

13 novembre 2012 à Metz

Concevoir, construire et gérer des structures durables en béton : approche performantielle et évolutions normatives

Le 13 novembre, le CETE de l'Est, dans le cadre de la COTITA Est, CIMbéton, le SNBPE et l'AFGC ont organisé conjointement la journée technique.

Depuis quelques années, d'importants travaux de recherche sont consacrés au développement d'une nouvelle approche de la durabilité, afin d'accroître la durée de vie des structures en béton armé.

Une telle approche dite «approche performantielle» a été développée dans le cadre d'un groupe de travail de l'Association Française de Génie Civil (AFGC). Elle est basée sur des propriétés fondamentales du matériau, les indicateurs de durabilité, et sur la spécification de critères performantiels associés à ces indicateurs. Elle fait l'objet d'un guide d'application pour les ouvrages neufs sous l'égide de l'IFSTTAR afin de faciliter sa mise en oeuvre, en cohérence avec le cadre normatif européen.

Rappel du programme de la journée

8h30 : Accueil des participants

9h00 : Ouverture de la journée

Hervé MANGNAN - Directeur du CETE de l'Est
Intérêts et enjeux de l'approche performantielle

Pierre CORFDIR - Président de la délégation AFGC Grand Est

9h30 : Mécanisme de dégradation des ouvrages en béton

- Principales agressions et attaques des bétons

Philippe VALLIN - CETE de l'Est

9h50 : Evolutions normatives

- Normes de dimensionnement : les Eurocodes béton

Fabien RENAUDIN - CETE de l'Est

- Durée d'utilisation de projet et classes d'exposition

Patrick GUIRAUD - Cimbéton

- Enrobage des armatures

Damien CHAMPENOY - CETE de l'Est

- Normes béton : NF EN 206-1, NF EN 206-9

Michel GEORGE - SNBPE

- Normes d'exécution des ouvrages en béton : NF EN 13670

Paul ALLEGRE - CETE de l'Est

- Révision du fascicule 65 du CCTG : Les nouvelles clauses relatives à l'approche performantielle

Eric OLLINGER - SETRA

11h45 Pause

12h00 : Approche performantielle

- Positionnement de l'approche performantielle dans le contexte normatif Français et Européen

Patrick GUIRAUD - Cimbéton

- Approche performantielle fondée sur les indicateurs de durabilité

Véronique BAROGHEL-BOUNY - IFSTTAR

- Rôle du maître d'ouvrage

Pierre CORFDIR - DIR EST

13h15 Déjeuner

14h30 : Présentation et application du guide technique LCPC "Approche performantielle"

- Démarche générale, principes et limites

Bruno GODART - IFSTTAR

- Recommandations pour la rédaction des CCTP

Davy PRYBYLA - CETE de l'Est

- Retour d'expérience du viaduc de Volesvres

Rémy CHARPENTIER - SNBPE

- Indicateurs de durabilité : essais et seuils

Paul ALLEGRE - CETE de l'Est

- Epreuves de convenance, contrôles et jugement de la conformité - Cas du viaduc de Volesvres

Christophe AUBAGNAC - CETE de Lyon

- Evaluation de la durée de vie résiduelle d'un ouvrage en service

Davy PRYBYLA - CETE de l'Est

16h45 : Synthèse et perspectives

- Perspectives de développement de l'approche performantielle

Christian LEFEBVRE - CG Moselle

- Synthèse et conclusion

Pierre CORFDIR - DIR EST



Intérêts et enjeux de l'approche performantielle

Pierre CORFDIR - Président de la délégation AFGC Grand Est

Objectifs de la journée : faire le point

Le béton : un monde en pleine évolution

→ faire un panorama du contexte normatif et réglementaire

- Révision de l'annexe nationale de la norme NF EN 206-1.
- Révision du Fascicule 65.
- NF EN 13670 et son annexe nationale (à paraître) qui va « remplacer » une partie du fascicule 65.

Le béton : un matériau qui devient adulte

→ Montrer les bases et la méthode de l'approche performantielle des bétons.

Les limites des pratiques actuelles

D'énormes progrès :

- 1) une large palette de bétons (BAP, BHP, BFUP).
- 2) un référentiel de prescription qui va vers des commandes en performance (classes d'exposition).

Mais...

- 1) Quelle garantie réelle de durabilité ?
- 2) Le béton est devenu très / trop(?) complexe pour un maître d'ouvrage.
- 3) L'approche prescriptive actuelle demeure délicate (18 classes d'exposition mais comment gérer les priorités ?).

L'approche performantielle

Evolution majeure dans la prescription des bétons :

- Elle repose sur des performances vraies mesurées par des indicateurs de durabilité.
- Elle est l'aboutissement d'une amélioration continue pour ce matériau depuis une trentaine d'années.

Contexte Scientifique

Des études très importantes appuient cette approche

- Propriétés de transfert des agents agressifs dans le béton.
- Microfissuration.
- Modes opératoires partagés et reproductibles des principaux essais de caractérisation.
- Modèle numérique de vieillissement, ...

Groupe de travail AFGC « conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages. »

Et maintenant...

La gestion de la durabilité devient possible...

Spécifier une durée de vie avec l'approche performantielle (spécifications des bétons pour une durée de vie attendue dans un environnement donné...).

Suivre le vieillissement réel de la structure

Les manifestations régionales

- possibilité pour le MOA d'agir avant l'apparition de désordres (maintenance préventive).
- durée de vie résiduelle d'une structure : élément de décision important pour un MOA : réparation ou reconstruction.

Principales agressions et attaques des bétons

Davy PRYBYLA, Philippe VALLIN - CETE de l'Est

INTRODUCTION

Un béton peut s'altérer après quelques années ou quelques dizaines d'années.

Dans ce cas les altérations sont soit liées à des problèmes de structure, soit à un vieillissement du béton ou encore à une agression de l'environnement. Elles concernent la matrice cimentaire ou les armatures.

