorption d'eau de 1,5 %, les granulats retenus pour les bétons à produire devront présenter sur les fiches techniques une valeur maximale d'absorption de 1,5 % afin que les valeurs

d'absorption restent inférieures ou égales à 2,0 % lors de l'autocontrôle.

• **Il est possible d'utiliser des sables recyclés et des gravillons recyclés de type 1 si leur utilisation a été intégrée à l'EG. Le taux de substitution en granulats recyclés doit être inférieur ou égal à celui testé dans à l'EG.**

• **Il est possible d'utiliser un adjuvant entraîneur d'air ou un hydrofuge de masse si ces produits étaient prévus dès l'EG.**

• **Le type et le dosage en adjuvants peuvent être modifiés dans le béton d'Etude sauf dans le cas des hydrofuges de masse.**

• **S'ils n'ont pas été intégrés dans les Bétons d'EG, les seuls ajouts autorisés (au sens de la NF EN 206/CN) sont les fibres et les agents de viscosité. En cas d'incorporation de fibres, la teneur en air occlus sur béton frais devra être vérifiée.**

• **La quantité de liant total (ciment(s) + addition(s)) du béton de l'étude doit être supérieure ou égale à celui des bétons de l'EG.**

• **Le rapport (E_{eff}/L_{tot}) des bétons de l'Etude doit être inférieur ou égal à celui des bétons de l'EG (E_{eff}/L_{tot} EG), abaissé d'une marge de 0,02 dans le cas des ouvrages relevant de la catégorie 3.**

• **Il est primordial de respecter la classe de résistance définie par le Bureau d'Études Structures en conformité avec la norme NF EN 1992-1-1 et son annexe nationale la norme NF EN 1992-1-1/NA. Le béton d'Etude doit présenter une classe de résistance supérieure ou égale à celle du Domaine de Composition couvert par l'EG.**

• **La consistance du béton d'Etude doit être supérieure ou égale à celle des bétons de l'EG (Tableau 17 du FD P 18-480).**

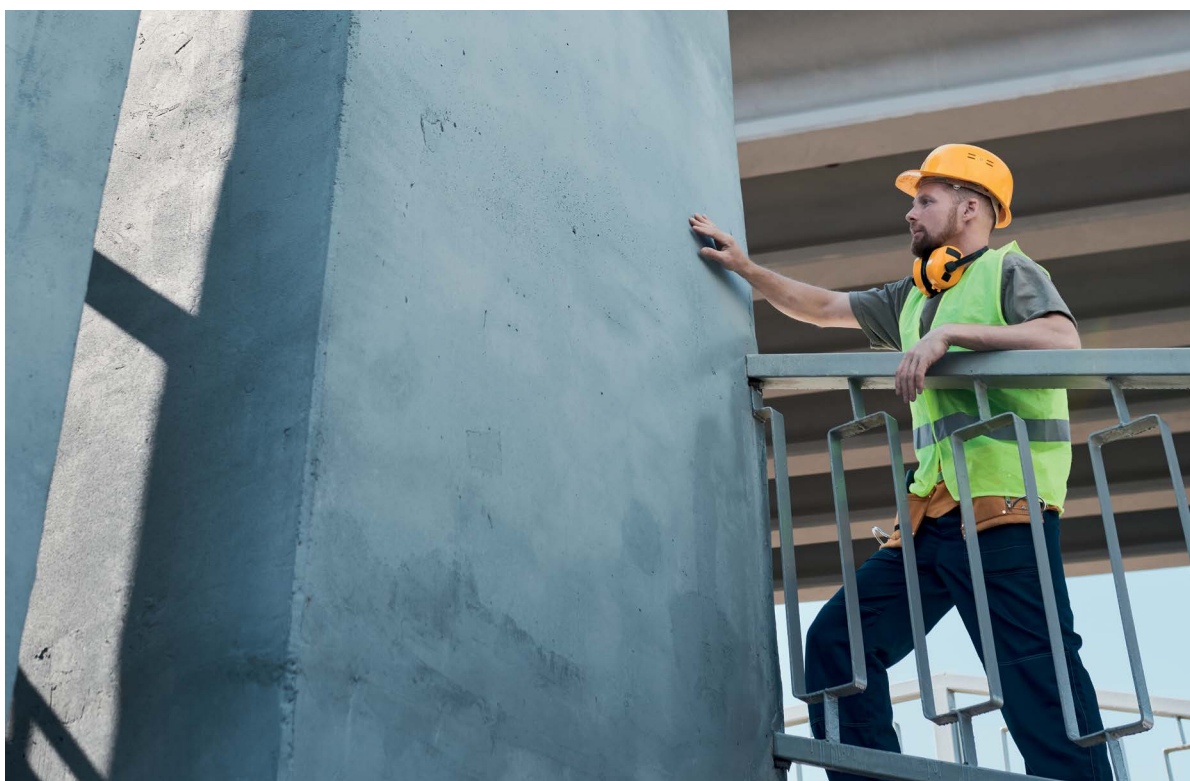
• **Si une plage de teneur en air occlus est spécifiée par le prescripteur du chantier alors elle doit être comprise dans celle couverte lors de l'EG.**

Tableau 15Essais performantiels
pour l'épreuve d'étude

		CATÉGORIE DE L'OUVRAGE		
		1	2	3
GÂCHÉES POUR L'ÉPREUVE D'ÉTUDE NOMBRE MINIMAL DE GÂCHÉES NOMINALES		1 gâchée nominale	1 gâchée nominale 2 dérivées eu eau *	3 gâchées nominales 2 dérivées eu eau *
CARACTÉRISTIQUES MESURÉES	BÉTON FRAIS	Propriétés du béton frais, y compris teneur en air le cas échéant	Propriétés du béton frais, y compris teneur en air le cas échéant	Propriétés du béton frais, y compris teneur en air le cas échéant
	BÉTON DURCI (DONT INDICATEURS GÉNÉRAUX)	Résistance à la compression à 28 jours selon NF EN 12390-3	Résistance à la compression à 28 jours selon NF EN 12390-3	Résistance à la compression à 28 jours selon NF EN 12390-3
		Autres mesures prévues au marché **	Autres mesures prévues au marché **	Autres mesures prévues au marché **
		Porosité à 28 jours selon NF P 18-459 ou absorption d'eau selon NF EN 13369	Porosité à 28 jours selon NF P 18-459 ou absorption d'eau selon NF EN 13369	Porosité à 28 jours selon NF P 18-459 ou absorption d'eau selon NF EN 13369
		Résistivité électrique selon XP P18-481	Résistivité électrique selon XP P18-481	Résistivité électrique selon XP P18-481

* Les dérivées en eau consistent en la modification de la quantité d'eau de gâchage, respectivement de $\pm 10/m^3$ (ramené à $\pm 5/m^3$ pour les BAP et BHP).

** Se reporter aux exigences de la norme NF EN 206/CN relatives à la spécification des bétons à propriétés spécifiées.



8.2. Épreuve d'étude

L'épreuve d'étude doit être réalisée sur un béton couvert par l'EG tel que détaillé dans la section précédente. Il est nécessaire de vérifier que l'EG a été faite moins de 2 ans avant la réalisation de l'épreuve d'étude.

Il est demandé au producteur de béton de préciser les valeurs $f_{c(2j)}$ et $f_{c(28j)}$ du béton à 20 °C pour informer de la montée en résistance.

Les résultats de l'épreuve d'étude sont probants si les conditions suivantes sont remplies :

a) Pour chaque gâchée, la consistance mesurée (ainsi que les valeurs de stabilité au tamis et l'écoulement à la boîte en L pour les BAP) et, le cas échéant, la teneur en air occlus, se trouvent dans les fourchettes requises ;

b) Pour chaque formule nominale :

CAS 1 - BÉTON PRÊT À L'EMPLOI

• le résultat f_{CE} de l'essai de compression (moyenne des mesures sur les trois éprouvettes) satisfait les deux conditions suivantes :

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

condition 2 : $f_{CE} \geq f_{ck} + 2s$

où

f_{CE} est la moyenne arithmétique des mesures effectuées sur ces trois éprouvettes, les essais étant réalisés suivant la norme NF EN 12390-3 en excluant de la moyenne les essais avec rupture incorrecte, et en transposant les résistances suivant les règles de la norme NF EN 206/CN en fonction des dimensions des éprouvettes ;

f_{ck} est la résistance caractéristique spécifiée ;

λ est un coefficient pris égal à 1 sauf justification probante ;

CE est la résistance à la compression à 28 jours du ciment utilisé pour l'exécution de l'épreuve ;

C_{min} est 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 ;

S est l'écart-type prévisionnel de la distribution des résistances (au minimum égal à 3 MPa).

• la porosité accessible à l'eau (P_{eau}) n'excède pas de plus de 10% la valeur maximale

mesurée sur les bétons d'Étude Générique :

$$P_{eau(étude)28j} \leq 1,1 * P_{eau,max(EG)28j}$$

• et la résistivité électrique (r) n'est pas inférieure de plus de 20 % à la valeur minimale mesurée sur les bétons d'Étude Générique : $\rho_{(étude)28j} > 0,8 * \rho_{min(EG)28j}$

CAS 2 - BÉTON POUR LA PRÉFABRICATION

Dans le cas des produits en béton préfabriqués en usine pour lesquels l'absorption d'eau est utilisée en alternative, l'absorption d'eau (A_{beau}) n'excède pas de plus de 10 % la valeur maximale mesurée sur les bétons d'Étude Générique :

$$A_{beau(étude)28j} \leq 1,1 * A_{beau,max(EG)28j}$$

• et la résistivité électrique n'est pas inférieure de plus de 20 % à la valeur minimale mesurée sur les bétons d'Étude Générique : $\rho_{(étude)28j} > 0,8 * \rho_{min(EG)28j}$

c) Pour chaque formule dérivée :

• les résultats des essais de résistance à la compression à 28 jours sont compris dans la fourchette $f_{CE} \pm 0,15 f_{CE}$;

• les résultats sur les indicateurs généraux doivent être positionnés dans un ordre cohérent par rapport à l'impact attendu des dérivées sur les valeurs des indicateurs généraux.

Si l'application concerne des pièces critiques au sens du guide IFSTTAR de 2017 « Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne du béton », les valeurs du Q41 et du Q120 obtenues sur un liant total dont la composition correspond au centre de l'ensemble des liants totaux du domaine de formulations testé doivent être mesurées et déclarées.

Le producteur doit établir, en complément du rapport d'étude, **une fiche de synthèse du dossier technique incluant :**

- **Appellation normalisée du béton performantiel ;**
- **Durée d'utilisation de projet ;**
- **Indicateurs de durabilité généraux retenus ;**
- **Fiche de synthèse de l'étude générique ;**
- **Laboratoire en charge des essais de durabilité.**

Cette fiche doit être communiquée au Maître d'œuvre sur simple demande de sa part.

8.3. Épreuve de convenance

Il est nécessaire d'effectuer une épreuve de convenance pour les bétons performantiels destinés aux trois catégories d'ouvrages. Elle est réalisée sur une ou plusieurs gâchées nominales comme précisé dans le tableau ci-dessous :

Il est important de vérifier que l'Étude Générique a été faite moins de 2 ans avant la réalisation de l'épreuve de convenance.

Tableau 16

Détails de l'épreuve de convenance en fonction de la catégorie de l'ouvrage

		CATÉGORIE DE L'OUVRAGE		
		1	2	3
GÂCHÉES POUR L'ÉPREUVE DE CONVENANCE NOMBRE MINIMAL DE GÂCHÉES NOMINALES		1 gâchée nominale	1 gâchée nominale	3 gâchées nominales
CARACTÉRISTIQUES MESURÉES	BÉTON FRAIS	Propriétés du béton frais, y compris teneur en air le cas échéant	Propriétés du béton frais, y compris teneur en air le cas échéant	Propriétés du béton frais, y compris teneur en air le cas échéant
	BÉTON DURCI (DONT INDICATEURS GÉNÉRAUX)	Résistance à la compression à 28 jours selon NF EN 12390-3	Résistance à la compression à 28 jours selon NF EN 12390-3	Résistance à la compression à 28 jours selon NF EN 12390-3
		Autres mesures prévues au marché *	Autres mesures prévues au marché *	Autres mesures prévues au marché *
		Porosité à 28 jours selon NF P 18-459 ou absorption d'eau selon NF EN 13369	Porosité à 28 jours selon NF P 18-459 ou absorption d'eau selon NF EN 13369	Porosité à 28 jours selon NF P 18-459 ou absorption d'eau selon NF EN 13369
		Résistivité électrique selon XP P18-481	Résistivité électrique selon XP P18-481	Résistivité électrique selon XP P18-481

*Se reporter aux exigences de la norme NF EN 206/CN relatives à la spécification des bétons à propriétés spécifiées.



Les résultats sont probants si les conditions suivantes sont remplies :

- la consistance mesurée (ainsi que les valeurs de stabilité au tamis et l'écoulement à la boîte en L pour les BAP) et, le cas échéant, la teneur en air occlus, se trouvent dans les fourchettes requises ;

- le résultat f_{CE} de l'essai de compression (moyenne des mesures sur les trois éprouvettes) satisfait les deux conditions suivantes :

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

condition 2 : $f_{CE} \geq f_{ck} + 2s$

où

f_{CE} est la moyenne arithmétique des mesures effectuées sur ces trois éprouvettes, les essais étant réalisés suivant la norme NF EN 12390-3 en excluant de la moyenne les essais avec rupture incorrecte, et en transposant les résistances suivant les règles de la norme NF EN 206/CN en fonction des dimensions des éprouvettes ;

f_{ck} est la résistance caractéristique spécifiée ;

λ est un coefficient pris égal à 1 sauf justification probante ;

C_E est la résistance à la compression à 28 jours du ciment utilisé pour l'exécution de l'épreuve ;

C_{min} est 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 ;

s est l'écart-type prévisionnel de la distribution des résistances (au minimum égal à 3 MPa).

- la porosité accessible à l'eau (P_{eau}) n'excède pas de plus de 10% la valeur maximale mesurée sur les bétons d'Étude Générique :

$P_{eau(convenance)28j} \leq 1,1 * P_{eau, max(EG)28j}$

- et la résistivité électrique (ρ) n'est pas inférieure de plus de 20 % à la valeur minimale mesurée sur les bétons d'Étude Générique :

$\rho_{(convenance)28j} > 0,8 * \rho_{min(EG)28j}$

ou

- dans le cas des produits en béton préfabriqués en usine pour lesquels l'absorption d'eau est utilisée en alternative, l'absorption d'eau (A_{beau}) n'excède pas de plus de 10 % la valeur maximale mesurée sur les bétons d'EG :

$A_{beau(convenance)28j} \leq 1,1 * A_{beau, max(EG)28j}$

- et la résistivité électrique n'est pas inférieure de plus de 20 % à la valeur minimale mesurée sur les bétons d'Étude Générique :

$\rho_{(convenance)28j} > 0,8 * \rho_{min(EG)28j}$

Il est possible d'effectuer un ajustement de la teneur en adjuvant pendant l'épreuve de convenance afin de prendre en compte la différence d'énergie de malaxage entre les conditions industrielles et les conditions de laboratoire. Cependant, il est demandé d'effectuer une vérification de la teneur en air occlus du béton frais et sa valeur ne doit pas être supérieure de plus de 2% à celle de l'épreuve d'étude. Sinon, il faut valider une mesure des grandeurs associées à la durabilité.

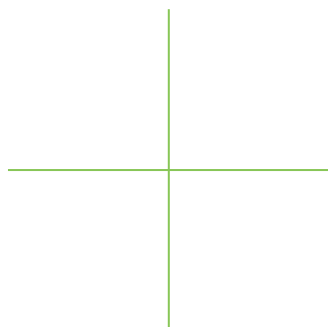
Dans le cas d'un ajustement saisonnier de l'adjuvantation, une épreuve de convenance complémentaire doit être effectuée suivant les principes définis ci-dessus.

Tableau 17

Contenu et modalités d'application des épreuves d'études, de convenance et de contrôle du béton du point de vue de la durabilité (tableau 18 du FD P 18-480).