LES MÉCANISMES DE DÉGRADATION

- La corrosion des armatures
- Les attaques sulfatiques
- L'alcali-réaction
- Les cycles de gel / dégel
- La lixiviation

STRUCTURE et PROPRIÉTÉS DU BETON

Constituants :

- Le squelette : Granulats
- La matrice cimentaire : Ciment, Eau, Sable
- L'armature en acier

Propriétés du béton armé

- La résistance mécanique
- Esthétisme et qualité du parement
- Durabilité (propriétés de transfert)
 - porosité
 - fissuration

L'environnement béton armé

- Exposition (gel, saumure, eaux agressives, ...)
- Sollicitations mécaniques (charges, ...)

LA CORROSION DES ARMATURES

Les origines de la corrosion

- Pénétration des ions chlorures dans l'enrobage
- Carbonatation du béton d'enrobage
 - Enrobage = protection des armatures
- Phénomène plus ou moins rapide selon les propriétés du béton d'enrobage : porosité, compacité, fissuration

La corrosion comporte deux phases.

- Première phase : l'incubation

Les éléments agressifs pénètrent dans le béton. C'est le stade d'incubation.

- Seconde phase : la propagation

Lorsque ces corps agressifs se trouvent à des concentrations assez fortes au niveau des armatures.

Elle correspond à la croissance de la rouille, qui peut ensuite faire éclater le béton d'enrobage.

Les agents agressifs les plus fréquents sont les eaux pures, les chlorures dans l'eau et le dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère.

Origines de la corrosion

Le CO₂ peut être dissous par la solution interstitielle du béton, et réagir avec certains composés calciques pour former des carbonates (carbonatation). Il en résulte une baisse du pH de la solution interstitielle du béton (de 12 à 9).

La pénétration du dioxyde de carbone dans le béton est un phénomène de diffusion. Elle est rapide lorsque le béton est assez sec. Mais la réaction de carbonatation n'a lieu que s'il reste de la solution interstitielle dans le béton. C'est pourquoi, les conditions les plus favorables à la pénétration du dioxyde de carbone correspondent à une alternance d'humidité et de séchage.

La carbonatation

Réaction de carbonatation : mécanisme

Chaux + CO₂ -> Calcaire + eau

Pénétration du CO₂ dans le béton -> transformation de la portlandite en carbonates de calcium : Ca(OH)₂ + CO₂ -> CaCO₃ + H₂O

Le béton, qui était basique, devient plus acide : les armatures se corrodent

La pénétration des chlorures

La pénétration est généralement favorisée par le béton qui est :

- fissuré,
- mal mis en oeuvre,
- pas suffisamment compact (adéquation de la formulation à l'environnement).

La pénétration des chlorures nécessite de l'eau.

Les ions chlorures pénètrent dans le béton par diffusion ou absorption capillaire.

Les produits de corrosion, d'un volume plus important, font fissurer puis éclater le béton.

RÉACTIONS ET ATTAQUES SULFATIQUES

Attaque sulfatique externe:

> L'expansion est provoquée par la croissance des aiguilles d'ettringite.

> l'expansion se traduit par une fissuration et un éclatement superficiel du béton.

> les fissures facilitent la pénétration des agents agressifs et accélèrent le processus de dégradation.

ALCALI REACTION

Réactions qui peuvent se produire entre les granulats du béton et les alcalins de la pâte de ciment.

Trois conditions doivent être simultanément remplies :

- granulats potentiellement réactifs,

Les manifestations régionales

- présence d'eau,
- concentration en alcalins supérieur à un seuil critique.

Trois grands types d'alcali-réactions : réactions alcali-carbonate, alcali-silice et alcali-silicate. La réaction la plus fréquente est la réaction alcali-silice.

GEL INTERNE

Nécessité de réduire la distance de déplacement de l'eau non gelée pour limiter les pressions dans le béton

=> Incorporation d'un adjuvant entraîneur d'air dans le béton frais

=> Réseau de bulles d'air

ECAILLAGE

Action du sel en surface :

- diffusion des chlorures

=>gradient de concentration ?

=>attaques chimiques ?

- contact fondants/glace

=>chocs thermiques ?

LIXIVIATION

La lixiviation est la mise en solution de certains constituants du béton. Par exemple, la chaux est dissoute selon la réaction : Ca(OH)₂ > Ca²⁺ + 2 OH⁻.

Il peut se produire un phénomène d'entraînement visible de constituants du béton vers l'extérieur (suintement, efflorescence, fuite de laitance, stalactites...)

CONCLUSION

Avec toutes ces pathologies, le béton semble « fragile »!

En vérité, il est assez simple de se prémunir de ces agressions : le béton reste un matériau durable.

Normes de dimensionnement : les Eurocodes béton

Fabien RENAUDIN - CETE de l'Est

LES EUROCODES

Les EUROCODES définissent des exigences fondamentales pour atteindre les « exigences essentielles » que sont :

- la sécurité structurale pour les personnes, les animaux domestiques...
- l'aptitude au service, fonctionnement, confort...
- la robustesse en cas de situations accidentelles
- la durabilité, compte tenu des conditions environnementales
- l'usage raisonné des ressources

La référence aux Eurocodes en tant que règles techniques de justification de la fiabilité des ouvrages est obligatoire pour les marchés publics depuis avril 2010.

CES NORMES SUPPOSENT QUE :

- le choix du système structural et le projet de structure sont réalisés par un personnel suffisamment qualifié et expérimenté;
- l'exécution est confiée à un personnel suffisamment compétent et expérimenté;
- une surveillance et une maîtrise de la qualité adéquates sont assurées au cours du travail, à savoir dans les bureaux d'études, les usines, les entreprises et sur le chantier;
- les matériaux utilisés sont conformes aux normes appropriées;
- la structure bénéficiera de la maintenance adéquate;
- l'utilisation de la structure sera conforme aux hypothèses admises dans le projet.

LA COLLECTION DES EUROCODES

EN 1990 - Eurocode 0 : Bases de calcul des structures
EN 1991 - Eurocode 1 : Actions sur les structures
EN 1992 - Eurocode 2 : Calcul des structures en béton
EN 1993 - Eurocode 3 : Calcul des structures en acier
EN 1994 - Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier-béton
EN 1995 - Eurocode 5 : Calcul des structures en bois
EN 1996 - Eurocode 6 : Calcul des structures en maçonnerie
EN 1997 - Eurocode 7 : Calcul géotechnique
EN 1998 - Eurocode 8 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes
EN 1999 - Eurocode 9 : Calcul des structures en alliages d'aluminium

LES EUROCODES POUR LA CONCEPTION D'UN PONT EN BETON

EN 1990 – Bases de calcul des structures
EN 1991– Actions sur les Structures
EN 1992– Calcul des structures en béton
EN 1997– Calcul Géotechnique
EN 1998– Calcul des structures pour leur résistance aux séismes

Plan de l'Eurocode 2 et contenu des « sections »

1. Généralités. Domaine d'application du Code, références normatives, hypothèses de conception, calcul, exécution et maintenance de la structure, distinction entre Principes et Règles d'application, Définitions et Symboles.
2. Bases de calcul. Références aux EN 1990 et 1991. Prise en compte des effets thermiques, des tassements différentiels, de la précontrainte, du

Les manifestations régionales

retrait et du fluage, valeurs des γ spécifiques aux matériaux.

3. Matériaux. Propriétés du béton, modèles de calcul ; propriétés des armatures de béton armé et de béton précontraint.

4. Durabilité et Enrobage des armatures. L'environnement de la structure pour sa conception vis-à-vis de la durabilité et « durée d'utilisation de projet ». Détermination de l'enrobage.

5. Analyse structurale. Modélisation géométrique de la structure et méthodes de détermination des sollicitations, déformations et déplacements

6. États Limites Ultimes. Résistance en flexion. Calcul de la résistance à l'effort tranchant par une méthode de bielles d'inclinaison variable, Torsion, Poinçonnement, Analyses par bielles et tirants. Fatigue.

7. États Limites de Service. Limitation des contraintes. Maîtrise de la fissuration (ouverture limite de fissure en fonction du type de structure et de l'environnement et méthodes d'obtention : ferrailage minimum, méthode forfaitaire, calcul d'ouverture). Limitation des flèches.

8. Dispositions constructives relatives aux armatures de BA et BP. Espacement des barres, ancrage et adhérence, crochets normalisés, recouvrement et coutures, barres en paquets

9. Dispositions constructives relatives aux éléments et règles particulières. Définition des pourcentages mini d'armatures selon type d'éléments

10. Règles additionnelles pour les éléments et les structures préfabriquées. Effets des traitements thermiques et ces effets sur la résistance, le fluage et le retrait du béton et sur la relaxation de l'acier de précontrainte. Règles particulières de conception et dispositions constructives pour les jonctions.

11. Structures en béton de granulats légers.

12. Structures en béton non armé ou faiblement armé

ANNEXES

A (Informative) : Modification des coefficients partiels relatifs aux matériaux

B (Informative) : Déformations dues au fluage et au retrait

C (Normative) : Propriétés des armatures compatibles avec l'utilisation de cet Eurocode

D (Informative) : Méthode de calcul détaillée des pertes de précontrainte par relaxation

E (Informative) : Classes indicatives de résistance pour la durabilité

F (Informative) : Expressions pour le calcul des armatures tendues dans les situations de contraintes planes

G (Informative) : Interaction sol-structure

H (Informative) : Effets globaux du second ordre sur les structures

I (Informative) : Analyse des planchers-dalles et des voiles de contreventement

J (Informative) : Dispositions constructives pour des cas particuliers

Partie ponts (EN 1992-2) - Compléments principaux

Section 3. Classes de résistance adaptées

Section 4. Des précisions sur les classes d'exposition à retenir

Section 5. Précision des conditions d'application des méthodes de calcul non linéaires des calculs d'instabilité et des méthodes linéaires avec redistribution

Section 6.

- Prévention de la rupture fragile pour le béton précontraint
- Précisions sur les vérifications d'effort tranchant et de torsion
- Compléments sur les vérifications en fatigue
- Eléments de membrane

Section 7. Modification des valeurs cibles de maîtrise de la fissuration

Section 8. Dispositions constructives complémentaires pour la précontrainte (coupleurs)

Section 113. Calcul des phases d'exécution : généralités, actions en cours d'exécution, critères de vérification

Annexes nationales - NF EN 1992-1-1 NA

Principales clauses développées ou avec fort écart vis-à-vis des valeurs recommandées

Section 2 : précisions sur prise en compte du retrait dans les bâtiments

Section 3 : attention attirée sur la valeur du module du béton et la justification ELS nécessaire lorsqu'on utilise des aciers HLE de $f_{yk} = 600$ MPa

Section 4 : très nombreuses et importantes précisions pour le choix des classes d'exposition et les modulations permettant de déterminer l'enrobage

Section 5 : modifications de coefficients liés à la force de précontrainte (tension des câbles à un niveau élevé dans la pratique française)

Section 6 : modification du cisaillement résistant dans les dalles sous effort tranchant avec redistribution – précision sur le calcul en fatigue (résistance des armatures)

Section 7 : ouvertures limites des fissures et précisions sur la méthode de calcul – tableau des élancements types permettant de se dispenser du calcul des flèches

Section 9 : nombreuses précisions et adaptations sur les ferraillements minimums et dispositions de ferraillement d'éléments courants de bâtiment

Annexe B : complétée par l'annexe de la partie ponts pour les BHP

Annexe E (issue de la NF EN 206) : rendue normative

Les manifestations régionales

Annexes nationales - NF EN 1992-2 NA

Principales clauses développées ou avec fort écart vis-à-vis des valeurs recommandées