	CATÉGORIE DE L'OUVRAGE	1	2	3
ÉTUDE	Essais de durabilité en épreuve d'étude (article 5.5.2)	Sur nominale : indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité électrique)	Sur nominale : indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité électrique)	Sur nominale : indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité électrique)
		Sur dérivées : non Applicable	Sur dérivées : indicateurs généraux à 28 jours	Sur dérivées : indicateurs généraux à 28 jours
	Interprétation des résultats d'étude	Sur nominale : Respect des inégalités de l'article 5.5.2	Sur nominale : Respect des inégalités de l'article 5.5.2	Pour chacune des gâchées nominales : respect des inégalités de l'article 5.5.2
		Sur dérivées : non Applicable	Sur dérivées : cohérence avec les variations testées ^a	Sur dérivées : cohérence avec les variations testées ^a
CONVENANCE	Essais de durabilité en épreuve de convenance (article 5.5.3)	Sur nominale : indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité électrique)	Sur nominale : indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité électrique)	Pour chacune des gâchées nominales : indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité électrique)
	Interprétation des résultats de convenance	Respect des inégalités de l'article 5.5.3	Respect des inégalités de l'article 5.5.3	Respect des inégalités de l'article 5.5.3
CONTRÔLE	Essais de durabilité en épreuve de contrôle (article 5.5.5)	Non Applicable	Indicateur général à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité électrique)	Indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité électrique)
	Fréquence des résultats de contrôle	Non Applicable	Indicateurs généraux : tous les 500 m ³ ou tous les mois (période initiale : 3 mois) puis tous les 1 000 m ³ ou tous les 2 mois	Indicateurs généraux : tous les 500 m ³ ou tous les mois (période initiale : 3 mois) puis tous les 1 000 m ³ ou tous les 2 mois
	Interprétation des résultats de contrôle	Non Applicable	Respect des inégalités de l'article 5.5.2	Respect des inégalités de l'article 5.5.2

^a Les valeurs mesurées sur les dérivées et la nominale doivent être positionnées dans un ordre cohérent par rapport à l'impact attendu des dérivées sur les valeurs des indicateurs généraux.



9

**Exigences en
termes de Système
Qualité du
Producteur
de béton,
de l'Entreprise
de construction,
et du laboratoire en
charge des essais**

9.1. Producteur de béton

Le producteur de béton doit démontrer la maîtrise de la qualité en respectant les points ci-après :

- Maîtrise des précisions de dosage de la norme NF EN 206+A2/CN complétées par des exigences spécifiques ;
- Teneurs en eau de chaque coupure granulaire mesurées au minimum une fois par semaine ;
- Suivi en continu de l'humidité des sables ;
- Consistance du béton (et teneur en air si besoin) contrôlée au moins une fois par jour de production.

Pour les chantiers de niveau N2 et N3, un contrôle externe est requis.

Dans le cadre de la méthode performantielle avec approche par domaine de composition, les cas pour lesquels il est nécessaire de mettre en place un contrôle externe pour la fabrication du béton, correspondent aux ouvrages de catégorie 2 à l'exception de la classe XC1 et aux ouvrages de catégorie 3.

Pour le producteur de béton prêt à l'emploi, le recours à la marque NF BPE ou équivalent pour son unité de production et le béton visé permet de répondre à l'exigence de contrôle externe. Il est à noter que les précisions de dosage exigées sont celles du fascicule 65 et sont plus exigeantes que celles du référentiel de la marque NF-BPE : cf. tableau 18 ci-dessous sur la précision de dosage des différents constituants.

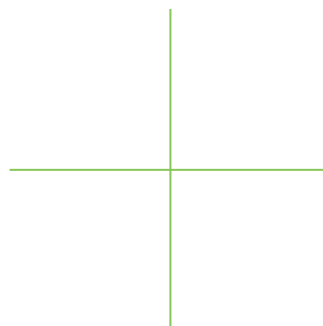
Tableau 18

Précision de dosage des différents constituants (Cf. Tableau 15 du FD P 18-480).

	POUR 100 % DES GÂCHÉES
CIMENT	$\pm 4 \%$
EAU PESÉE	$\pm \max (4 \%, 4 \text{ kg/m}^3)$
ADJUVANT	$\pm 5 \%$
ADDITION + CIMENT	$\pm 4 \%$
ENSEMBLE DES GRANULATS	$\pm 4 \%$
GRAVILLON	$\pm \max (4 \%, 30 \text{ kg/m}^3)$
SABLE	$\pm \max (4 \%, 30 \text{ kg/m}^3)$

Dans le cas de l'approche par domaine de composition, les quantités effectivement dosées de ciment(s) et d'addition(s) doivent toujours permettre de rester dans le domaine de composition défini.

En complément de ces exigences, la tolérance de dosage applicable aux additions pour 100 % des gâchées est de $\pm \max (5 \%, 6 \text{ kg/m}^3)$.

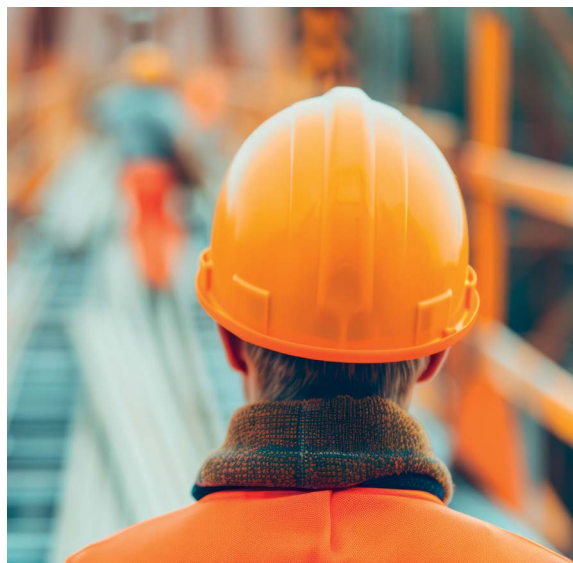


9.2. Entreprise de mise en œuvre

Un système qualité doit être mis en place par l'entreprise précisant notamment les modalités de mise en œuvre du béton et les modalités de prélèvement, de confection et de conservation des éprouvettes.

Dans le cadre de la méthode performantielle avec une approche par composition unique, pour les chantiers de niveau d'application N2 et N3, un contrôle externe est requis.

Comme pour le producteur de béton, dans le cas de la méthode par domaine de composition, le contrôle externe est requis pour les ouvrages de catégorie 2 à l'exception de la classe XC1 et pour les ouvrages de catégorie 3.



9.3. Laboratoire

Le laboratoire en charge des essais peut être : un laboratoire du producteur, de l'utilisateur ou un laboratoire extérieur.

Il devra :

- justifier de la mise en place d'un système de management de la qualité, de la qualification de son personnel et du suivi métrologique du matériel utilisé ;
- assurer la validité des résultats en comparant régulièrement sa performance à celle d'autres laboratoires par la participation à des campagnes inter laboratoires (CIL) sur les essais concernés (A date du document, ces essais sont pilotés par le CEBTP) ;
- fournir la justification de ses résultats lors de ces campagnes.

L'accréditation COFRAC Essais sur les essais concernés est réputée satisfaisante aux exigences énoncées ci-dessus.



10

Exemples de réalisation d'études



10.1. Approche à composition unique

Le tableau 18 ci-dessous récapitule les différents exemples illustrés dans cet article 10.1.

Tableau 19

Synthèse des exemples de l'article 10.1 de ce document.

N° EXEMPLE	1	2	3	4
BÉTON	C25/30 en XC1	C25/30 en XC4/XF1	C40/50 en XS3(e)	C40/50 en XA3 (sol acide)
DÉROGATION VISÉE	Nature du liant équivalent	Teneur minimale en liant équivalent	Justification pour minorer d'une classe structurale (enrobage $C_{min, dur}$)	Granulats dérogeant sur exigence de WA maximale
APPELLATION NORMALISÉE	BPPS NF EN 206/CN C25/30 XC1p D20 S4 CI0,4	BPPS NF EN 206/CN C25/30 XC4p XF1p D20 S4 CI0,4	BPPS NF EN 206/CN C40/50 XS3p D14 S3 CI0,4	BPPS NF EN 206/CN C35/45 XA3p D22,4 S4 CI0,4
NIVEAU D'APPLICATION	N1	N2	N2	N2
CLASSE(S) D'EXPOSITION	XC1p	XC4p	XS3(e)p	XA3p (sol acide)
DUP	50 ans	50 ans	50 ans	50 ans
INDICATEURS DE DURABILITÉ GÉNÉRAUX	<ul style="list-style-type: none"> • % Porosité à l'eau • Résistivité 	<ul style="list-style-type: none"> • % Porosité à l'eau • Résistivité 	<ul style="list-style-type: none"> • % Porosité à l'eau • Résistivité 	<ul style="list-style-type: none"> • % Porosité à l'eau • Résistivité
GRANDEUR ASSOCIÉE À LA DURABILITÉ RETENUE	<p>Méthode de base : Vitesse de carbonatation accélérée ($v_{carbo acc}$)</p> <p>Méthode alternative : Porosité accessible à l'eau (P_{eau})</p>	<p>Méthode de base : Vitesse de carbonatation accélérée ($v_{carbo acc}$)</p> <p>Méthode alternative : Porosité accessible à l'eau (P_{eau})</p>	<p>Coefficient de migration des chlorures (D_{rem})</p>	<p>Méthode de base : I_{ca} (test de lixiviation à pH constant)</p> <p>Méthode alternative : si nature de liant conforme au FD P18-011: 2022, Coeff migration chlorures (D_{rem})</p>
LABORATOIRE (*)	W	X	Y	Z

10.1.1. Exemple n°1

Dans une centrale BPE, le producteur de béton est sollicité par l'Entreprise A pour la fourniture d'un béton conforme à la norme Béton, de classe de résistance C25/30, pour un plancher intérieur armé pour un bâtiment (classe d'exposition XC1(sec), Durée utile de projet (DUP) de 50 ans). L'entreprise demandeuse informe également le producteur de la nécessité d'un Dmax de 20 mm, et d'une consistance S4 pendant les deux heures après fabrication du béton en unité de production (transport puis mise en place compris).

Le producteur souhaite formuler son béton avec un ciment CEM II/A-S de classe mécanique 52,5 R de marque NF-LH, du fournisseur Dupont, en le dosant à 230 kg/m³ ; et le combiner à une addition calcaire de catégorie A du fournisseur Martin, dosée à 40 kg/m³. Etant donné que cette formule n'est pas couverte par les tableaux NA.F de la norme Béton NF EN 206+A2/CN, il doit recourir à l'approche performantielle.

10.1.1.1. Étape préliminaire : Vérifier la possibilité de recourir à l'approche performantielle

Le producteur vérifie que la composition de la formule envisagée lui permet bien de recourir au FD P 18-480, §4.1.4 :

• 1. Constituants normalisés :

Tous les constituants du béton (ciment, addition, granulats, adjuvant, eau de malaxage) sont conformes aux normes des constituants autorisés par la norme Béton (§2 et §NA.2 de la NF EN 206+A2/CN).

• 2. Vérification de la quantité de liant total selon FD P18-480 :

La somme de liant total prévu (ciment plus addition calcaire) est égale à : $230 + 40 = 270 \text{ kg/m}^3$. C'est supérieur ou égale à 260 kg/m^3 , la teneur minimale en liant total nécessaire en XC1.

• 3. Vérification de la teneur minimale en clinker du liant total :

La teneur en clinker du liant totale est calculée en considérant la teneur en clinker du ciment, et en la ramenant au liant total :

Teneur en clinker (Liant total) = Teneur en clinker (Ciment) * Quantité de ciment / Quantité Liant total

Dans cet exemple, le ciment CEM II/A-S utilisé est de marque NF-LH, avec une teneur en clinker de 85% déclarée par le producteur. Le producteur de béton peut donc tenir compte de cette valeur (et pas de la

teneur minimale de clinker selon la norme ciment), ce qui donne :

Teneur en clinker (Liant total) = $85\% * 230 / 270 = 72,4\%$ du liant total. Ce qui est supérieur ou égal au 15% minimum requis.

Il suffit au producteur d'obtenir l'accord des parties, de justifier la durabilité de son béton en étude, et de vérifier le béton en convenance. Il faut également que les dispositions qualité soient respectées (laboratoire, production, entreprise).

Avant une production et une livraison pour le projet, les étapes sont donc les suivantes :

- 1. Obtention de l'accord des parties ;**
- 2. Définition du niveau d'application ;**
- 3. Réalisation de l'étude en laboratoire ;**
- 4. Validation de l'étude et de la fiche de synthèse ;**
- 5. Épreuve de convenance avec l'entreprise ;**
- 6. Validation de la convenance ;**
- 7. Mise en place des systèmes d'assurance qualité ;**
- 8. Validation par la MOE des systèmes d'assurance qualité.**

10.1.1.2. Étape 1 : Obtention de l'accord des parties

Le recours à l'approche performantielle n'est pas prévu au marché dans notre exemple. Le producteur de béton obtient l'accord formel de l'Entreprise et, via l'Entreprise, celui de la Maîtrise d'Œuvre (MOE).

10.1.1.3. Étape 2 : Définition du niveau d'application

Le niveau d'application N1, préconisé par le FD P18-480 en classe d'exposition XC1(sec) et pour une durée utile de projet de 50 ans, est confirmé par la MOE.

10.1.1.4. Étape 3 : Réalisation de l'étude en laboratoire

La durabilité du béton doit être justifiée en vérifiant la vitesse de carbonatation, qui est la grandeur de durabilité associée à la classe d'exposition XC1.

a) Vérification des compétences du laboratoire

Le producteur de béton sous-traite les essais de durabilité au laboratoire W qui est accrédité COFRAC pour les essais de carbonatation accélérée, porosité accessible à l'eau, et résistivité électrique.

b) Étude de la formule nominale en laboratoire

Le producteur de béton organise l'étude en laboratoire :

- Trois gâchées pour la formule nominale sont fabriquées, la première servant entre autres à vérifier la consistance et son maintien.
- Un échantillon du ciment utilisé est prélevé le jour de l'étude, et testé sur mortier normalisé selon la norme NF EN 196-1 pour la mesure de CE.

- Le producteur demande également au producteur de ciment sur quelle valeur de C_{min} il s'engage pendant la durée du projet (cf. ci-dessous).

À chacune des gâchées nominales, des cylindres 11x22 sont coulés pour les essais de résistance mécanique (à 2 et 28 jours), de porosité à l'eau et de résistivité électrique (à 28 jours) et de vitesse de carbonatation à l'issue d'une cure humide de 90 jours. Les cylindres de béton sont démoulés le lendemain de la fabrication et conservés sous eau à 20°C avant échéance d'essais.

Note : pour les essais de durabilité, on panache les corps d'épreuve en les prélevant dans 3 cylindres différents, et ceci pour chaque gâchée.

Les résultats des essais sur l'échantillon de ciment et sur béton frais sont les suivants :

CIMENT DE L'ÉTUDE : RÉSISTANCE MORTIER NF EN 196-1				
C_E (mesuré) = 60 MPa		C_{min} (garantie fournisseur) = 52,5 MPa		
(GÂCHÉE 1) TEMPS	10 MIN	30 MIN	90 MIN	120 MIN
Affaissement (mm)	180	180	170	165

Les valeurs d'affaissement confirment une consistance S4 pendant deux heures après fabrication du béton.

Les résultats obtenus sur béton durci et la comparaison avec les critères attendus sont donnés ci-après :

N° GÂCHÉE	1	2	3	MOYENNE	CRITÈRE D'ACCEPTATION	CALCULS
$f_c(2j)$	12 MPa	14 MPa	13 MPa	13 MPa	• Pas de critère. • Sert pour calculer $r = f_c(2j) / f_c(28j)$ qui informe de la montée en résistance.	
$f_c(28j)$	35 MPa	34 MPa	32 MPa	$f_{ce} = 33,7$ MPa	$\geq f_{ck} + \lambda * (C_E - C_{min})$ $\geq f_{ck} + 2 * S$	$33,7 \geq 25 + 1 * (60 - 52,5)$ $= 32,5$ MPa $33,7 \geq 25 + 2 * 3 = 31$ MPa
$V_{acc,90j}$	2,5 mm/j ^{0,5}	3,2 mm/j ^{0,5}	2,7 mm/j ^{0,5}	2,8 mm/j ^{0,5}	\leq Valeur seuil DUP 50 ans (tableau 3 FD P18-480 en XC1)-1,5 * écart-type prévisionnel de $V_{acc,90j}$	$2,8 \leq 4 - 1,5 * 0,65 = 3,03$ mm/j ^{0,5} Vérif du coefficient de variation de $V_{acc}(CV)$: CV = Écart-type / Moyenne = $0,65/2,8 = 23,2\% > 20\%$ -> Ok selon tableau 14 du FD P18-480
ρ_{28j}	60 Ohm*m	50 Ohm*m	50 Ohm*m	53,3 Ohm*m	• Pas de critère d'acceptation en étude ; • Ces valeurs serviront pour l'acceptation du béton en convenance.	
$P_{eau,28j}$	18%	17%	17,5%	17,5%		

Conclusions sur ces essais :

• **La résistance mécanique en compression à 28 jours** est de 33,7 MPa et répond aux deux exigences du §4.4.2.2.1 du FD P18-480.