Section 3 : choix de résistances C20/25 à C90/105

Section 5 : simplification du calcul « en fourchette » de la précontrainte sous certaines conditions

Section 6 : explicitation des méthodes de prévention de la rupture fragile – reconduction d'un cisaillement résistant des dalles plus élevé que la valeur recommandée, cf AN de la partie 1-1. – complément sur la dispense de vérification à la fatigue

Section 7 : précisions sur les ouvertures de fissure maximales selon les classes d'exposition, limitation à l'effort tranchant, une méthode simplifiée alternative de maîtrise des ouvertures de fissure

Section 9 : précision sur le ferraillement de peau

Annexe J : mention explicite du guide du Sétra sur les ancrages de précontrainte

Annexe QQ : précision sur les vérifications du cisaillement d'effort tranchant à l'ELS dans les éléments précontraints

Principaux changements induits par l'EC2

L'environnement des ouvrages est exprimé en termes de classes d'exposition. Les vérifications de durabilité (enrobage et contrôle de l'ouverture des fissures) seront liées aux classes d'exposition et à la D.U.P. (100 ans par défaut)

- Durée d'utilisation de projet : en référence à l'EN 1990 et son AN

- Classes d'exposition : en référence à l'EN 206 avec compléments / précisions en AN

Combinaisons d'actions EN 1990 en référence aux :

- Situations de projet durables, qui se réfèrent aux conditions d'utilisation normale;
- Situations de projet transitoires, qui se réfèrent à des conditions temporaires applicables à la structure, par exemple en cours d'exécution ou de réparation;
- Situations de projet accidentelles, qui se réfèrent à des conditions exceptionnelles applicables à la structure ou à son exposition, par exemple à un incendie, à un choc, ou aux conséquences d'une défaillance localisée;
- Situations de projet sismiques, qui se réfèrent à des conditions applicables à la structure lorsqu'elle est soumise à un séisme

L'AN de l'EN 1990 impose pour les ponts aux ELU l'expression « de base » 6.10 pour les situations de projet durables et transitoires

Principaux changements induits par l'EC2

Durée d'utilisation de projet : Durée pendant laquelle une structure ou une de ses parties est censée

pouvoir être utilisée comme prévu en faisant l'objet de la maintenance escomptée, mais sans qu'il soit nécessaire d'effectuer des réparations majeures.

SECTION 3 - MATERIAUX BETON

- Le béton est défini par sa résistance caractéristique à la compression sur cylindre à 28 jours notée fck.
fck est compris entre 12 et 90 MPa
Relation avec la résistance sur cube (nomenclature double) $f_{cm} = f_{ck} + 8$
 - Les autres propriétés s'en déduisent : tableau 3.1, fluage et retrait (3.1.4)
Module et résistance en traction + faibles que dans le BAEL
Pour structures sensibles, identification spécifique recommandée
 - Courbes Contraintes – Déformations
- Loi de Sargin pour analyse structurale non linéaire
- Courbe parabole rectangle
- Courbe bilinéaire

SECTION 4 – DURABILITE ET ENROBAGE DES ARMATURES

L'enrobage (distance nu de l'armature – bord libre) est fonction :

- Des conditions d'adhérence
 - Des classes d'exposition
 - De la durée d'utilisation du projet
 - Du type d'armature / Acier au carbone, inox
 - De la qualité du béton
 - Du type de contrôle qualité : béton et armatures
- Il intègre une marge pour tolérance d'exécution.

SECTION 6 – ETATS LIMITES ULTIMES - POINTS PARTICULIERS DU DIMENSIONNEMENT VIS-A-VIS DE L'EFFORT TRANCHANT

La méthode des bielles d'inclinaison variable permet de réduire les aciers transversaux d'un facteur jusqu'à 2 environ mais avec augmentation des longueurs d'ancrage et des aciers longitudinaux.

Pour les âmes de pont on doit aussi vérifier le cisaillement aux ELS (annexe QQ) et il est alors raisonnable de ne pas trop incliner les bielles par rapport à leur angle dans un calcul élastique.

[Pour le BA suggestion d'angle limite 34° : EN 1992-2 AN 7.3.1 (110) et 6.8.1 (102)]

SECTION 7 – ETATS LIMITES DE SERVICE

Les vérifications vis-à-vis des conditions de service sont définies en référence à :

- Une limitation des contraintes en service;
 - limitation de la contrainte de compression du béton
 - limitation de la contrainte de traction de l'acier

Les manifestations régionales

- Des états limites de fissuration ;
 - ouverture maximale calculée < valeur limite, fonction en particulier de la classe d'exposition
 - limitation de l'ouverture des fissures => % minimal d'armatures passives et limitation des distances entre les barres et des diamètres de celles-ci
- Des états limites de déformation.
 - flèches limitées en fonction du type d'ouvrage (rarement pertinent pour les ponts)
 - le cas échéant vérification des ponts souples et passerelles vis-à-vis des vibrations

Qu'est-ce qui change vraiment avec les Eurocodes?

Le formalisme de vérification, mais pas le fonctionnement du béton armé !!!

- Peu de différence au final dans les quantités
- Une nécessité accrue d'interprétation (méthodes alternatives, principes expliqués dans les situations simples seulement,...)
- Une augmentation probable du volume des études (justifications fatigue, ouverture des fissures...)

Une insistance accrue sur l'expression de la durabilité :

- Formalisation dans l'enrobage et le contrôle de l'ouverture des fissures
- La durabilité peut déterminer le choix du béton
- D'où nécessité d'anticiper la discussion dans le projet

Une responsabilisation du concepteur : les Eurocodes sont moins directifs que les règlements antérieurs, ils laissent au concepteur et au calculateur plus de libertés dans le choix des méthodes

Durée d'utilisation de projet et classes d'exposition

Patrick GUIRAUD - Cimbéton

Notions de durabilité

La durabilité d'un ouvrage caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage pour lequel il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers) et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique, dans son environnement avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible (mise en service d'une maintenance préventive).

La durabilité d'un ouvrage nécessite une conception adaptée, un choix approprié des composants, des matériaux et des dispositions constructives, une qualité d'exécution, une utilisation conforme aux hypothèses du projet et des opérations de maintenance courantes et régulières pendant sa durée d'utilisation.

Les normes de conception des structures (Eurocodes) applicables depuis le 1er avril 2010 en France explicitent :

- l'exigence de durabilité des ouvrages,
- la nécessité de prendre en compte une durée d'utilisation de l'ouvrage dès sa conception.

Définition

EUROCODE 0 : Norme NF EN 1990

Article 1.5.2.8. : Durée d'utilisation de projet « Durée pendant laquelle une structure ou une de ses parties est censée pouvoir être utilisée comme prévu en faisant l'objet de la maintenance escomptée, mais sans qu'il soit nécessaire d'effectuer des réparations majeures. »

Exigences de l'Eurocode

Section 2 : Article 2.1 Exigences de base

Une structure doit être conçue et réalisée de sorte que, pendant sa durée de vie escomptée, avec des niveaux de fiabilité appropriés et de façon économique :

- elle résiste à toute les actions et influences susceptibles d'intervenir pendant son exécution et son utilisation,
- elle reste adaptée à l'usage pour lequel elle a été conçue.

Une structure doit être conçue et dimensionnée pour avoir :

- une résistance structurale,
- une aptitude au service,
- une durabilité.

Article 2.4 : Durabilité

- La structure doit être projetée de sorte que sa détérioration pendant la durée d'utilisation de projet n'abaisse pas ses performances au-dessous de celles escomptées, compte tenu de

Les manifestations régionales

l'environnement et du niveau de maintenance prévu.

- Les conditions d'environnement doivent être identifiées dès le stade du projet afin de déterminer leur effet sur la durabilité et de pouvoir prendre les dispositions permettant d'assurer la protection des matériaux utilisés dans la structure.
- Afin d'assurer une durée adéquate de la structure, il convient de prendre en compte les facteurs suivants :
 - l'utilisation prévue ou prévisible de la structure,
 - les critères de dimensionnement requis,
 - les influences escomptées de l'environnement,
 - la composition, les propriétés et les performances des matériaux
 - le choix du système structural et les propriétés du sol,
 - la forme des éléments structuraux et les dispositions constructives,
 - la qualité de mise en oeuvre et le niveau de contrôle,
 - les mesures de protection spécifiques,
 - la maintenance escomptée pendant la durée d'utilisation de projet.

Valeurs de durée d'utilisation de projet

EUROCODE : Norme NF 1990-AN.

Annexe A1.

Le tableau 2.1 (NF) fournit les valeurs de la durée d'utilisation de projet modifiées par rapport à celles indiquées dans le tableau 2.1 de la norme européenne EN 1990:2002.

La durée d'utilisation de projet doit être définie par le maître d'ouvrage.

Tableau 2.1 (NF) : durée d'utilisation de projet

<i>Catégorie de durée d'utilisation de projet</i>	<i>Durée indicative d'utilisation de projet : années</i>	<i>Exemples</i>
1	10	Structures provisoires
2	25	Eléments structuraux remplaçables
3	25	Structures agricoles et similaires
4	50	Bâtiments et autres structures courantes
5	100	Bâtiments monumentaux, ponts et autres ouvrages de génie civil.

Les classes d'exposition

Les nouveaux textes normatifs relatifs aux ouvrages en béton prennent en compte la durabilité en s'appuyant sur la notion de classe d'exposition.

Ces classes traduisent les actions dues à l'environnement(*) auxquelles le béton de l'ouvrage ou de chaque partie d'ouvrage, et les armatures vont être exposés pendant la durée d'utilisation de la structure.

(*) Norme NF EN 1992-1-1 Section 4 Article 4.2 : *Actions physiques et chimiques auxquelles la structure est exposée en plus des actions mécaniques.*

Les classes d'exposition permettent ainsi d'optimiser la formulation et les performances des bétons ainsi que la conception des ouvrages en vue de leur durabilité.

Prescrire un béton durable nécessite d'apprécier, dès sa conception, l'ensemble des contraintes environnementales et les agressions et attaques potentielles qu'il aura à subir pendant toute sa durée d'utilisation.

Il convient donc, pour chaque partie d'ouvrage qui peut être soumise simultanément à plusieurs agressions et attaques, de déterminer l'ensemble des classes d'exposition à considérer.

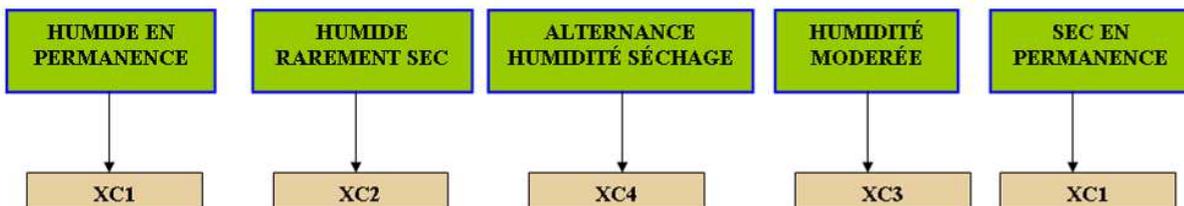
Responsabilité du maître d'ouvrage

Le maître d'ouvrage doit préciser :

- Les classes d'exposition de chaque partie d'ouvrage.
- La durée d'utilisation de projet (100 ans pour les ponts).
- Le niveau de prévention vis-à-vis de l'alcaliréaction.
- La classe d'exposition (XH1, XH2 ou XH3), la catégorie d'ouvrage (I, II ou III) et le niveau de prévention (As à Ds) vis-à-vis de la RSI.
- La classe d'abrasion (XM1, XM2 ou XM3) le cas échéant...