• **Grandeur de durabilité - Vitesse de carbonatation :**

- La valeur moyenne mesurée est 2,8 mm/jour^{0,5} ;
- Elle est comparée avec la valeur seuil du tableau 3 du FD P18-480 pour XC1(sec) et DUP 50 ans, valeur minorée de la marge de sécurité, calculée avec un écart-type prévisionnel de 0,65 choisi par le producteur de béton dans ce cas.

La condition à vérifier est donc :

Valeur mesurée < Valeur seuil – 1,5*écart-type prévisionnel

$$ie : 2,8 \leq 4 - 1,5 * 0,65 = 3,03 \text{ mm/jour}^{0,5}$$

Le coefficient de variation correspondant à l'écart-type prévisionnel est de :

$$0,65 / 2,8 = 23,2\%$$

Cette valeur est supérieure à 20%, et répond donc à la condition du tableau 14 du FD P18-480.

• **Indicateurs de durabilité :**

La porosité accessible à l'eau à 28 jours est 17,5%, et la résistivité électrique est de 53,3 Ohm*m. Ces valeurs serviront pour l'acceptation en épreuve de convenance.



10.1.1.5. Étape 4 : Validation de l'étude et de la fiche de synthèse

Le rapport d'étude du béton est transmis par le producteur de béton à l'Entreprise, qui le soumet pour appréciation à la Maîtrise d'Œuvre du projet, qui valide (ou non) la préqualification du béton envisagé, en s'appuyant sur les critères du FD P18-480, §4.4.2.2.

La fiche de synthèse est également transmise par le producteur de béton pour acceptation, sur la base du dossier d'étude :

APPELLATION NORMALISÉE	DÉROGATION VISÉE	NIVEAU D'APPLICATION	CLASSE(S) D'EXPOSITION	DUP
BPPS NF EN 206/CN C25/30 XC1p D20 S4 CIO,4	Nature de combinaison ciment et addition	N1	XC1(sec)	50 ans
INDICATEURS DE DURABILITÉ GÉNÉRAUX	GRANDEUR ASSOCIÉE À LA DURABILITÉ RETENUE	LABORATOIRE		
% Porosité à l'eau et résistivité	Vitesse de carbonatation accélérée	W		

10.1.1.6. Étape 5 : Épreuve de convenance avec l'entreprise

Une épreuve de convenance est organisée par le producteur de béton et l'entreprise avec l'unité de production prévue et les équipements de transports et de mise en œuvre.

Du ciment est prélevé pour la mesure de C_E .

Trois gâchées sont fabriquées en centrale et transférées dans un camion malaxeur mobilisé pour la convenance. Après homogénéisation, la consistance du béton frais est suivie sur deux heures :

TEMPS	10 MIN	30 MIN	90 MIN	120 MIN
Affaissement (mm)	190	180	170	160

À la fin du suivi de maintien de consistance, des cylindres 11x22 sont coulés pour les essais nécessaires. Les cylindres sont protégés et récupérés le lendemain pour être démoulés et conservés sous eau à 20°C.

La valeur de C_E mesurée, pour le ciment utilisé le jour de la convenance, est de 59 MPa.

Les valeurs mesurées sur béton après 28 jours de cure humide sont :

N° GÂCHÉE	MOYENNE	CRITÈRE D'ACCEPTATION	CALCULS
$f_{c(28j)}$	32 MPa	$\geq f_{ck} + \lambda \cdot (C_E - C_{min})$ $\geq f_{ck} + 2 \cdot S$	$32 \geq 25 + 1 \cdot (59 - 52,5) = 31,5 \text{ MPa}$ $32 \geq 25 + 2 \cdot 3 = 31 \text{ MPa}$
ρ_{28j}	45 Ohm*m	$\geq 0,8 \cdot \text{Valeur mesurée en étude}$	$45 > 0,8 \cdot 53,3 = 42,6 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$
$P_{\text{eau}, 28j}$	18,0%	$\leq 1,1 \cdot \text{Valeur mesurée en étude}$	$18\% \leq 1,1 \cdot 17,5 = 19\%$

10.1.1.7. Étape 6 : Validation de la convenance

Le rapport de l'épreuve de convenance du béton est soumis à appréciation à la Maîtrise d'Œuvre du projet. Les résultats étant probants, elle valide la qualification du béton.

10.1.1.8. Étape 7 : Mise en place des systèmes d'assurance qualité

Le producteur de béton met en place les procédures permettant de garantir : les précisions de pesée, la vérification de teneur en eau des granulats, le suivi de l'humidité et les autres exigences du §4.5.1 du FD P18-480 et il les renseigne dans son Plan Qualité. Les contrôles de production qu'il prévoit sont les mêmes que ceux pour une production traditionnelle, car on est en niveau d'application N1.

L'entreprise met également en place un système de maîtrise de la qualité (selon §4.5.2 du FD P18-480 décrivant les opérations clés). Etant donné le niveau d'application (N1, en XC1), l'entreprise n'a pas besoin de recourir à un contrôle externe des bétons.

10.1.1.9. Étape 8 : Validation par la MOE des systèmes d'assurance qualité

La Maîtrise d'Œuvre valide les dispositions d'assurance qualité prévues par le producteur et de l'Entreprise, qui respectent le FD P18-480, §4.5 pour l'approche performantielle, et les autres documents contractuels du projet.

10.1.1.10. Variante en étude avec la méthode alternative pour l'exemple 1

Au lieu de vérifier la durabilité du béton avec la vitesse de carbonatation accélérée, le producteur choisit de vérifier la durabilité du béton avec la porosité accessible à l'eau ramenée à la fraction volumique de pâte. C'est une méthode alternative autorisée par le FD P18-480 en classe d'exposition XC1(sec).

Le contenu de l'étude (cf. étape 3) est modifié :

N° GÂCHÉE	1	2	3	MOYENNE	CRITÈRE D'ACCEPTATION	CALCULS
$f_{c(2j)}$	12 MPa	14 MPa	13 MPa	13 MPa	<ul style="list-style-type: none"> Pas de critère. Sert pour calculer $r = f_{c(2j)} / f_{c(28j)}$ qui informe de la montée en résistance. 	
$f_{c(28j)}$	35 MPa	34 MPa	32 MPa	33,7 MPa	$\geq f_{ck} + \lambda * (C_E - C_{min})$ $\geq f_{ck} + 2 * S$	$33,7 \geq 25 + 1 * (60 - 52,5)$ $= 32,5 \text{ MPa}$ $33,7 \geq 25 + 2 * 3 = 31 \text{ MPa}$
$P_{eau, 90j}$ (alternative)	17 %	16,5 %	17,4 %	17 %	\leq Valeur seuil (tableau 4) $* f_{vp} - 1,5 * \text{écart-type}$ 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 14) -> Ok
ρ_{28j}	60 Ohm*m	50 Ohm*m	50 Ohm*m	53,3 Ohm*m	<ul style="list-style-type: none"> Pas de critère d'acceptation en étude ; Ces valeurs serviront pour l'acceptation du béton en convenance. 	
$P_{eau, 28j}$	18	17	17,5	17,5%		

Les conclusions de cette variante sont :

- **La résistance mécanique en compression à 28 jours** est de 33,7 MPa et répond aux deux exigences du §4.4.2.2.1 du FD P18-480.

- **Grandeur de durabilité - Porosité à l'eau à 90 jours :**

- La valeur moyenne mesurée à 90 jours est 17% ; la fraction volumique de pâte du béton est de 0,32.

- La porosité mesurée à 90 jours est comparée avec la valeur seuil du tableau 4 du FD P18-480 pour XC1sec et DUP 50 ans, multipliée par la fraction volumique de pâte du béton, et minorée de la marge de sécurité, calculée avec un écart-type prévisionnel de 0,8 choisi par le producteur de béton dans ce cas.

La condition à vérifier est donc :

Porosité mesurée < Valeur seuil * fVp - 1,5*écart-type prévisionnel

ie: $17 \leq 65 * 0.32 - 1,5 * 0,8 = 19,6 \text{ mm/jour}^{0,5}$

Le coefficient de variation correspondant à l'écart-type prévisionnel est de :

$0,8 / 17 = 4,7\%$,

Cette valeur est supérieure à 3%, et répond donc à la condition du tableau 14 du FD P18-480.

- **Dans cet exemple, la condition pour la porosité à l'eau est vérifiée dès 28 jours.** Ceci permet d'anticiper la préqualification du béton, afin d'organiser plus tôt la convenance (sans dispenser de vérifier les valeurs à 90 jours). Les valeurs de porosité accessible à l'eau à 28 jours et la résistivité électrique servent de référence pour l'épreuve de convenance.

Les étapes pour le projet (validation par les parties, dispositions qualité, convenance...) restent les mêmes qu'avec la méthode de base, qui a consisté à vérifier la vitesse de carbonatation accélérée.



10.1.2. Exemple n°2

Dans une unité de production BPE détentrice de la marque NF-BPE, le producteur de béton reçoit une commande pour un béton de classe mécanique C25/30, pour des voiles en béton armé pour une façade extérieure de bâtiment. Sont spécifiés : la classe d'exposition XC4/XF1, une DUP de 50 ans, un

D_{max} de 20mm, et une consistance S3 pendant deux heures après fabrication.

Le producteur de béton souhaite proposer un béton formulé en approche performantielle, car il voudrait le formuler avec un ciment CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N avec un dosage de 260 kg/m³ au lieu de 280 kg/m³.

10.1.2.1. Étape préliminaire : Vérifier la possibilité de recourir à l'approche performantielle

Le producteur vérifie que la composition de la formule envisagée lui permet bien de recourir au FD P 18-480, §4.1.4 :

• Constituants normalisés :

Tous les constituants du béton (ciment, addition, granulats, adjuvant, eau de malaxage) sont conformes aux normes des constituants autorisés par la norme béton (§2 et §NA.2 de la NF EN 206+A2/CN).

• Vérification de la quantité de liant total selon FD P18-480 :

Le liant total comprend le ciment seul, dont le dosage prévu est de 260 kg/m³, soit la teneur minimale en liant total nécessaire en XC4/XF1.

• Vérification de la teneur minimale en clinker du liant total :

Le ciment prévu n'est pas détenteur de la marque NF-LH. Le producteur se réfère donc à la la norme ciment pour savoir quelle teneur minimale de clinker

correspond aux CEM II/B, qui est de 65%. Ceci permet de vérifier que la teneur en clinker du liant total est supérieure aux 15% minimum requis.

Avant une production et une livraison pour le projet, les étapes sont donc les suivantes :

- 1. Obtention de l'accord des parties ;**
- 2. Définition du niveau d'application ;**
- 3. Réalisation de l'étude en laboratoire ;**
- 4. Validation de l'étude et de la fiche de synthèse ;**
- 5. Épreuve de convenance avec l'entreprise ;**
- 6. Validation de la convenance ;**
- 7. Mise en place des systèmes d'assurance qualité ;**
- 8. Validation par la MOE des systèmes d'assurance qualité.**

10.1.2.2. Étape 1 : Obtenir l'accord des parties

Le recours à l'approche performantielle n'est pas prévu au marché dans notre exemple. Le producteur de béton obtient l'accord formel de l'Entreprise et, via l'Entreprise, celui de la maîtrise d'Œuvre (MOE).

10.1.2.3 Étape 2 : Définir le niveau d'application

Le niveau d'application N2, préconisé par le FD P18-480 en classe d'exposition XC4/XF1 et pour une durée utile de projet de 50 ans, est confirmé par la MOE du projet.

10.1.2.4 Étape 3 : Réaliser l'étude en laboratoire

a) Vérification des compétences du laboratoire :

Le producteur de béton sous-traite les essais de durabilité au laboratoire W qui est accrédité COFRAC pour les essais de carbonatation accélérée, porosité accessible à l'eau, et résistivité électrique.

b) Étude de la formule nominale en laboratoire

Le producteur de béton organise l'étude en laboratoire :

• Trois gâchées pour la formule nominale sont fabriquées :

- Des cylindres 11x22 sont coulés pour les essais de résistance mécanique (2j et 28j), de porosité à l'eau (28j de cure) et de résistivité électrique (à 28 et 90 jours de cure) et de la vitesse de carbonatation à l'issue d'une cure humide de 90 jours.
- La première gâchée sert aussi à vérifier la consistance et son maintien.

• Deux gâchées sont fabriquées pour les formules dérivées en eau ; le producteur choisit une variation de l'eau de gâchage de $\pm 10 \text{ l/m}^3$:

- Des cylindres 11x22 sont coulés pour les essais de résistance mécanique (28j).

- Les gâchées servent aussi pour la vérification de la consistance visée.

• Un échantillon de ciment utilisé est prélevé le jour de l'étude, et testé sur mortier normalisé selon la norme NF EN 196-1 pour la mesure de C_E .

• Le producteur demande également au producteur de ciment sur quelle valeur de C_{\min} il s'engage pendant la durée du projet (cf. ci-dessous).

Les cylindres de béton sont démoulés le lendemain de la fabrication et conservés sous eau à 20°C avant échéance d'essais. Pour les essais de durabilité, les corps d'épreuve sciés sont panachés, en les prélevant dans 3 cylindres différents, ceci pour chaque gâchée.

Les performances du ciment sont les suivantes :

CIMENT DE L'ÉTUDE : RÉSISTANCE MORTIER NF EN 196-1	
C_E (mesuré) = 52 MPa	C_{\min} (garantie fournisseur) = 44 MPa

Les résultats sur béton frais pour la formule nominale sont les suivants :

GÂCHÉE 1 - NOMINALE) TEMPS	10 MIN	30 MIN	90 MIN	120 MIN
Affaissement (mm)	150	150	140	110

Les valeurs d'affaissement confirment une consistance S3 pendant deux heures après fabrication du béton.
Les résultats obtenus sur béton durci et la comparaison avec les critères attendus sont donnés les suivants :

N° GÂCHÉE	1	2	3	MOYENNE	CRITÈRE D'ACCEPTATION	CALCULS
$f_{c(2j)}$	3 MPa	4 MPa	3 MPa	3,3 MPa	• Pas de critère. • Sert pour calculer $r = f_{c(2j)} / f_{c(28j)}$ qui informe de la montée en résistance.	
$f_{c(28j)}$	35 MPa	34 MPa	34 MPa	$f_{CE} = 34,7$ MPa	$\geq f_{ck} + \lambda * (C_E - C_{min})$ $\geq f_{ck} + 2 * S$	$34,7 \geq 25 + 1 * (52 - 44) = 34,5$ MPa $34,7 \geq 25 + 2 * 3 = 31$ MPa
ρ_{90j}	180 Ohm*m	190 Ohm*m	175 Ohm*m	182 Ohm*m	• Pas de critère d'acceptation en étude. • La valeur moyenne sert pour le choix du seuil à considérer avec la vitesse de carbonatation.	
$V_{acc, 90j}$	2,0 mm/j ^{0,5}	2,1 mm/j ^{0,5}	2,2 mm/j ^{0,5}	2,1 mm/j ^{0,5}	\leq Valeur seuil DUP 50 ans (tableau 3 FD P18-480 en XC4) – 1,5 * écart-type prévisionnel de $V_{acc, 90j}$	$2,1 \leq 3 - 1,5 * 0,5 = 2,25$ mm/j ^{0,5} <u>Vérif du Coeff de variation de vacc :</u> CV = Écart-type / Moyenne = $0,5/2,1 = 23,8\% > 20\%$ -> Ok selon tableau 14 du FD P18-480
ρ_{28j}	150 Ohm*m	140 Ohm*m	135 Ohm*m	142 Ohm*m	• Pas de critère d'acceptation en étude.	
$P_{eau, 28j}$	16,5	17%	17,5%	17%	• Ces valeurs serviront pour l'acceptation du béton en convenue.	

Les conclusions pour les essais sur béton durci sont les suivants :

• **La résistance mécanique en compression à 28 jours est** de 34,7 MPa et répond aux deux exigences du §4.4.2.2.1 du FD P18-480.

• **Grandeur de durabilité - Vitesse de carbonatation:**

- La valeur moyenne mesurée est 2,1 mm/jour^{0,5} ; la résistivité électrique à 90 jours est de 182 Ohm*m.

- La valeur seuil du tableau 3 du FD P18-480 pour XC4 à prendre en compte est celle pour une résistivité supérieure à 175 Ohm*m et une DUP 50 ans, minorée de la marge de sécurité, calculée avec un écart-type prévisionnel de 0,5 choisi par le producteur de béton dans ce cas.

La condition à vérifier est :

Valeur mesurée < Valeur seuil – 1,5*écart-type prévisionnel

ie: $2,1 \leq 3 - 1,5 * 0,5 = 2,25$ mm/jour^{0,5}

Le coefficient de variation correspondant à l'écart-type prévisionnel est de :

$0,5 / 2,1 = 23,8\%$, > 20% > Ok avec tableau 14 FD P18-480.

• **Indicateurs de durabilité :**

La porosité accessible à l'eau à 28 jours est 17%, et la résistivité électrique est de 142 Ohm*m. Ces valeurs serviront de référence pour l'épreuve de convenue et pour les contrôles en production.

c) Pour les formules dérivées en eau

GÂCHÉE DÉRIVÉE EAU -10 l/m ³	10 MIN	30 MIN	90 MIN	120 MIN
Affaissement (mm)	130	120	120	90

La classe de consistance S3 est validée jusqu'à 90 minutes après fabrication pour la dérivée en eau +10 l/m³. La valeur à deux heures (120 minutes) sort de l'exigence (ce qui est acceptable pour une dérivée), et est communiquée à l'Entreprise pour en tenir compte pour la mise en œuvre.

GÂCHÉE DÉRIVÉE EAU +10 l/m ³	10 MIN	30 MIN	90 MIN	120 MIN
Affaissement (mm)	160	150	140	140

La classe de consistance S4 est validée à 2 heures après fabrication pour la dérivée en eau +10 l/m³. Les résultats obtenus sur béton durci et la comparaison avec les critères attendus sont donnés les suivants :

N° GÂCHÉE	DÉRIVÉE - 10 l/m ³	DÉRIVÉE + 10 l/m ³	CRITÈRE D'ACCEPTATION	CALCULS
f _c (28j)	36 MPa	31 MPa	f _{CE} ± 0,15 f _{CE}	36 ≤ f _{CE} * (1+0,15) = 34,7 * 1,15 = 39,9 MPa 31 ≥ f _{CE} * (1-0,15) = 34,7 * 0,85 = 29,5 MPa
V _{acc,90j}	1,9 mm/j ^{0,5}	2,3 mm/j ^{0,5}	≤ Valeur seuil DUP 50 ans (tableau 3 FD P18-480 en XC4) + Variation logique par rapport à la nominale pour la dérivée -10l/m ³	2,3 ≤ 3 mm/j ^{0,5} 1,9 ≤ 3 mm/j ^{0,5} 1,9 ≤ V _{acc,90j} nominale = 2,1 mm/j ^{0,5} V _{acc,90j} nominale = 2,1 mm/j ^{0,5} ≤ 2,6

Les conclusions sont donc les suivantes :

- **La résistance mécanique en compression à 28 jours** des deux dérivées est comprise dans l'intervalle de la résistance nominale à plus ou moins 15% :

Dérivée Eau +10 l/m³ : 31 MPa ≥ f_{CE} * (1-0,15) = 34,7 * 0,85 = 29,5 MPa ;

Dérivée Eau -10 l/m³ : 36 MPa ≥ f_{CE} * (1+0,15) = 34,7 * 1,15 = 39,9 MPa.

• Grandeur de durabilité - Vitesse de carbonatation :

Les vitesses de carbonatation mesurées pour les deux dérivées en eau sont 1,9 mm/jour^{0,5} (pour -10 l d'eau /m³) de 2,3 mm/jour^{0,5} (pour +10 l d'eau /m³). Elles sont inférieures à la valeur seuil du tableau 3 du FD P18-480 pour :

- XC4 ;
- Une résistivité supérieure à 175 Ohm*mètre ;
- Une DUP 50 ans ;
- Sans marge de sécurité (car formules dérivées).

En conclusion, les résultats en étude pour la formule nominale et des deux formules dérivées en eau (-10 l/m³ et +10 l/m³) répondent aux exigences du FD P18-480.

10.1.2.5 Étape 4 : Validation de l'étude et de la fiche de synthèse

- Le rapport d'étude du béton est transmis par le producteur de béton à l'Entreprise, qui le soumet pour appréciation à la Maîtrise d'Œuvre du projet, qui valide (ou non) la préqualification du béton envisagé, en s'appuyant sur les critères du FD P18-480, §4.4.2.2.
- La fiche de synthèse est également transmise par le producteur de béton pour acceptation, sur la base du dossier d'étude :

APPELLATION NORMALISÉE	DÉROGATION VISÉE	NIVEAU D'APPLICATION	CLASSE(S) D'EXPOSITION	DUP
BPPS NF EN 206/CN C25/30 XC4p/XF1p D20 S3 Cl0,4	Teneur en liant équivalent	N2	XC4/XF1	50 ans
INDICATEURS DE DURABILITÉ GÉNÉRAUX	GRANDEUR ASSOCIÉE À LA DURABILITÉ RETENUE	LABORATOIRE		
% Porosité à l'eau et résistivité	Vitesse de carbonatation accélérée	X		

10.1.2.6 Étape 5 : Épreuve de convenance avec l'entreprise

Une épreuve de convenance est organisée par le producteur de béton et l'entreprise avec l'unité de production prévue et les équipements de transports, et de mise en œuvre.

Trois gâchées sont fabriquées en unité de production et transférées dans un camion malaxeur mobilisé pour la convenance. Après homogénéisation, la consistance du béton frais est suivie sur deux heures :

TEMPS	10 MIN	30 MIN	90 MIN	120 MIN
Affaissement (mm)	150	140	130	110

La consistance S3 est validée pour deux heures après fabrication.

A la fin du suivi de maintien de consistance, des cylindres 11x22 sont coulés pour les essais nécessaires. Les cylindres sont protégés et récupérés le lendemain pour être démoulés et conservés sous eau à 20°C.

La valeur de CE mesurée pour le ciment utilisé le jour de la convenance est de 51 MPa.

Les valeurs mesurées après 28 jours de cure humide sont :

N° GÂCHÉE	MOYENNE	CRITÈRE D'ACCEPTATION	CALCULS
$f_{c(28j)}$	33 MPa	$\geq f_{ck} + \lambda \cdot (C_E - C_{min})$ $\geq f_{ck} + 2 \cdot S$	$33 \geq 25 + 1 \cdot (51 - 44) = 32 \text{ MPa}$ $33 \geq 25 + 2 \cdot 3 = 31 \text{ MPa}$
ρ_{28j}	130 Ohm*m	$\geq 0,8 \cdot \text{Valeur mesurée en étude}$	$130 > 0,8 \cdot 142 = 114 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$
$P_{\text{eau}, 28j}$	17,5 %	$\leq 1,1 \cdot \text{Valeur mesurée en étude}$	$17,5\% \leq 1,1 \cdot 17 = 18,7\%$

10.1.2.7 Étape 6 : Validation de la convenance

Le rapport de l'épreuve de convenance du béton est soumis à appréciation à la Maîtrise d'Œuvre du projet, qui valide (ou non) la qualification du béton envisagé.

10.1.2.8 Étape 7 : Mise en place des systèmes d'assurance qualité

- Le producteur de béton met en place les procédures permettant de garantir les précisions de pesée, vérification de teneur en eau des granulats, suivi de l'humidité et autres exigences du §4.5.1 du FD P18-480, et les renseigne dans son plan qualité.
- Les contrôles de production qu'il prévoit sont les mêmes que ceux pour une production traditionnelle, avec en plus la vérification des indicateurs généraux de durabilité selon §4.4.4 FD P18-480.
- Étant donné que son unité de production est détentrice de la marque NF-BPE, cela lui permet de bénéficier d'un système qualité évalué par tierce partie.
- L'Entreprise dispose également d'un système de maîtrise de la qualité selon §4.5.2 du FD P18-480 décrivant les opérations clés.
- Étant donné le niveau d'application (N2), l'Entreprise recourt à un contrôle externe des bétons à un laboratoire.

10.1.2.9 Étape 8 : Validation par la MOE des systèmes d'assurance qualité

La maîtrise d'Œuvre valide les dispositions d'assurance qualité prévues par le producteur et de l'Entreprise, sur la base du FD P18-480, §4.5 pour l'approche performantielle, et les autres documents contractuels du projet.

Sur la base du dossier complet (étude, convenance, dispositions d'assurance qualité), et la validation de la MOE sur les différents points, la fourniture du béton peut commencer pour le projet.

Contrôle de production :

Cette formule est produite de façon discontinue. En plus des contrôles de production traditionnels de la norme NF EN 206+A2/CN (NB : hors famille élargie) et des exigences de la marque NF-BPE, la porosité accessible à l'eau et la résistivité électrique à 28 jours sont vérifiées tous les 500 m³ pendant la période initiale de 3 mois puis tous les 1 000 m³.

Au bout de deux ans, un prélèvement en production est effectué pour vérifier la vitesse de carbonatation, pour valider de nouveau la formule de béton.



10.1.2.10 Variante en étude avec la méthode alternative

Le producteur choisit de vérifier la durabilité du béton avec la porosité accessible à l'eau ramenée à la fraction volumique de pâte. Pour cela, il doit toutefois vérifier la carbonatation accélérée, mais qui est mesurée pour une seule gâchée en étude (méthode alternative selon FD P18-480 en XC4). La formule est prévue avec une fraction volumique de pâte de 0,32.

En étude (étape 3), les essais sur béton durci réalisés et les critères d'acceptation sont, dans ce cas :

N° GÂCHÉE	1	2	3	MOYENNE	CRITÈRE D'ACCEPTATION	CALCULS
$f_{c(2j)}$	3 MPa	4 MPa	3 MPa	3,3 MPa	<ul style="list-style-type: none"> Pas de critère. Sert pour calculer $r = f_{c(2j)} / f_{c(28j)}$ qui informe de la montée en résistance. 	
$f_{c(28j)}$	35 MPa	34 MPa	34 MPa	$f_{CE} = 34,7$ MPa	$\geq f_{ck} + \lambda(C_E - C_{min})$ $\geq f_{ck} + 2 \cdot S$	$33,7 \geq 25 + 1 \cdot (52 - 42,5) = 32,5$ MPa $33,7 \geq 25 + 2 \cdot 3 = 31$ MPa
P_{90j}	180 Ohm*m	190 Ohm*m	175 Ohm*m	182 Ohm*m	Pas de critère d'acceptation en étude ; la valeur moyenne sert pour le choix du seuil à considérer avec $Peau / fVp$.	
$P_{eau, 90j}$ (alternative)	17 %	16,5 %	16,5 %	16,7 %	\leq Valeur seuil (tableau 4) * fVp - 1,5 * écart-type prévisionnel de $Peau$	$16,7 \leq 65 * 0,32 - 1,5 * 0,8 = 19,6$ % Vérif du Coeff de variation de $Peau$: $CV = \text{Écart-type} / \text{Moyenne} = 0,8 / 17 = 4,7\% > 3\%$ (tableau 14) -> Ok
$V_{acc, 90j}$	-	-	1,8 mm/ $j^{0,5}$	1,8 mm/ $j^{0,5}$	$\leq 0,08 * Peau / fVp - 2,2$	$1,8 \leq 0,08 * 16,7 / 0,32 - 2,2 = 1,98$
ρ_{28j}	120 Ohm.m	150 Ohm.m	130 Ohm.m	133 Ohm.m	Pas de critère d'acceptation en étude ; ces valeurs serviront pour acceptation du béton en convenance	
$P_{eau, 28j}$	18%	17%	17,5%	17,5%		

• Grandeurs de durabilité - Porosité à l'eau à 90 jours avec vérification de la vitesse de carbonatation (pour une gâchée) :

- La valeur moyenne mesurée à 90 jours est 16,7% ; la fraction volumique de pâte du béton est de 0,32.
- La porosité mesurée à 90 jours est comparée avec la valeur seuil du tableau 4 du FD P18-480 pour XC4, résistivité supérieure à 175 Ohm*m et DUP 50 ans, multipliée par la fraction volumique de pâte du béton, et minorée de la marge de sécurité, calculée avec un écart-type prévisionnel de 0,8 choisi par le producteur de béton dans ce cas.

La condition à vérifier est donc :

$$16,7\% \leq 65 * 0,32 - 1,5 * 0,8 = 19,6\%$$

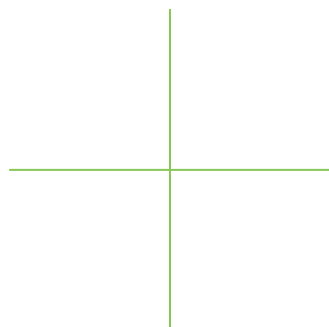
Le coefficient de variation correspondant est de :

$0,8 / 16,7 = 4,7\%$, qui est supérieur à 3%, et répond donc à la condition du tableau 14 du FD P18-480.

La vitesse de carbonatation accélérée mesurée pour une gâchée est de 1,8 mm/ $j^{0,5}$. La relation du FD P18-480 est vérifiée :

$$V_{acc} \leq 0,08 * Peau / fVp - 2,2$$

$$V_{acc} = 1,8 \text{ mm}/j^{0,5} \leq 0,08 * 16,7 / 0,32 - 2,2 = 1,98 \text{ mm} / j^{0,5}$$



Pour les dérivées en eau :

NO GÂCHÉE DÉRIVÉES	DÉRIVÉE - 10 l/m ³	DÉRIVÉE + 10 l/m ³	CRITÈRE D'ACCEPTATION	CALCULS
$f_{c(28)}$	36 MPa	31 MPa	$f_{CE} \pm 0,15 f_{CE}$	$36 \leq f_{CE} * (1+0,15) = 34,7 * 1,15 = 39,9 \text{ MPa}$ $31 \geq f_{CE} * (1-0,15) = 34,7 * 0,85 = 29,5 \text{ MPa}$
$P_{\text{eau}, 90j}$	16 %	18,5 %	\leq Valeur seuil (tableau 4) * f_{Vp} + Variation logique par rapport à la nominale pour la dérivée -10 l/m ³	$16 \leq 65 * 0,32 = 20,8 \%$ $18,5 \leq 65 * 0,32 = 20,8 \%$ $16 \leq P_{\text{eau}, 90j} \text{ nominale} = 16,7 \%$ $18,5 \geq P_{\text{eau}, 90j} \text{ nominale} = 16,7 \%$

• **La résistance mécanique en compression à 28 jours des deux dérivées est bien comprise dans l'intervalle de la résistance nominale à plus ou moins 15% :**

**Dérivée Eau +10 l/m³ : 31 MPa $\geq f_{CE} * (1-0,15)$
= 34,7 * 0,85 = 29,5 MPa**

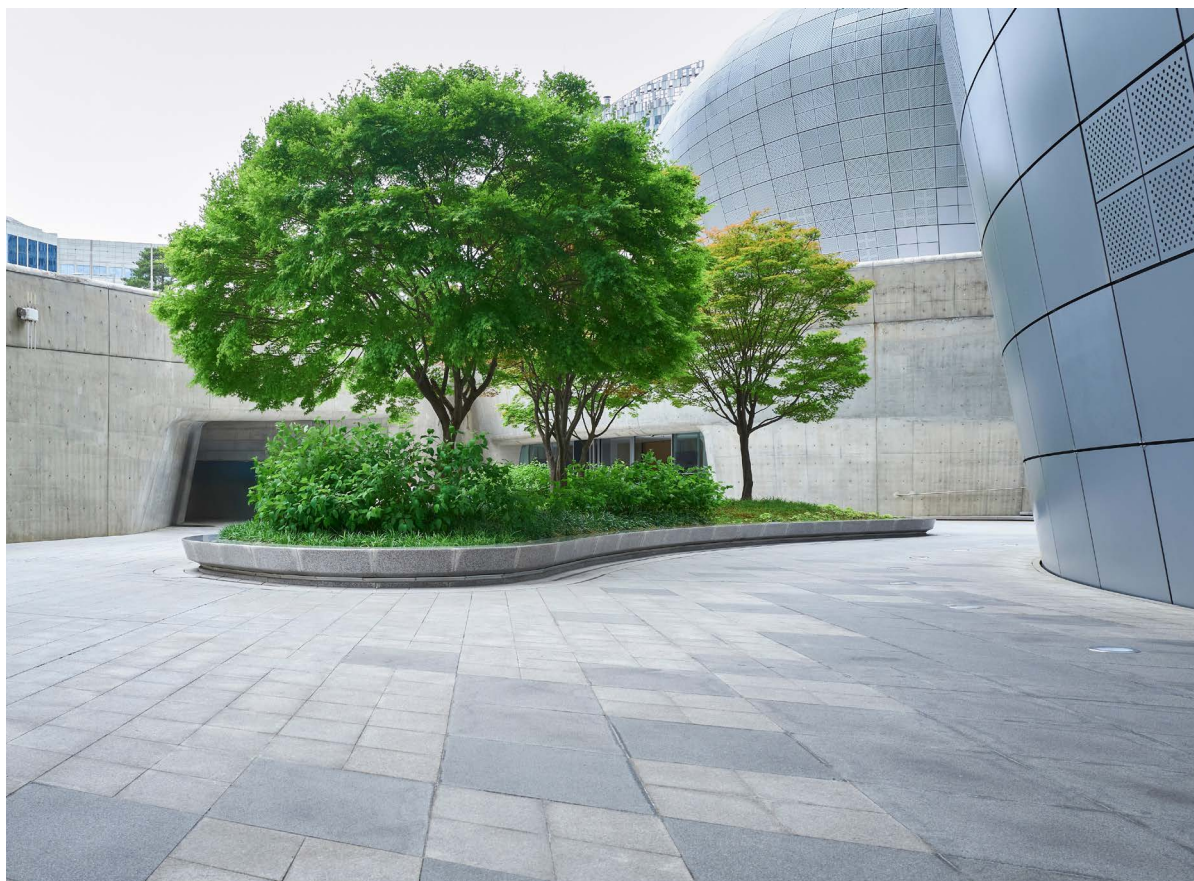
**Dérivée Eau -10 l/m³ : 36 MPa $\geq f_{CE} * (1+0,15)$
= 34,7 * 1,15 = 39,9 MPa**

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

- Les valeurs mesurées pour les deux dérivées en eau sont 16% mm/j^{0,5} (pour -10 l d'eau /m³) et 18,5 % (pour +10 l d'eau /m³) ;

- Ces valeurs sont comparées avec la valeur seuil du tableau 4 du FD P18-480, en prenant en compte la fraction volumique de pâte, sans marge de sécurité (car formules dérivées).