Corrosion induite par carbonatation : XC

La carbonatation du béton est prise en compte par la classe d'exposition XC corrosion induite par carbonatation. Les classes XC1 à XC4 prennent en compte l'exposition du béton à l'air et à l'humidité en distinguant le degré d'humidité de l'environnement et l'alternance d'humidité et de séchage.



Le maître d'ouvrage (conseillé par le maître d'oeuvre) doit connaître et prévoir les conditions d'exploitation et l'environnement de son ouvrage (salage, entretien et dispositions protectrices...) pendant toute la durée d'utilisation de l'ouvrage.

A quoi servent les classes d'expositions ?

- Au stade de la conception du projet :
 - Détermination de l'enrobage nécessaire pour assurer la durabilité « $C_{min,dur}$ » NF EN 1992, section 4
 - Définition de la valeur limite de l'ouverture maximale calculée des fissures NF EN 1992, section 7
 - Détermination de la résistance minimale du béton de la partie d'ouvrage considérée NF EN 1992, annexe E
- Au stade de l'étude, de la commande puis de la fabrication du béton :
 - Selon l'approche « prescriptive » de la norme NF EN 206-1 (tableaux NA.F.1 ou NA.F.2), détermination de limites dans la composition du béton et/ou prescriptions dans le choix des matériaux
 - Selon l'approche performantielle, détermination d'indicateurs et de seuils à satisfaire

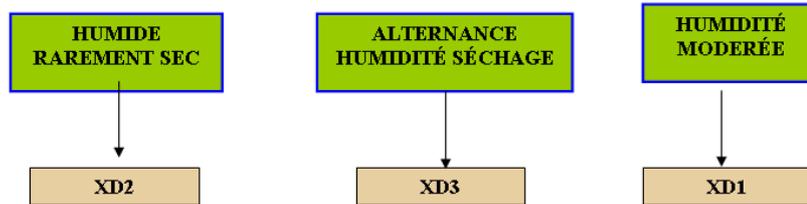
Six catégories de classes d'exposition

Les normes NF EN 206-1 et NF EN 1992-1-1 définissent six catégories de classes d'exposition :

- XO : aucun risque de corrosion ni d'attaque
- XC : corrosion induite par carbonatation
- XD : corrosion induite par les chlorures, ayant une origine autre que marine
- XS : corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer
- XF : attaques gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage
- XA : attaques chimiques

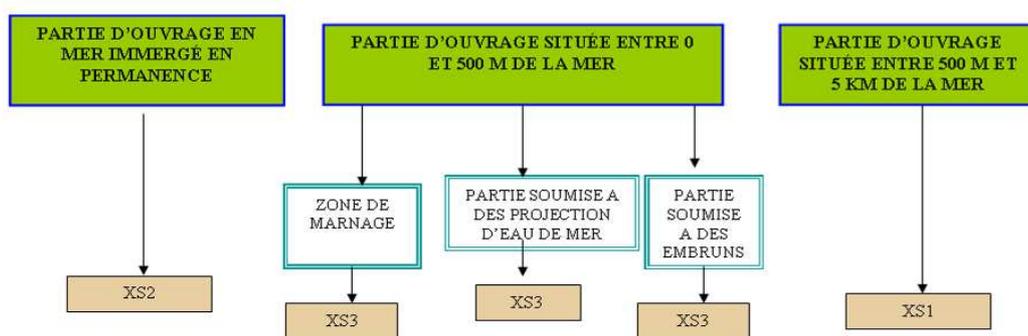
Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine : XD

Cette classe concerne les bétons soumis au contact d'une eau contenant des chlorures (d'origine autre que marine) ou des sels de déverglaçage.

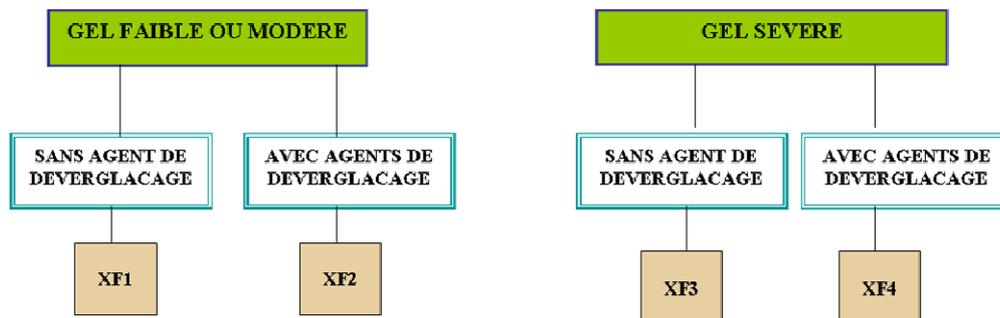


Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer : XS

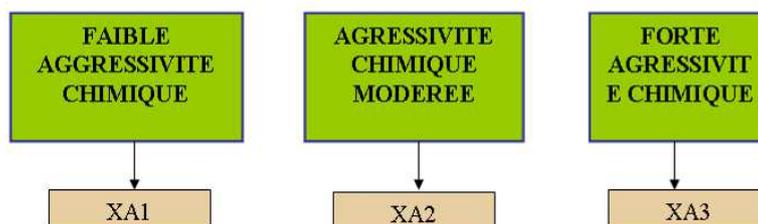
La classe XS concerne les bétons soumis au contact des chlorures présents dans l'eau de mer ou à l'action de l'air véhiculant du sel marin.