L'épreuve de convenance et les critères d'acceptation du dossier technique (étude, convenance, dispositions assurance qualité) sont les mêmes qu'avec la méthode de base, qui a consisté à justifier la durabilité du béton avec la vitesse de carbonatation accélérée.



10.1.3. Exemple n°3

Dans une unité de production BPE, un producteur de béton est sollicité pour la fabrication un béton de classe mécanique C40/50, pour des façades d'un bâtiment en front de mer (classe d'exposition XS3(e), car façades exposées au embruns, Durée Utile du Projet de 50 ans, comme précisé dans le cahier des clauses du marché).

L'entreprise spécifie au producteur un D_{\max} de 20 mm, et une consistance S4 pendant les deux heures après fabrication du béton en unité de production (transport puis mise en place).

L'entreprise demande également un béton lui permettant de minorer d'une classe structurale la partie de l'ouvrage, pour diminuer l'enrobage, et donc la quantité de béton nécessaire, ce qui a un effet bénéfique à l'échelle du bâtiment pour diminuer

l'impact carbone du projet, d'après les calculs faits pour le dimensionnement. L'approche performantielle est prévue dans le cahier des clauses techniques du marché, pour ce béton.

Le producteur de béton part sur une formule avec un ciment CEM III/B SR de classe mécanique 42,5 N du fournisseur DURAND, dosée à 370 kg/m³. La formule prévue est couverte par les tableaux NA.F de la norme béton NF EN 206+A2/CN pour XS3(e), mais ne présente pas une résistance mécanique suffisante pour justifier de la minoration d'une classe structurale selon le tableau 4.3NF de la partie 1-1 de l'Eurocode 2 et de son complément national (NF EN 1992-1-1/NA/A1 : 2025). Il doit donc recourir à l'approche performantielle pour pouvoir justifier la réduction du $c_{\min, \text{dur}}$ pour l'Entreprise via la minoration d'une classe structurale.

10.1.3.1 Étape 1 : Obtenir l'accord des parties

L'approche performantielle étant prévue au marché pour le béton visé, il suffit au producteur de béton d'informer l'Entreprise de sa démarche.

10.1.3.2 Étape 2 : Définir le niveau d'application

Le niveau d'application N2, préconisé par le FD P18-480 en classe d'exposition XS3(e) et pour une durée utile de projet de 50 ans, est confirmé par la MOE du projet.



10.1.3.3 Étape 3 : Réaliser l'étude en laboratoire

a) Vérification des compétences du laboratoire :

Le producteur de béton organise l'étude en laboratoire, avec le prestataire Y qui n'est pas accrédité COFRAC, mais dispose d'un système de management de la qualité, de la qualification de son personnel et du suivi métrologique du matériel utilisé, assure réaliser en respectant les normes concernées, et justifie d'un courrier de participation à des campagnes inter laboratoires (CIL) pour la diffusion des ions chlorures, porosité et résistivité.

b) Étude de la formule nominale en laboratoire

b.1) Voici les détails de l'étude du béton :

- Trois gâchées pour la formule nominale sont fabriquées pour :
 - des cylindres 11x22 sont coulés pour les essais de résistance mécanique (2j et 28j), de porosité à l'eau (28j de cure) et de résistivité électrique (à 28 et 90 jours de cure) et de la diffusion des ions de type chlorure à l'issue d'une cure humide de 90 jours ;
 - la première gâchée sert aussi à vérifier la consistance et son maintien.

- Deux gâchées sont fabriquées pour les formules dérivées en eau ; le producteur choisit une variation de l'eau de gâchage de $\pm 5 \text{ l/m}^3$:
 - des cylindres 11x22 sont coulés pour les essais de résistance mécanique (28j) ;
 - les gâchées servent aussi pour la vérification de la consistance visée.
- Un échantillon du ciment utilisé est prélevé le jour de l'étude, et testé sur mortier normalisé selon la norme NF EN 196-1 pour la mesure de CE.
- Le producteur demande également au producteur de ciment sur quelle valeur de C_{\min} il s'engage pendant la durée du projet (cf. ci-dessous).

Les cylindres de béton sont démoulés le lendemain de la fabrication et conservés sous eau à 20°C avant échéance d'essais. Pour les essais de durabilité, les corps d'épreuve sciés sont panachés, en les prélevant dans 3 cylindres différents, ceci pour chaque gâchée.

b.2) Les résultats obtenus sont les suivants :

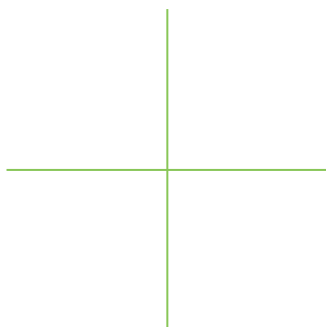
Pour l'échantillon de ciment :

CIMENT DE L'ÉTUDE : RÉSISTANCE MORTIER NF EN 196-1	
C^F (mesuré) = 54 MPa	C_{\min} (garantie fournisseur) = 45 MPa

Pour la formule nominale :

(GÂCHÉE 1 - NOMINALE) TEMPS	10 MIN	30 MIN	90 MIN	120 MIN
Affaissement (mm)	200	180	170	160

Les valeurs d'affaissement confirment une consistance S4 pendant deux heures après fabrication du béton.



N° GÂCHÉE	1	2	3	MOYENNE	CRITÈRE D'ACCEPTATION	CALCULS
$f_c(2j)$	9 MPa	8 MPa	10 MPa	9 MPa	• Pas de critère. • Sert pour calculer $r = f_c(2j) / f_c(28j)$ qui informe de la montée en résistance.	
$f_c(28j)$	50 MPa	51 MPa	50 MPa	$f_{CE} = 50,3$ MPa	$\geq f_{ck} + \lambda(C_E - C_{min})$ $\geq f_{ck} + 2 \cdot S$	$50,3 \geq 40 + 1 \cdot (54 - 45) = 48$ MP $50,3 \geq 40 + 2 \cdot 3 = 46$ MPa
$D_{rcm, 90j}$	$4,0 \cdot 10^{-12} m^2/s$	$3,0 \cdot 10^{-12} m^2/s$	$3,5 \cdot 10^{-12} m^2/s$	$3,5 \cdot 10^{-12} m^2/s$	\leq Valeur seuil du tableau A.3 FD P18-480 pour XS3(e), DUP 50 ans et pour minorer d'une classe structurale, et pour facteur de vieillissement* (ageing factor de la formule) - $1,5 \cdot$ écart-type prévisionnel de Drcm	$3,5 \leq 5 - 1,5 \cdot 0,8 = 3,8$ m ² /s <i>Vérif du Coeff de variation de V_{acc}</i> CV = Écart-type / Moyenne = $0,8/3,5 = 22,9\% > 20\%$ -> Ok selon tableau 14 du FD P18-480
ρ_{28j}	150 Ohm*m	140 Ohm*m	135 Ohm*m	220 Ohm*m	Pas de critère d'acceptation en étude ; ces valeurs serviront pour acceptation du béton en convenue	
$P_{eau, 28j}$	16,5%	17%	17,5%	17%		

• La résistance mécanique en compression à 28 jours est de 50,3 MPa et répond aux deux exigences du §4.4.2.2.1 du FD P18-480.

• Grandeur de durabilité - Coefficient de diffusion des ions chlorure :

- La valeur moyenne mesurée est 3,5 m²/s.

- La valeur seuil à considérer dépend du facteur de vieillissement (cf. annexe A) propre à la formule de béton, et la DUP pour la partie d'ouvrage. Le facteur de vieillissement (alpha) de la formule prévue est : Alpha = 0,3 + 0,15, en raison de la teneur en laitier qui est supérieure à 20% dans le liant total.

- La valeur seuil du tableau A.3 de l'annexe A du FD P18-480 pour XS3(e) à prendre en compte est celle pour un facteur de vieillissement Alpha de 0.45 et une DUP 50 ans. Cette valeur seuil est minorée de la marge de sécurité, calculée avec un écart-type prévisionnel de 0,8 choisi par le producteur de béton dans ce cas.

La condition à vérifier est :

Valeur mesurée < Valeur seuil - 1,5 * écart-type prévisionnel

ie: $3,5 \leq 5 - 1,5 \cdot 0,8 = 3,8 \cdot 10^{-12} m^2/s$ 0,5

Le coefficient de variation correspondant à l'écart-type prévisionnel est de :

$0,8 / 3,5 = 22,9\%, > 20\%$

Ce résultat est en accord avec le tableau 14 FD P18-480.

Indicateur de durabilité :

- La porosité accessible à l'eau à 28 jours est de 17% ;
- La résistivité électrique est de 142 Ohm*m.

Ces valeurs serviront de référence pour l'épreuve de convenue et pour les contrôles en production.

c) Pour les formules dérivées en eau :

Voici les résultats des essais.

GÂCHÉE DÉRIVÉE EAU -5 l/m ³	10 MIN	30 MIN	90 MIN	120 MIN
Affaissement (mm)	180	170	160	140

La classe de consistance S4 est validée jusqu'à 90 minutes après fabrication pour la dérivée en eau -5 l/m³. La valeur à deux heures (120 minutes) sort de l'exigence (ce qui est acceptable pour une dérivée), et est communiquée à l'Entreprise pour en tenir compte pour la mise en œuvre.

* Voir annexe A

GÂCHÉE DÉRIVÉE EAU +5 l/m ³	10 MIN	30 MIN	90 MIN	120 MIN
Affaissement (mm)	210	180	180	160

La classe de consistance S4 est validée à 2 heures après fabrication pour la dérivée eau + 5 l/m³.

Les résultats obtenus sur béton durci et la comparaison avec les critères attendus sont donnés les suivants :

NO GÂCHÉE DÉRIVÉES	DÉRIVÉE - 5 L/M ³	DÉRIVÉE + 5 L/M ³	CRITÈRE D'ACCEPTATION	CALCULS
f_c (28j)	56 MPa	45 MPa	$f_{CE} \pm 0,15 f_{CE}$	$56 \text{ MPa} \leq f_{CE} * (1+0,15) = 50,3 * 1,15 = 57,8 \text{ MPa}$ $45 \text{ MPa} \geq f_{CE} * (1-0,15) = 50,3 * 0,85 = 42,8 \text{ MPa}$
$D_{rcm, 90j}$	$2,5 \text{ m}^2/\text{s}_{0,5}$	$4,5 \text{ m}^2/\text{s}_{0,5}$	\leq Valeur seuil DUP 50 ans (tableau A.3 FD P18-480 en XS3(e) avec facteur de vieillissement de 0,45) + Variation logique par rapport à la nominale pour la dérivée -5 l/m ³	$2,5 \leq 5 * 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}^{0,5}$ $4,5 \leq 5 * 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}^{0,5}$ $2,5 \leq D_{rcm, 90j} \text{ nominale} = 3,5 * 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}^{0,5}$

- **Les résistances mécaniques en compression à 28 jours des deux dérivées sont comprises dans l'intervalle de la résistance nominale à plus ou moins 15% :**

dérivée en eau -5 l/m³ : 56 MPa < f_{CE} * (1-0,15) = 50,3 * 0,85 = 57,8 MPa ;

dérivée en eau +5 l/m³ : 45 MPa ≥ f_{CE} * (1+0,15) = 50,3 * 1,15 = 42,8 MPa.

- **Grandeur de durabilité - Coefficient de diffusion :**

- Les valeurs de coefficient de diffusion mesurées pour les deux dérivées en eau sont $2,5 * 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (pour dérivée -5 l d'eau /m³) et de $4,5 * 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (pour dérivée +5 l d'eau /m³).

Ces valeurs sont inférieures à la valeur seuil du tableau A.3 du FD P18-480 pour XS3(e) et le facteur de vieillissement de la formule (alpha = 0,45), sans marge de sécurité (car formules dérivées).

En conclusion, les résultats en étude pour la formule nominale et des deux formules dérivées en eau (-5 l/m³ et +5 l/m³) répondent aux exigences du FD P18-480.

10.1.3.4 Étape 4 : Validation de l'étude et de la fiche de synthèse

Le rapport d'étude du béton est transmis par le producteur de béton à l'Entreprise, qui le soumet pour appréciation à la Maîtrise d'Œuvre du projet, qui valide (ou non) la préqualification du béton envisagé, en s'appuyant sur les critères du FD P18-480, §4.4.2.2.

La fiche de synthèse est également transmise par le producteur de béton pour acceptation, sur la base du dossier d'étude :

APPELLATION NORMALISÉE	DÉROGATION VISÉE	NIVEAU D'APPLICATION	CLASSE(S) D'EXPOSITION	DUP
BPPS NF EN 206/ CN C40/50 XC4/XF1, XS3(e)p D20 S3 Cl0,65	Minoration d'une classe structurale	N2	XS3(e)	50 ans
INDICATEURS DE DURABILITÉ GÉNÉRAUX	GRANDEUR ASSOCIÉE À LA DURABILITÉ RETENUE	LABORATOIRE		
% Porosité à l'eau et résistivité	Coefficient de diffusion de chlorure	Y		

10.1.3.5 Étape 5 : Épreuve de convenue avec l'entreprise synthèse

Les détails de l'épreuve de convenue sont décrits ci-dessous.

Une épreuve de convenue est organisée par le producteur de béton et l'entreprise avec l'unité de production prévue et les équipements de transports, et de mise en œuvre.

Trois gâchées sont fabriquées en centrale et transférées dans un camion malaxeur mobilisé pour la convenue.

TEMPS	10 MIN	30 MIN	90 MIN	120 MIN
Affaissement (mm)	210	180	170	160

Les résultats montrent que la consistance S4 est validée sur deux heures après fabrication.

A la fin du suivi de maintien de consistance, des cylindres 11x22 sont coulés pour les essais nécessaires. Les cylindres sont protégés et récupérés le lendemain pour être démoulés et conservés sous eau à 20°C.

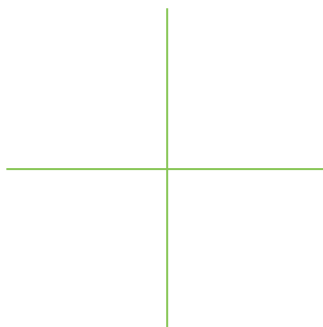
La valeur de CE mesurée pour le ciment utilisé le jour de la convenue est de 51 MPa. La valeur de C_{min} du fournisseur était de 45 MPa.

Les valeurs mesurées après 28 jours de cure humide sont :

N° GÂCHÉE	MOYENNE	CRITÈRE D'ACCEPTATION	CALCULS
f_c (28j)	48 MPa	$\geq f_{ck} + \lambda(C_E - C_{min})$ $\geq f_{ck} + 2 \cdot S$	$48 \geq 40 + 1 \cdot (51 - 45) = 46$ MPa $48 \geq 40 + 2 \cdot 3 = 46$ MPa
ρ_{28j}	180 Ohm*m	$\geq 0,8 \cdot$ Valeur mesurée en étude	$180 \geq 0,8 \cdot 220 = 176$ Ohm*m
$P_{eau, 28j}$	17,5%	$\leq 1,1 \cdot$ Valeur mesurée en étude	$17,5\% \leq 1,1 \cdot 17 = 18,7\%$

10.1.3.6 Étape 6 : Validation de la convenue

Le rapport de l'épreuve de convenue du béton est soumis à appréciation à la Maîtrise d'Œuvre du projet, qui valide (ou non) la qualification du béton envisagé.



10.1.3.7 Étape 7 : Mise en place des systèmes d'assurance qualité

• Pour le producteur de bétons :

- Il met en place les procédures permettant de garantir les précisions de pesée, la vérification de teneur en eau des granulats, le suivi de l'humidité et les autres exigences du §4.5.1 du FD P18-480, et les renseigne dans son plan qualité.
- Les contrôles de production qu'il prévoit sont les mêmes que ceux pour une production traditionnelle, avec en plus la vérification des indicateurs généraux de durabilité selon §4.4.4 FD P18-480.
- L'unité de production n'est pas détentrice de la marque NF-BPE. Elle doit justifier d'un système qualité évalué par tierce partie. Comme il s'agit d'un niveau N2, il est nécessaire de mettre en place un contrôle externe pour la fabrication du béton (cf. § 4.5.1 du FD P 18-480).

• Pour l'entreprise de mise en œuvre :

- Elle met en place un système de maîtrise de la qualité (cf. §4.5.2 du FD P18-480) décrivant les opérations clés ;
- Etant donné le niveau d'application (N2), l'entreprise recourt à un contrôle externe des bétons par un laboratoire (cf. Annexe F du FD P18-480).

10.1.3.8 Étape 8 : Validation par la MOE des systèmes d'assurance qualité

La maîtrise d'Œuvre valide les dispositions d'assurance qualité prévues par le producteur et de l'Entreprise, sur la base du FD P18-480, §4.5 pour l'approche performantielle, et les autres documents contractuels du projet.

Sur la base du dossier complet (étude, convenance, dispositions l'assurance qualité), et la validation de la MOE sur les différents points, la fourniture du béton peut commencer pour le projet.

Contrôle de production :

Cette formule est produite de façon discontinue. En plus des contrôles de production traditionnels de la norme NF EN 206+A2/CN (NB : hors famille élargie) et des exigences de la marque NF-BPE, la porosité accessible à l'eau et la résistivité électrique à 28 jours sont vérifiées tous les 500 m³ pendant la période initiale de 3 mois puis tous les 1 000 m³.

Au bout de deux ans, un prélèvement en production est effectué pour vérifier la vitesse de carbonatation, pour valider de nouveau la formule de béton.



10.1.4. Exemple n°4

Dans une unité de production BPE, un producteur de béton est sollicité pour la fabrication un béton de classe mécanique C40/50 pour un ouvrage agricole. La classe d'exposition XA3 est spécifiée, et la durée utile du projet est de 50 ans.

L'entreprise spécifie au producteur un Dmax de 22,4mm, et une consistance S3 pendant les deux heures après fabrication du béton en centrale (transport puis mise en place).

Le producteur de béton souhaite valoriser un sable et des gravillons locaux du producteur Dupond, mais qui présentent une absorption supérieure à celle exigée en XA3 (cf. NA.5.2.3.1 Généralités de la norme NF EN 206+A2/CN: 2025).

Le producteur de béton part sur une formule avec un ciment CEM V/A ES de classe mécanique 42,5 N du fournisseur DURAND, dosé à 385 kg/m³. Etant donné l'absorption trop élevée des granulats, il doit recourir à l'approche performantielle.

10.1.4.1 Étape préliminaire : Vérifier la possibilité de recourir à l'approche performantielle

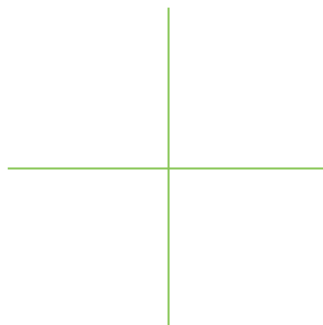
- Le producteur de béton peut bien recourir à l'approche performantielle, puisque les constituants prévus sont conformes à normes produits autorisées par la norme Béton NF EN 206+A2/CN.
- Le liant total est le ciment, dont la teneur prévue est de 385 kg/m³, ce qui est supérieur aux 300 kg/m³ nécessaires pour la classe d'exposition XA3 qui est visée.
- La teneur en clinker est supérieure à 15% du liant total, puisque le producteur recourt à un ciment CEM V/A, dont la teneur en clinker est d'au moins 40% selon la norme ciments courants NF EN 197-1.

10.1.4.2 Étape 1 : Obtenir l'accord des parties

L'approche performantielle n'est prévue au marché pour le béton visé. Le producteur de béton demande et obtient l'accord de l'entreprise et de celui de la maîtrise d'œuvre (MOE) via l'entreprise.

10.1.4.3 Étape 2 : Définir le niveau d'application

Le niveau d'application N2, préconisé par le FD P18-480 en classe d'exposition XA3 et pour une durée utile de projet de 50 ans, est confirmé par la MOE du projet.



10.1.4.4 Étape 3 : Réaliser l'étude en laboratoire

a) Vérification des compétences du laboratoire :

Le producteur de béton organise l'étude en laboratoire, avec le prestataire Z qui est accrédité COFRAC pour les essais de durabilité nécessaires à ce cas.

b) Étude de la formule nominale en laboratoire

Comme la nature du liant envisagé (ciment CEM V/A ES) est compatible avec la classe d'exposition XA3 (milieu acide, eaux pures), la grandeur de durabilité pour justifier la durabilité du béton peut être simplement le coefficient de diffusion aux ions chlorure du béton à tester. Le coefficient de diffusion du béton à qualifier doit être inférieur au coefficient mesuré pour un béton de référence répondant aux exigences de §4.3.5.1 et des tableaux 7 et 11 du FD P18-480. Dans notre cas, le béton de référence doit être formulé avec un ciment CEM V/A ES (qui peut être le même que celui du béton candidat), avoir un rapport Eau efficace / Ciment de 0,40, et avoir une fraction volumique de pâte et un squelette granulaire similaire à celui du béton candidat).

Note : Si la nature de liant du béton n'avait pas été compatible pour la classe d'exposition XA3 (milieu acide, eaux pures), la durabilité du béton doit être justifiée en pratiquant un test de lixiviation à pH acide constant selon la norme d'essai expérimental XP P 18-482, et en comparant le résultat du béton candidat avec celui d'un béton de référence selon §4.3.5.1 et des tableaux 7 et 10 du FD P18-480 (Eau efficace / Ciment = 0,40, avec fraction volumique de pâte et squelette granulaire similaire à celui du béton candidat).

Ci-dessous sont présentés les détails de l'étude du béton :

• Béton candidat pour le projet :

- Trois gâchées pour la formule nominale sont fabriquées,

- des cylindres 11x22 sont coulés pour les essais de résistance mécanique (2j et 28j), de porosité à l'eau (28j de cure) et de résistivité électrique (à 28 et 90 jours de cure).
- un cylindre 11x22 est fabriqué pour mesure la diffusion des ions de type chlorure avec un prélèvement d'une seule gâchée.
- la première gâchée sert aussi à vérifier la consistance et son maintien.

- Deux gâchées sont fabriquées pour les formules dérivées en eau ; le producteur choisit une variation de l'eau de gâchage de ± 10 l/m³.

- des cylindres 11x22 sont coulés pour les essais de résistance mécanique (28j).
- les gâchées servent aussi pour la vérification de la consistance visée.

- Un échantillon du ciment utilisé est prélevé le jour de l'étude, et testé sur mortier normalisé selon la norme NF EN 196-1 pour la mesure de CE.

- Le producteur demande également au producteur de ciment sur quelle valeur de Cmin il s'engage pendant la durée du projet (cf. ci-dessous).

• **Béton de référence** : Un cylindre 11x22 est fabriqué pour la mesure du coefficient de diffusion après 90 jours de cure.

Tous les cylindres de béton sont démoulés le lendemain de la fabrication et conservés sous eau à 20°C avant échéance d'essais. Pour les essais de durabilité, les corps d'épreuve sciés sont panachés, en les prélevant dans 3 cylindres différents, ceci pour chaque gâchée.

Les résultats obtenus sont les suivants :

• **Pour l'échantillon de ciment :**

CIMENT DE L'ÉTUDE : RÉSISTANCE MORTIER NF EN 196-1	
CE (mesuré) = 55 MPa	C_{min} (garantie fournisseur) = 45 MPa

• **Pour la formule nominale :**

(GÂCHÉE 1 - NOMINALE) TEMPS	10 MIN	30 MIN	90 MIN	120 MIN
Affaissement (mm)	150	150	140	120

Les valeurs d'affaissement confirment une consistance S3 pendant deux heures après fabrication du béton.

N° GÂCHÉE	1	2	3	MOYENNE	CRITÈRE D'ACCEPTATION	CALCULS
$f_{c(2j)}$	20 MPa	21 MPa	20 MPa	20,3 MPa	• Pas de critère. • Sert pour calculer $r = f_{c(2j)} / f_{c(28j)}$ qui informe de la montée en résistance.	
$f_{c(28j)}$	50 MPa	52 MPa	52 MPa	$f_{CE} = 51,3$ MPa	$\geq f_{ck} + \lambda(C_E - C_{min})$ $\geq f_{ck} + 2 \cdot S$	$51,3 \geq 40 + 1 \cdot (55 - 45) = 50$ MPa $51,3 \geq 40 + 2 \cdot 3 = 46$ MPa
$D_{rcm, 90j}$	-	5,0 m ² /s	-	5,0 * 10 ⁻¹² m ² /s	\leq Valeur mesurée pour béton de référence	$5,0 \leq 6,0 * 10^{-12}$ m ² /s
$D_{rcm, 90j}$ (béton de référence)	6,0 m ² /s	-	-	-	-	-
ρ_{28j}	180 Ohm*m	200 Ohm*m	200 Ohm*m	193,3 Ohm.m	Pas de critère d'acceptation en étude ; ces valeurs serviront pour l'acceptation du béton en convenue.	
$P_{eau, 28j}$	17%	18%	18,5%	17,8%		

• **La résistance mécanique en compression à 28 jours est de 51,3 MPa et répond aux deux exigences du §4.4.2.2.1 du FD P18-480.**

• **Grandeur de durabilité - Coefficient de diffusion des ions chlorure :**

- La valeur mesurée est 5,0 * 10⁻¹² m²/s pour le béton candidat, après 90 jours de cure humide ;
- La valeur mesurée pour le béton de référence est 6,0 * 10⁻¹² m²/s après 90 jours de cure humide. La valeur mesurée pour le béton candidat est donc

bien inférieure à celle du béton de référence. Le résultat est donc probant.

• **Les indicateurs de durabilité :**

- La porosité accessible à l'eau à 28 jours est 17,8% ;
- La résistivité électrique est de 193,3 Ohm*m. Ces valeurs serviront de référence pour l'épreuve de convenue et pour les contrôles en production.

• **Pour les formules dérivées en eau :**

GÂCHÉE DÉRIVÉE EAU -10 l/m ³	10 MIN	30 MIN	90 MIN	120 MIN
Affaissement (mm)	130	130	110	90

La classe de consistance S3 est validée jusqu'à 90 minutes après fabrication pour la dérivée en eau -10 l/m³. La valeur à deux heures (120 minutes) sort de l'exigence (ce qui est acceptable pour une dérivée), et est communiquée à l'Entreprise pour en tenir compte pour la mise en œuvre.

GÂCHÉE DÉRIVÉE EAU +10 l/m ³	10 MIN	30 MIN	90 MIN	120 MIN
Affaissement (mm)	150	140	140	130

La classe de consistance S4 est validée à 2 heures après fabrication pour la dérivée eau eau +10 l/m³.

GÂCHÉE DÉRIVÉES	DÉRIVÉE - 10 l/m ³	DÉRIVÉE + 10 l/m ³	CRITÈRE D'ACCEPTATION	CALCULS
f _c (28j)	58 MPa	46 MPa	f _{CE} ± 0,15 f _{CE}	58 MPa ≤ f _{CE} * (1+0,15) = 51,3 * 1,15 = 59 MPa 46 MPa ≥ f _{CE} * (1-0,15) = 51,3 * 0,85 = 45,1 MPa

• **Les résistances mécaniques en compression à 28 jours des deux dérivées sont comprises dans l'intervalle de la résistance nominale à plus ou moins 15% :**

Dérivée Eau -10 l/m³ : 58 MPa < f_{CE} * (1 + 0,15) = 51,3 * 1,15 = 59 MPa

Dérivée Eau +10 l/m³ : 46 MPa ≥ f_{CE} * (1 - 0,15) = 50,3 * 1,15 = 45,1 MPa

• **Grandeur de durabilité - Coefficient de diffusion :**

Il n'y a pas de critères pour la grandeur de durabilité en XA concernant les gâchées dérivées.

En conclusion, les résultats en étude pour la formule nominale et des deux formules dérivées en eau (-10 l/m³ et +10 l/m³) répondent aux exigences du FD P18-480.

10.1.4.5 Étape 4 : Validation de l'étude et de la fiche de synthèse

Le rapport d'étude du béton est transmis par le producteur de béton à l'Entreprise, qui le soumet pour appréciation à la Maîtrise d'Œuvre du projet, qui valide (ou non) la préqualification du béton envisagé, en s'appuyant sur les critères du FD P18-480, §4.4.2.2.

La fiche de synthèse est également transmise par le producteur de béton pour acceptation, sur la base du dossier d'étude :

APPELLATION NORMALISÉE	DÉROGATION VISÉE	NIVEAU D'APPLICATION	CLASSE(S) D'EXPOSITION	DUP
BPPS NF EN 206/CN C40/50 XA3(milieus acides, eaux pures)p D22,4 S3 Cl0,4	Granulats présentant une absorption élevée	N2	XA3(milieus acides, eaux pures)	50 ans
INDICATEURS DE DURABILITÉ GÉNÉRAUX	GRANDEUR ASSOCIÉE À LA DURABILITÉ RETENUE	LABORATOIRE		
% Porosité à l'eau et résistivité	Coefficient de diffusion de chlorure	Y		

10.1.4.6 Étape 5 : Épreuve de convenue avec l'entreprise

Les détails de l'épreuve de convenue sont décrits dans les paragraphes qui suivent.

Une épreuve de convenue est organisée par le producteur de béton et l'entreprise avec l'unité de production prévue et les équipements de transports, et de mise en œuvre.

Trois gâchées sont fabriquées en centrale et transférées dans un camion malaxeur mobilisé pour la convenue. Après homogénéisation, la consistance du béton frais est suivie sur deux heures :

TEMPS	10 MIN	30 MIN	90 MIN	120 MIN
Affaissement (mm)	150	140	140	120

Ici, la consistance S3 est validée pour deux heures après fabrication.

A la fin du suivi de maintien de consistance, des cylindres 11x22 sont coulés pour les essais nécessaires. Les cylindres sont protégés et récupérés le

lendemain pour être démoulés et conservés sous eau à 20°C.

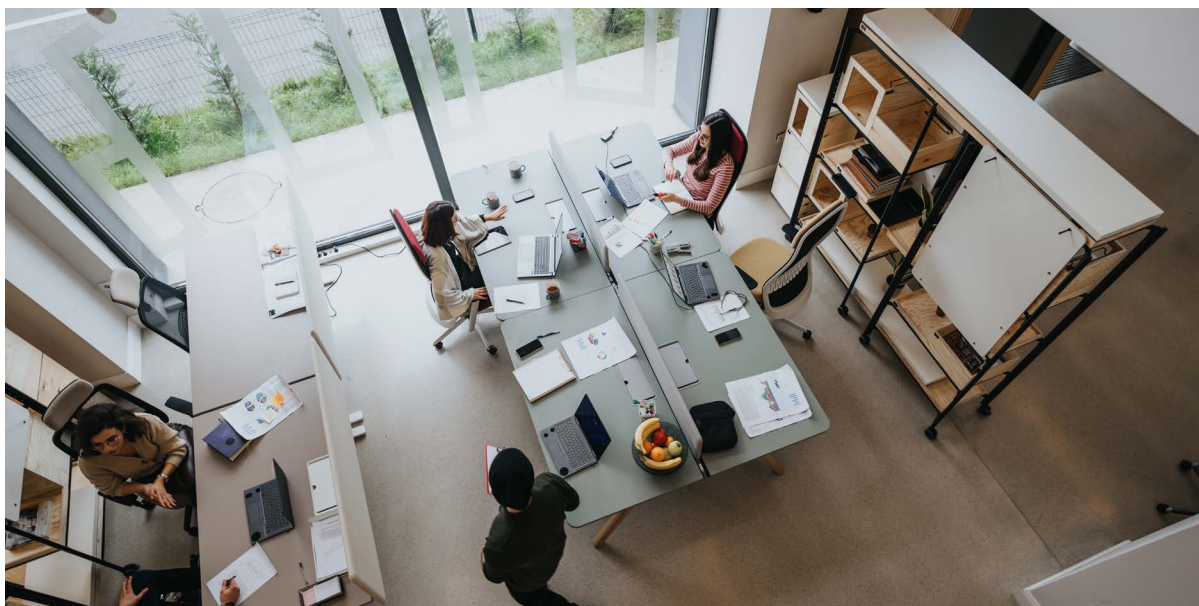
La valeur de CE mesurée pour le ciment utilisé le jour de la convenue est de 53 MPa. La valeur de Cmin du fournisseur était de 45 MPa.