Attaques gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage : XF



Attaques chimiques : XA



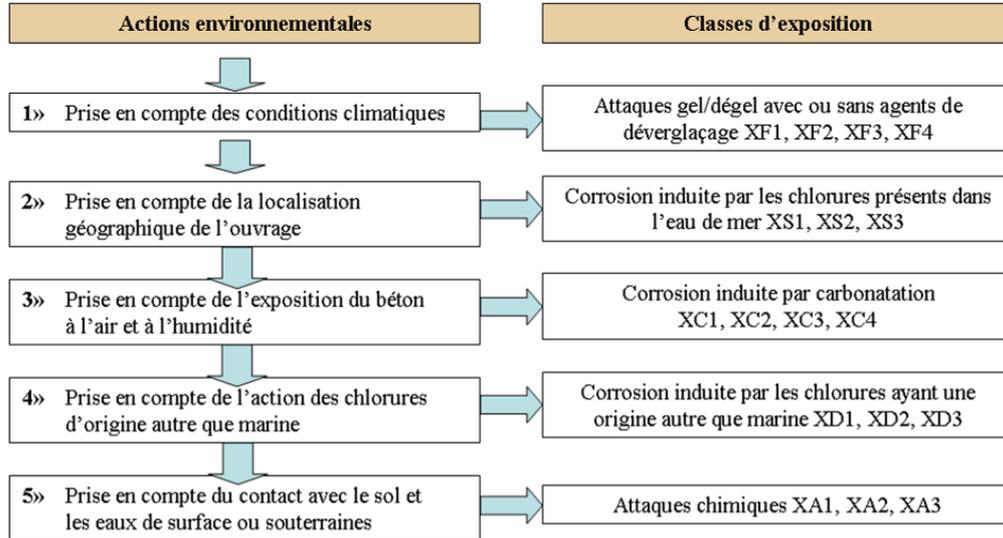
Le tableau 2 de la norme NF EN 206-1 définit les valeurs limites correspondant aux attaques chimiques des sols naturels (SO_4^{2-} , acidité) et des eaux de surface ou souterraines (SO_4^{2-} , pH, CO_2 , NH_4^+ , Mg^{2+}).

Combinaison des classes d'exposition

Chaque béton d'une partie d'ouvrage peut être soumis pendant sa durée d'utilisation à plusieurs actions environnementales.

Il convient donc, pour chaque partie d'ouvrage de déterminer la combinaison des classes d'exposition pour prendre en compte avec précision l'ensemble des actions environnementales auxquelles est soumis le béton.
Le béton doit respecter toutes les valeurs limites applicables pour la composition et les propriétés du béton pour chaque classe d'exposition et donc la sélection des plus sévères exigences et spécifications.

Synoptique pour la détermination des classes d'exposition



Exigences liées aux classes d'exposition selon la norme NF EN 206-1

Les exigences relatives à chaque classe d'exposition doivent être spécifiées en terme de :

- rapport maximal eau efficace / liant équivalent,
- dosage minimal en liant équivalent,
- classe de résistance minimale à la compression du béton,
- type et classe de constituants permis,
- teneur minimale en air dans le béton.

Valeurs limites applicables

La norme NF EN 206-1 fixe dans une annexe informative les valeurs limites spécifiées applicables à la composition du béton en fonction de chaque classe d'exposition.

L'Annexe Nationale complète ces dispositions par des valeurs limites applicables en France et rend celles-ci normatives dans deux tableaux.

NA.F.1 : BÉTON BPE, BÉTON de CHANTIER, BÉTON PREFE (produits structuraux autres que les blocs)

NA.F.2 : BÉTON PRÉFA (produits structuraux autres que les blocs)

	CLASSES D'EXPOSITION																
	Aucun risque de corrosion ou d'attaque	Corrosion induite par carbonatation			Corrosion induite par les chlorures						Attaque gel/dégel				Environnements chimiquement agressifs		
		Eau de mer			Chlorures autres que l'eau de mer												
XC0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
Rapport F _{ce} /F _{liant} max	-	0,55				0,55	0,50		0,55	0,50	0,50	0,35	0,35	0,45	0,35	0,30	0,45
Classe de résistance minimale	-	C20/25				C30/37	C35/45		C30/37	C35/45	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C40/50
Teneur min en sang de bœuf (kg/m ³)	150	260				330	330		330	330	280	300	315	340	330	350	385
Teneur min en air (%)	-	-				-	-		-	-	-	4	4	4	-	-	-
Cendres volcaniques (*)	0,30	0,30				0,15	0,15		0,15	0,15	0,30	0,30	0,30	0,15	0,30	0,30	0,00
Fumées de silice (*)	0,10	0,10				0,0	0,0		0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Laitier moulu (*)	0,30	0,30				0,15	0,15		0,15	0,15	0,30	0,30	0,30	0,15	0,30	0,30	0,00
Addition calcique (*)	0,25	0,25				0,05	0,05		0,05	0,05	0,25	0,25	0,25	0,05	0,00	0,00	0,00
Addition siliceuse (*)	0,20	0,20				0,15	0,15		0,15	0,15	0,30	0,30	0,30	0,05	0,00	0,00	0,00
Nature du ciment	-	-				PM	PM		-	-	-	-	-	-	-	-	-

(*) Rapport maximal A/A+C

Tableau NA.F.1 de la norme NF EN 206-1

Commentaires

Les environnements les plus sévères restent ceux mis en avant dans la réglementation française antérieure et validés par le retour d'expérience :

- zones de marnage et soumises aux embruns,
- zones soumises au gel et à des projections fréquentes de sels de déverglaçage.

Il faut, lors de la conception de l'ouvrage :

- anticiper l'environnement futur et l'exploitation de l'ouvrage et se poser en amont les questions associées à la durabilité attendue,
- prévoir les analyses d'eaux souterraines et des sols,
- se laisser la possibilité d'itérations sur les moyens d'assurer la durabilité.

Il faut conserver l'ensemble des classes d'exposition correspondant aux différents risques et agents agressifs.

La conséquence de chaque classe diffère en sévérité selon qu'on considère les armatures / l'enrobage ou la composition du béton (pas de « classe enveloppe »). Il faut anticiper les conditions d'environnement et d'exploitation de l'ouvrage, ce qui peut entraîner des itérations et des choix du meilleur compromis entre solutions alternatives.