Les valeurs mesurées après 28 jours de cure humide sont :

N° GÂCHÉE	MOYENNE	CRITÈRE D'ACCEPTATION	CALCULS
$f_{c(28j)}$	49 MPa	$\geq f_{ck} + \lambda(C_E - C_{min})$ $\geq f_{ck} + 2 \cdot S$	$49 \geq 40 + 1 \cdot (53 - 45) = 48 \text{ MPa}$ $49 \geq 40 + 2 \cdot 3 = 46 \text{ MPa}$
ρ_{28j}	180 Ohm*m	$\geq 0,8 \cdot \text{Valeur mesurée en étude}$	$180 \geq 0,8 \cdot 193,3 = 154,4 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$
$P_{\text{eau}, 28j}$	18,5%	$\leq 1,1 \cdot \text{Valeur mesurée en étude}$	$18,5\% \leq 1,1 \cdot 17,8 = 19,6\%$

10.1.4.7 Étape 6 : Validation convenue

Le rapport de l'épreuve de convenue du béton est soumis à appréciation à la Maîtrise d'Œuvre du projet, qui valide (ou non) la qualification du béton envisagé.



10.1.4.8 Étape 7 : Mise en place des systèmes d'assurance qualité

• Producteur de bétons :

- Il met en place les procédures permettant de garantir les précisions de pesée, la vérification de teneur en eau des granulats, le suivi de l'humidité et les autres exigences du §4.5.1 du FD P18-480, et les renseigne dans son Plan Qualité.
- Les contrôles de production qu'il prévoit sont les mêmes que ceux pour une production traditionnelle, avec en plus la vérification des indicateurs généraux de durabilité selon §4.4.4 FD P18-480.
- L'unité de production est détentrice de la marque NF-BPE. Elle justifie de fait d'un système qualité évalué par tierce partie. Dans le cas contraire, il aurait été nécessaire de mettre en place un contrôle externe (cf. § 4.5.1 du FD P 18-480).

• Pour l'entreprise de mise en œuvre :

- Elle doit disposer également d'un système de maîtrise de la qualité (cf. §4.5.2 du FD P18-480) décrivant les opérations clés.
- Etant donné le niveau d'application (N2), l'entreprise recourt à un contrôle externe des bétons par un laboratoire (cf. annexe F du FD P18-480).

10.1.4.9 Étape 8 : Validation par la MOE des systèmes d'assurance qualité

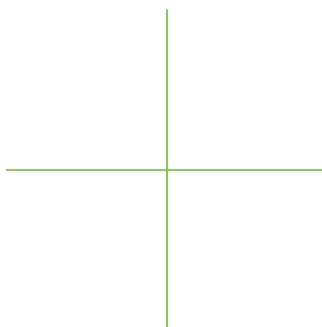
La maîtrise d'Œuvre valide les dispositions d'assurance qualité prévues par le producteur et de l'Entreprise, sur la base du FD P18-480, §4.5 pour l'approche performantielle, et les autres documents contractuels du projet.

Sur la base du dossier complet (étude, convenance, dispositions pour l'assurance qualité), et la validation de la MOE sur les différents points, la fourniture du béton peut commencer pour le projet.

Contrôle de production :

Cette formule est produite de façon discontinue. En plus des contrôles de production traditionnels de la norme NF EN 206+A2/CN (NB : hors famille élargie) et des exigences de la marque NF-BPE, la porosité accessible à l'eau et la résistivité électrique à 28 jours sont vérifiées tous les 500 m³ pendant la période initiale de 3 mois puis tous les 1 000 m³.

Au bout de deux ans, un prélèvement en production est effectué pour vérifier le coefficient de diffusion des ions chlorure en comparaison avec un béton de référence, pour valider de nouveau la formule de béton.



10.2. Approche par domaine de composition

10.2.1. Exemple n°1

Un producteur de BPE dispose de plusieurs centrales, avec un ciment CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N, d'addition laitier moulu de haut-fourneau de classe A et d'addition calcaire de catégorie A. Ses centrales disposent de granulats de catégorie A en absorption.

Il commande à son laboratoire central, qui est accrédité COFRAC pour les essais durabilité nécessaires, une étude générique afin de valider par approche performantielle le domaine de composition de bétons pouvant être formulés avec ces trois constituants pour des applications bâtiment, pour des planchers et des voiles en intérieur et extérieur.

La classe mécanique qu'il choisit pour l'étude générique (EG) est C25/30, la classe d'exposition XC4/XF1 et la consistance S3, pour des ouvrages de catégorie 2, DUP 50 ans.

La quantité de liant total visée est de 270 kg/m^3 et le rapport $E_{\text{eff}} / L_{\text{tot}}$ de 0,58 pour l'ensemble du domaine.

Les trois extrémités du domaine de composition visées sont :

- **270 kg/m^3 du ciment CEM II/B-M (S-LL) ;**
- **225 kg/m^3 de ciment CEM II/B-M (S-LL) et 45 kg/m^3 de laitier ;**
- **240 kg/m^3 du ciment CEM II/B-M (S-LL) et 30 kg/m^3 de l'addition calcaire.**

Le ciment utilisé est fourni par XYX, est certifié NF-Liants Hydrauliques, et la composition certifiée 70% (K), 20% (S) et 10% (LL). Le laitier est de classe A fourni par ZXZ et l'addition calcaire est de catégorie A et fournie par YZY.



10.2.1.1 Étape préliminaire – vérification de pouvoir recourir à l'approche performantielle

Le producteur vérifie que la composition de la formule envisagée lui permet bien de recourir au FD P 18-480, §5 :

• Constituants normalisés :

Tous les constituants du béton (ciment, addition, granulats, adjuvant, eau de malaxage) sont conformes aux normes des constituants autorisés par la norme Béton (§5.3.1.1 du FD P18-480 pour le détail).

• Vérification de la quantité de liant total selon FD P18-480 :

La quantité de liant total comprend le ciment seul, dont le dosage prévu est de 270 kg/m³, soit supérieure à la teneur minimale en liant total de 260 nécessaires en XC4/XF1 en approche performantielle.

• Vérification de la teneur minimale en clinker du liant total :

Le ciment prévu CEM II/B-M (S-L) est détenteur de la marque NF-Liant hydraulique. Le producteur de béton se réfère donc aux teneurs de clinker, laitier et calcaire déclarées par le fournisseur de ciment, qui sont respectivement de 70% (K), 20% (S) et 10% (LL) dans ce cas.

Pour vérifier la teneur minimum en clinker nécessaire pour l'approche, il considère l'extrémité du domaine avec la plus faible teneur en ciment. Dans ce cas, il s'agit du béton formulé avec 225 kg/m³ de ciment. Le ciment comprenant 70% de clinker, la teneur en clinker est donc $(225 * 70/100) / 270 = 58,3\%$; cette valeur est supérieure aux 25% minimum requis dans le cas de l'approche performantielle par domaine de composition.

• Vérification que les combinaisons prévues sont bien couvertes par les normes ciment :

Les liants totaux des bétons du domaine doivent correspondre à des compositions couvertes par une des normes ciment. Pour cela, on détermine la composition en termes de constituants "actifs" (clinker, laitier, calcaire dans notre cas) des liants totaux aux extrémités et au centre du domaine de composition des bétons visé.

Les extrémités sont numérotées de 1 à 3, et le centre à 4.

Liant total 1 : correspond au liant total du béton composé de ciment seul --> le liant total 1 est donc constitué de 100% du ciment CEM II/B-M (S-LL), soit 70% de clinker, 20% de laitier et 10% de calcaire -> couvert par la norme ciment NF EN 197-1.

Liant total 2 : correspond au liant total du béton formulé avec 225 kg/m³ du ciment CEM II/B-M (S-LL) et 45 kg/m³ de l'addition laitier ; la teneur en clinker du liant total 2 est égale à $(225 * 70/100) / 270 = 58,3\%$ de clinker, la teneur en laitier à $(225 * 20/100 + 45) / 270 = 33,3\%$ et la teneur en calcaire à $(225 * 10/100) / 270 = 8,3\%$. Cette composition correspond au type CEM II/C-M (S-LL) de la norme NF EN 197-5.

Liant total 3 : correspond au liant total du béton formulé avec 240 kg/m³ du ciment CEM II/B-M (S-LL) et 30 kg/m³ de l'addition calcaire ; la teneur en clinker du liant total 3 est égale à $(240 * 70/100) / 270 = 62,2\%$ de clinker, la teneur en laitier à $(240 * 20/100) / 270 = 17,8\%$ et la teneur en calcaire à $(240 * 10/100 + 30) / 270 = 20\%$. Cette composition correspond au type CEM II/C-M (S-LL) de la norme NF EN 197-5.

Liant total du centre 4 : la teneur en clinker, en laitier et en calcaire du liant total correspondant au barycentre des liants totaux 1, 2 et 3 sont calculées de la façon suivante :

$$\% \text{Clinker} = [\% \text{clinker (liant tot 1)} + \% \text{clinker (liant tot 2)} + \% \text{clinker (liant tot 3)}] / 3$$

$$\text{--> } \% \text{Clinker} = [70 + 58,3 + 62,2] / 3 = 63,5$$

$$\% \text{Laitier} = [\% \text{laitier (liant tot 1)} + \% \text{laitier (liant tot 2)} + \% \text{laitier (liant tot 3)}] / 3$$

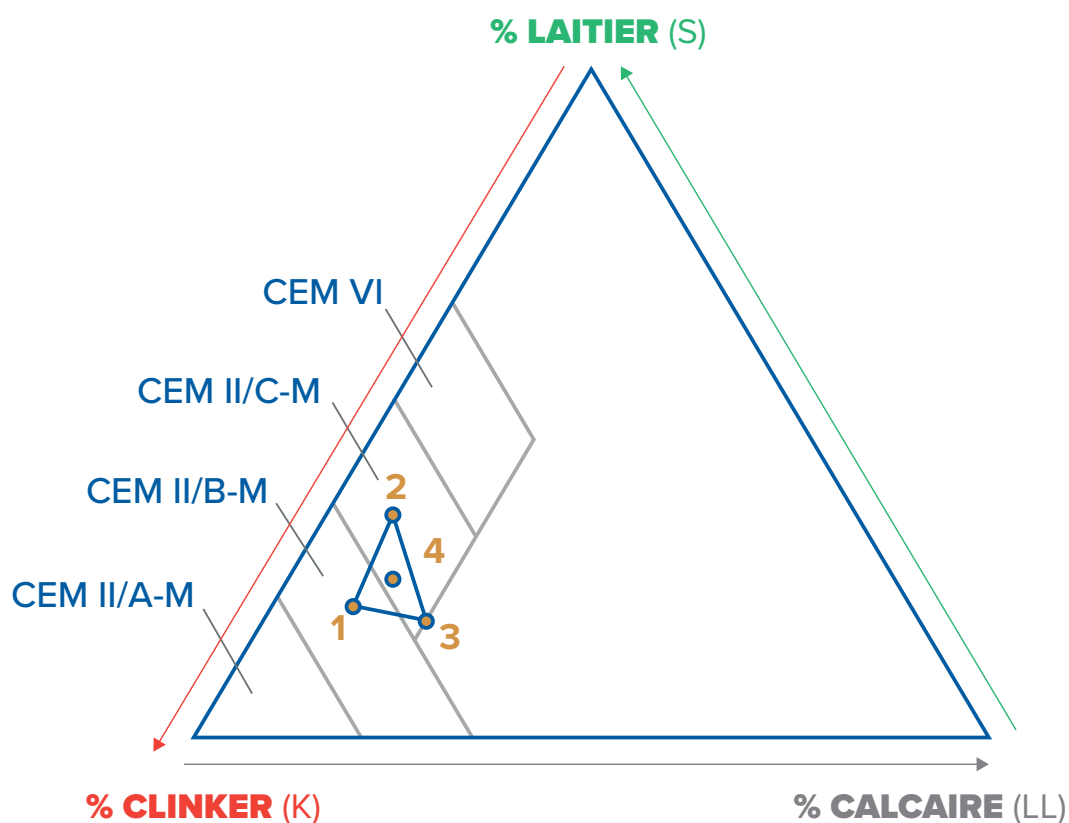
$$\text{--> } \% \text{Laitier} = [20 + 33,3 + 17,8] / 3 = 23,7$$

$$\% \text{Calcaire} = [\% \text{calcaire (liant tot 1)} + \% \text{calcaire (liant tot 2)} + \% \text{calcaire (liant tot 3)}] / 3$$

$$\text{--> } \% \text{Calcaire} = [10 + 8,3 + 20] / 3 = 12,8$$

Cette composition correspond au type CEM II/B-M (S-LL) de la norme NF EN 197-1.

Les 4 liants totaux sont positionnés dans un diagramme de composition triangulaire pour une meilleure visualisation⁸:



Le recours à l'approche performantielle par domaine de composition est donc bien possible.

Avant une production et une livraison pour le projet, les étapes sont donc les suivantes :



⁸ Diagramme ternaire réalisable avec des sites gratuits en ligne, comme par exemple Ternayplot.com.

10.2.1.2 Réalisation et validation de l'Etude Générique (EG)

Le producteur de béton missionne donc son laboratoire central pour la réalisation de l'étude générique (EG) du domaine qu'il a défini et le cahier des charges qu'il a fixé (C25/30 mini, consistance de béton frais S3, catégorie d'ouvrage 2 au maximum, classes d'exposition XC4, XF1).

Les granulats utilisés sont des silico-calcaire D_{max} 22,4 mm de code A, et le squelette granulaire des bétons est choisi afin de satisfaire le squelette granulaire indiqué au tableau 16 du FD P18-480.

Les bétons de l'étude générique à étudier sont les suivants :

DOSAGE EN KG/M ³	FOURNISSEUR	BÉTON AVEC LIANT TOTAL 1	BÉTON AVEC LIANT TOTAL 2	BÉTON AVEC LIANT TOTAL 3	BÉTON AVEC LIANT TOTAL 4 (*)
CEM II/B-M (S-LL)	XYX	270	225	240	244,9
Addition laitier	ZXZ	0	45	0	15
Addition calcaire	YZY	0	0	30	10,1
Gravillon 11/22,4		770	770	770	770
Gravillon 4/11		300	300	300	300
Sable 0/4		880	880	880	880
Superplastifiant		À caler	À caler	À caler	À caler
Eau efficace		157	157	157	157

* Les proportions de ciment et d'additions sont déterminées à partir des teneurs en clinker, laitier et calcaire du liant total 4 :

• **Teneur en ciment = (%clinker liant tot 4 * Teneur en liant total) / %clinker du ciment**

$$\text{Teneur en ciment} = (63,5 * 270) / 70 = 244,9 \text{ kg/m}^3$$

• **Teneur en addition laitier = (%laitier liant tot 4 * Teneur en liant total) - Teneur en ciment * %laitier du ciment**

$$\text{Teneur en laitier} = (23,7/100 * 270) - 244,9 * 20 / 100 = 15 \text{ kg/m}^3$$

• **Teneur en addition calcaire = (%calcaire liant tot 4 * Teneur en liant total) - Teneur en ciment * %calcaire du ciment**

$$\text{Teneur en calcaire} = (12,8/100 * 270) - 244,9 * 10 / 100 = 10,1 \text{ kg/m}^3$$

BÉTONS	BÉTON AVEC LIANT TOTAL 1	BÉTON AVEC LIANT TOTAL 2	BÉTON AVEC LIANT TOTAL 3	BÉTON AVEC LIANT TOTAL 4 (*)
Nombre de gâchées nominales	1 gâchée nominale	1 gâchée nominale	1 gâchée nominale	1 gâchée nominale et 2 gâchées dérivées en eau
Essais à réaliser sur les gâchées nominales	Consistance initiale du béton frais f_{c2j} , f_{c28j}^* $P_{\text{eau}28j}$ Résistivité _{28j} Résistivité _{90j} $V_{\text{acc}90j}$	Consistance initiale du béton frais f_{c2j} , f_{c28j}^* $P_{\text{eau}28j}$ Résistivité _{28j} Résistivité _{90j} $V_{\text{acc}90j}$	Consistance initiale du béton frais f_{c2j} , f_{c28j}^* $P_{\text{eau}28j}$ Résistivité _{28j} Résistivité _{90j} $V_{\text{acc}90j}$	Consistance initiale du béton frais (1 gâchée) f_{c2j} , f_{c28j}^* $P_{\text{eau}28j}$ Résistivité _{28j} Résistivité _{90j} $V_{\text{acc}90j}$
Gâchées dérivées	-	-	-	1 gâchée dérivée en eau (-10l/m ³) 1 gâchée dérivée en eau (+10l/m ³)
Essais sur les gâchées dérivées	-	-	-	Consistance béton frais f_{c28j}^* $V_{\text{acc}90j}$

* Mesure de la résistance en compression à 28 jours sur mortier selon NF EN 196-1 sur un échantillon du ciment utilisé pour l'étude (C_E).

Les critères d'acceptation pour les bétons sont les mêmes qu'en approche performantielle à composition unique, avec des critères pour les dérivées en eau pour le béton au centre du domaine.

Pour les formules nominales, cela revient à vérifier :

- **La consistance initiale du béton frais doit correspondre à S3 ;**

- **Résistance à la compression à 28 jours :**

$$f_{c28j} > f_{ck} + \lambda (C_E - C_{min}),$$

$f_{c28j} > f_{ck} + 2 \cdot \text{écart-type prévisionnel pour les résistances}$,

avec

l'écart-type prévisionnel pour les résistances supérieur ou égal à 3,

$f_{ck} = 25$ MPa dans notre cas,

C_E la résistance du ciment prélevé pour l'EG,

C_{min} la valeur sur laquelle s'engage le fournisseur de ciment.

- **Grandeur de durabilité :**

$Vacc_{90j} < \text{Seuil en XC4 pour DUP 50 ans (Tableau 3 du FD P18-480)} - 1,5 \cdot \text{écart-type prévisionnel}$,

avec

la valeur seuil modulée par la résistivité à 90 jours,

le coefficient de variance de l'écart-type prévisionnel supérieur à 20% (cas de l'essai de carbonatation).

Pour les gâchées dérivées du point central, les critères sont les mêmes que pour l'approche à composition unique :

- **$f_{c28j} \text{ (nominale)} \cdot 0,85 < f_{c28j} \text{ (dérivée)} < f_{c28j} \text{ (nominale)} \cdot 1,15$;**

- **$Vacc_{90j} \text{ (dérivée)} < \text{Seuil en XC4 pour DUP 50 ans (Tableau 3 du FD P18-480)}$.**

Dans l'immédiat, les conclusions et la validation de l'EG sont actées par le laboratoire, par un service indépendant de la réalisation des essais et du demandeur. Le producteur ayant ses centrales à la marque NF-BPE, l'organisme certificateur valide également le dossier de l'étude générique lors de l'audit.

Sur la base de cette étude générique validée, le producteur de béton prévoit de fournir deux sortes de bétons pour un projet de bâtiment, un C25/30 XC1d2 pour des planchers intérieurs, un C25/30 XC4d/XF1d2 pour des voiles extérieurs et un C30/37 XC4d2 pour des poteaux extérieurs, pour un projet de bâtiment (DUP 50 ans) en région parisienne. En effet, il peut formuler des bétons pour des classes mécaniques supérieures, et pour une classe d'exposition moins sévère (XC1 versus XC4/XF1 de l'EG). Ces bétons doivent être formulés avec le même ciment et les mêmes additions de l'EG (même produit de même fournisseur), avec des granulats éventuellement différents, mais avec un coefficient d'absorption inférieur ou égal (à 0,5 près), et un superplastifiant éventuellement différent. Les formules peuvent être éventuellement adaptées, en diminuant la quantité d'eau efficace définie dans l'Etude Générique (c'est-à-dire 157 l/m³ ou moins), en augmentant la quantité de liant total (270 kg/m³ et plus), et adaptant la teneur en adjuvant pour viser des consistances différentes (S3, S4 ou S5 dans notre cas). La nature du liant total doit rester dans le domaine couvert par l'EG, en termes de clinker, calcaire et laitier.

Avant la fourniture effective des bétons couverts par le domaine, il lui faut obtenir l'accord des parties, et réaliser une épreuve d'étude et de convenance au préalable pour le béton et l'application visés. Ces étapes sont détaillées ci-après :



10.2.1.3 Étape 1 : Obtenir l'accord des parties

Le producteur de béton obtient l'accord formel de l'Entreprise et, via l'Entreprise, celui de la Maîtrise d'Œuvre (MOE) pour des types de parties d'ouvrage et des bétons précisés.

10.2.1.4 Étape 2 : Définir la catégorie d'ouvrage, DUP

Les catégories d'ouvrages possibles sont 1 et 2, pour une durée utile de projet de 50 ans, confirmées par la MOE de chaque projet.

10.2.1.5 Étape 3 : Réaliser l'étude en laboratoire

a) Vérification des compétences du laboratoire :

Le producteur de béton sous-traite de nouveau les essais à son laboratoire central, qui est accrédité COFRAC pour les essais de durabilité prévus.

b) Étude de la formule nominale en laboratoire :

Pour chaque formule nominale prévue, le producteur de béton organise l'étude en laboratoire :

• Nominale : Une gâchée est fabriquée :

- Des cylindres 11x22 sont coulés pour les essais de résistance mécanique (2j et 28j), de porosité à l'eau (28j de cure) et de résistivité électrique (à 28 et 90 jours de cure).

- La gâchée sert aussi à vérifier la consistance et son maintien.

• Dérivées en eau : Une gâchée est fabriquée par dérivée en eau ; le producteur choisit une variation de l'eau de gâchage de ± 10 l/m³ :

- Des cylindres 11x22 sont coulés pour les essais de résistance mécanique (28j).

- Les gâchées servent aussi pour la vérification de la consistance visée.

• Un échantillon du ciment utilisé est prélevé le jour de l'étude, et testé sur mortier normalisé selon la norme NF EN 196-1 pour la mesure de C_E.

• Le producteur dispose déjà de la valeur de C_{min} de l'EG (il peut lui redemander sur la période sur laquelle il s'était engagé est révolue).

Les cylindres de béton sont démoulés le lendemain de la fabrication et conservés sous eau à 20°C avant échéance d'essais. Pour les indicateurs de durabilité (porosité et résistivité), les corps d'épreuve sciés sont panachés, en les prélevant dans 3 cylindres différents, ceci pour chaque gâchée.

c) Les critères d'acceptation pour l'étude du béton à mettre en œuvre sont les suivants :

POUR LA FORMULE NOMINALE :

• Vérification de la consistance du béton frais pour la durée pratique d'utilisation et la consistance spécifiée du projet (S3, S4 ou S5 dans notre cas).

• Résistance à la compression à 28 jours :

$f_{c_{28j}} > f_{ck} + \lambda (C_E - C_{min})$, $\lambda = 1$ généralement

$f_{c_{28j}} > f_{ck} + 2 \cdot \text{écart-type prévisionnel pour la distribution des résistances} (>3)$,

avec

$f_{ck} = 25$ MPa ou plus, selon le cas,

C_E la résistance du ciment prélevé pour l'étude,

C_{min} la valeur sur laquelle s'engage le fournisseur de ciment.

• Indicateurs généraux de durabilité :

$P_{eau(étude)_{28j}} \leq 1,1 \cdot P_{eau, max}(EG)_{28j}$,

avec $P_{eau, max}(EG)_{28j}$, la valeur de porosité maximale mesurée pour les bétons de l'étude générique,

$Résistivité(étude)_{28j} > 0,8 \cdot Résistivité_{min}(EG)_{28j}$,

avec $Résistivité_{min}(EG)_{28j}$, la résistivité minimale mesurée pour les bétons de l'étude générique.

POUR LES FORMULES DÉRIVÉES :

Résistance à la compression à 28 jours :

• Les résultats des essais de résistance à la compression à 28 jours sont compris dans la fourchette $f_{cE} \pm 0,15 f_{cE}$ de la nominale correspondante ;

Indicateurs généraux de durabilité :

• En ce qui concerne les indicateurs généraux, les valeurs mesurées sur les dérivées et la nominale doivent être positionnées dans un ordre cohérent par rapport à l'impact attendu des dérivées sur les valeurs des indicateurs généraux.

10.2.1.6 Étape 4 : Validation de l'étude et de la fiche de synthèse

Le rapport d'étude des bétons à mettre en œuvre est transmis par le producteur de béton à l'entreprise, qui le soumet pour appréciation à la maîtrise d'œuvre du projet, qui valide (ou non) la préqualification du béton envisagé, en s'appuyant sur les critères du FD P18-480, §5.5.

La fiche de synthèse de chaque béton est également transmise par le producteur de béton pour acceptation, sur la base du dossier d'étude.

EXEMPLE POUR LE C25/30 POUR VOILES EXTÉRIEURS :

APPELLATION NORMALISÉE	DÉROGATION VISÉE	NIVEAU D'APPLICATION	CLASSE(S) D'EXPOSITION	DUP
BPPS NF EN 206/CN C25/30 XC4d/XF1d2 D22,4 S3 Cl0,4	Teneur en liant équivalent	Cat 2	XC4/XF1	50 ans
INDICATEURS DE DURABILITÉ GÉNÉRAUX	GRANDEUR ASSOCIÉE À LA DURABILITÉ RETENUE	LABORATOIRE		
% Porosité à l'eau et résistivité	Jointe	X		

10.2.1.7. Étape 5 : Épreuve de convenance avec l'entreprise

Pour chaque béton, une épreuve de convenance est organisée par le producteur de béton et l'entreprise avec l'unité de production prévue et les équipements de transports, et de mise en œuvre. Le producteur, en accord avec l'entreprise, organise les trois convenances le même jour.

Pour chaque béton, trois gâchées sont fabriquées en centrale et transférées dans un camion malaxeur mobilisé pour la convenance. Après homogénéisation, la consistance du béton frais est suivie pour la durée pratique d'utilisation. A la fin du suivi de maintien de consistance, des cylindres 11x22 sont coulés pour les essais nécessaires (résistance mécanique, porosité à l'eau, résistivité). Les cylindres sont protégés et récupérés le lendemain pour être démoulés et conservés sous eau à 20°C pendant 27 jours.

Les critères à vérifier sont les suivants :

- **Consistance du béton frais à la cible,**
- **Résistance mécanique :**

$$f_{CE} \geq f_{ck} + \lambda * (C_E - C_{min}), \text{ avec } \lambda = 1$$

$$f_{CE} \geq f_{ck} + 2 * \text{écart-type prévisionnel de la distribution des résistances } (>3).$$

- **Indicateurs généraux de durabilité :**

$$P_{\text{eau}}(\text{étude})_{28j} \leq 1,1 * P_{\text{eau, max}}(\text{EG})_{28j}, \text{ avec } P_{\text{eau, max}}(\text{EG})_{28j}, \text{ la valeur de porosité maximale mesurée pour les bétons de l'étude générique,}$$

$$\text{Résistivité } (\text{étude})_{28j} > 0,8 * \text{Résistivité}_{\text{min}}(\text{EG})_{28j},$$

avec Résistivité min(EG)28j, la résistivité minimale mesurée pour les bétons de l'étude générique.

10.2.1.8. Étape 6 : Validation de la convenance

Le rapport de l'épreuve de convenance du béton est soumis à appréciation de la maîtrise d'œuvre du projet, qui valide (ou non) la qualification du béton envisagé.

10.2.1.9. Étape 7 : Mise en place des systèmes d'assurance qualité

Le producteur de béton met en place les procédures permettant de garantir les précisions de pesée, vérification de teneur en eau des granulats, suivi de l'humidité et autres exigences du §4.5.1 du FD P18-480, et les renseigne dans son plan qualité.

Les contrôles de production qu'il prévoit sont les mêmes que ceux pour une production traditionnelle, avec en plus la vérification des indicateurs généraux de durabilité selon §4.4.4 FD P18-480.

Étant donné que son unité de production est détentrice de la marque NF-BPE, cela lui permet de bénéficier d'un système qualité évalué par tierce partie.

L'Entreprise dispose également d'un système de maîtrise de la qualité selon §4.5.2 du FD P18-480 décrivant les opérations clés.

Étant donné la catégorie de l'ouvrage (2), l'entreprise recourt à un contrôle externe des bétons à un laboratoire.

10.2.1.10. Étape 8 : Validation par la MOE des systèmes d'assurance qualité

La Maîtrise d'Œuvre (MOE) valide les dispositions d'assurance qualité prévues par le producteur et de l'entreprise, sur la base du FD P18-480, §4.5 pour l'approche performantielle, et les autres documents contractuels du projet.

Sur la base du dossier complet (étude, convenance, dispositions pour l'assurance qualité), et la validation de la MOE sur les différents points, la fourniture du béton peut commencer pour le projet.

Contrôle de production :

Cette formule est produite de façon discontinue. En plus des contrôles de production traditionnels de la norme NF EN 206+A2/CN (NB : hors famille élargie), et des exigences de la marque NF-BPE, la porosité accessible à l'eau et la résistivité électrique à 28 jours sont vérifiées tous les 500 m³ pendant la période initiale de 3 mois puis tous les 1 000 m³.



ANNEXE

A

**Facteur de
vieillessement**



ANNEXE A. Facteur de vieillissement

A1. Définition

D'après l'article 3.1.1 du FD P 18-480, le **facteur de vieillissement** est défini comme un paramètre décrivant la diminution du coefficient de diffusion apparent des ions chlorure dans le béton en fonction du temps. Le facteur de vieillissement est aussi appelé « **ageing factor** » selon la terminologie anglaise.

Le facteur de vieillissement est un paramètre utilisé dans l'approche performantielle pour tenir compte du fait qu'un béton n'évolue pas de façon identique entre un essai au jeune âge et son comportement réel sur une longue durée. Il sert donc à relier des résultats d'essais accélérés ou précoces à la performance attendue de l'ouvrage dans le temps.

À ce jour, et dans l'attente d'une méthode expérimentale reconnue pour la détermination du facteur de vieillissement α , sa valeur est déduite de la composition du liant total pour la formule de béton considérée :

$$\alpha = 0,3 + \min(0,2 S ; 0,15) + \min(1,1 V ; 0,30) + \min(1,1 D ; 0,10) + \min(1,1 MK ; 0,10)$$

où

S est la fraction massique de laitier moulu ;

V est la fraction massique de cendres volantes ;

D est la fraction massique de fumée de silice ;

MK est la fraction massique de métakaolin de type A.

(Les fractions massiques ci-avant sont rapportées à la masse cumulée du(des) ciment(s), du laitier moulu, des cendres volantes, de la fumée de silice et du métakaolin.)

Note : À l'heure actuelle, le manque de données ne permet pas d'intégrer d'autres additions ou constituants principaux du ciment dans le calcul du facteur de vieillissement.

A2. Le concept

Dans l'approche performantielle, on ne se contente pas de prescriptions de formulation comme le dosage minimal en liant ; on cherche à prédire la durabilité réelle du matériau à partir de ses performances mesurées et de son évolution au cours du temps.

Le facteur de vieillissement intervient parce que les propriétés mesurées tôt peuvent être différentes de celles du béton après maturation, cure, hydratation continue et exposition environnementale. Il convient en effet de prendre en compte l'évolution significative de la microstructure à long terme en présence d'ajouts cimentaires ou d'additions telles que le laitier de haut-fourneau, les cendres volantes siliceuses, le métakaolin. L'expérience montre que le coefficient

de diffusion de tels bétons diminue dans le temps au-delà de 90 jours, tant que l'hydratation peut se poursuivre.

Ce facteur de vieillissement permet notamment de :

- extrapoler des essais réalisés à court terme vers un comportement à long terme ;
- mieux comparer des bétons dont l'évolution dans le temps n'est pas la même ;
- ajuster les seuils de performance pour estimer la durabilité réelle d'un ouvrage.

Autrement dit, c'est une façon de corriger le "décalage" entre ce qu'on mesure en laboratoire et ce qui se passe dans la structure en service.

A3.L'utilisation dans le FD P 18-480

Pour les classes XS et XD, dans la mesure où le facteur de vieillissement du béton intervient dans le temps d'initiation de la corrosion, une modulation des seuils pour les différentes classes d'exposition est introduite, les seuils de performance sont définis

sur la base de valeurs caractéristiques maximales de coefficient de migration, définis dans le Tableau 5 selon le facteur de vieillissement (ageing factor).

Ci-dessous un extrait du tableau 5 du FD P 18-480

Extrait du tableau 5 du FD P 18-480

Seuils de performance (DUP 50 ans et 100 ans)*

CLASSE D'EXPOSITION	MODULATION SELON LA CLASSE DE FACTEUR DE VIEILLISSEMENT	COEFFICIENT CARACTÉRIQUE DE MIGRATION DES IONS CHLORURE SELON XP P 18-462 $D_{rcm, k, 90j}$ ($\times 10^{-12} m^2/s$)	
		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		

* 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.



s n b p e @ s n b p e . o r g

16 bis boulevard Jean Jaurès
92110 CLICHY

Tél : +33 1 44 01 47 01