Guides pour le choix des classes d'exposition

Groupe de travail de l'Ecole Française du Béton pour mettre au point des guides destinés à faciliter le choix des classes d'exposition pour différentes catégories d'ouvrages.

- Pilotage : Henry Thonier – EGF-BTP
- Membres représentants :
- l'administration : LCPC / CETMEF / CETU
- les bureaux de contrôle : SOCOTEC / APAVE
- les fédérations professionnelles : FFB / FNTP / EGF-BTP / UMG
- les entreprises : EIFFAGE / BOUYGUES
- les organismes techniques professionnels : CIMBETON / CERIB

Guides :

- Représentatif du consensus technique actuel.
- Déclinant la plupart des ouvrages, parties d'ouvrages et composants en béton.
- Facilitant l'utilisation en adoptant une clef d'entrée par nature d'ouvrages et parties constructives.

Tableaux

En ligne, parties d'ouvrages ayant une cohérence constructive et d'exposition aux agents extérieurs.

En colonnes, risques considérés (XC - XS - XD - XF - XA – éventuellement XM) avec des sous-colonnes (XD - XF) selon la fréquence du salage.

Les manifestations régionales

C'est l'ensemble des classes d'exposition associées à une ligne qui doit être pris en considération pour les spécifications relatives à l'enrobage, à la composition du béton et à ses performances.

Diverses catégories d'ouvrages :

- Ouvrages d'art
- Ouvrages maritimes
- Ouvrages fluviaux
- Ouvrages d'équipements de la route et chaussée
- Tunnels routiers et tranchées couvertes
- Ouvrages divers de génie civil
- Bâtiments

Découpage de la France en 4 zones géographiques :

- Ouvrages en mer ou à moins de 100 m de la côte (front de mer).
- Ouvrages situés à moins de 100 m de la côte (bord de mer).
- Ouvrages à l'intérieur des terres en zone de gel faible ou modéré.
- Ouvrages à l'intérieur des terres en zone de gel sévère.

Enrobage des armatures – Eurocode 2 et approche performantielle

Damien CHAMPENOY - CETE de l'Est

- Enrobage et Eurocodes.

Principes du "passage aux Eurocodes"

Texte de l'Annexe Nationale inséparable de la section 4 de l'EN 1992

- très peu de compléments nécessaires dans l'EN 1992-2 et -3 et leur A.N.
- Recherche de cohérence avec l'EN 206-1 et son A.N.
 - nécessite précisions sur les exemples informatifs liés aux classes d'exposition, qui sont alors rendus normatifs (tableau 4.1 et notes, en plus du renvoi à l'EN 206 notamment tableaux NAF 1 et NAF 2)
- Retenir l'essentiel des dispositions EU recommandées
 - classe structurale S4, tableaux 4.4 et 4.5 inchangés ou très peu
 - moyennant des possibilités de modulations explicitées (tableau 4.3NF) pour tenir compte d'une démarche performantielle sur le béton
 - en explicitant les conditions de contrôle liées aux marges pour tolérances d'exécution
- Objectifs des rédacteurs
 - favoriser l'obtention de la durabilité par un choix équilibré entre l'épaisseur d'enrobage, la qualité du béton d'enrobage, et les dispositions complémentaires
 - inciter à un meilleur contrôle du positionnement des armatures

Ce que l'Eurocode 2 change

Les enrobages découlent des objectifs de durabilité (classe structurale) et des contraintes associées (exposition)

- Eléments fixés sous la responsabilité du maître d'ouvrage
- Démarche de type performantiel avec nécessité de conseil technique (maîtrise d'oeuvre ? AMO ?) bien explorée dans des cas de concessions

Cette explicitation doit être nettement anticipée

- Incidence sur le projet !
- Se laisser la possibilité d'itérations organisées sur les moyens de la durabilité (revêtement, armature, résistance et indicateurs de durabilité du béton...)

L'Eurocode change la démarche de détermination de l'enrobage, mais pas trop la valeur finale si on utilise un béton adapté :

- Cohérence EN 206 - EN 1992 – approche performantielle !

Un enjeu patrimonial important

- Veiller à la cohérence entre hypothèses du projet et réalisation (performances béton, mise en oeuvre, tolérances...).

Normes béton : NF EN 206-1, NF EN 206-9

Michel GEORGE - SNBPE

La norme NF EN 206-1

Les deux types de béton définis par la norme :

- Les Bétons à Propriétés Spécifiées (BPS)
 - Classes de résistance en compression
 - Classes d'exposition
 - Classes de consistance
 - Dimension maximale des granulats
 - Classes de teneur en chlorures

- Les Bétons à Composition Prescrite (BCP)
 - BCP résultant d'une étude

Doit être formulé « par un prescripteur expérimenté disposant d'une réelle compétence dans la formulation du béton »

La composition prescrite doit :

- Respecter les spécifications minimales de la classe d'exposition
- Permettre d'atteindre la résistance caractéristique retenue pour le calcul de l'ouvrage

- BCP défini dans une "norme"

Dosage en ciment prédéfini

La norme NF EN 206-9

Règles complémentaires pour le béton autoplaçant

Béton autoplaçant : béton qui s'écoule et se compacte par seul effet gravitaire, capable de remplir entièrement le coffrage avec son ferraillement, ses

Les manifestations régionales

gaines, réservations... tout en conservant son homogénéité.

Cette norme précise les règles qui s'appliquent au BAP en complément des règles communes aux bétons, spécifiées dans la norme NF EN 206-1.

Définitions des propriétés à l'état frais

- Mobilité

Facilité d'écoulement du BAP frais non confiné par le coffrage et/ou le ferraillement

- Viscosité apparente

Résistance à l'écoulement du BAP frais, une fois que cet écoulement a commencé

- Aptitude à l'écoulement

Aptitude du BAP frais à s'écouler à travers des zones confinées, y compris des espaces entre les armatures, sans aucune ségrégation ou aucun blocage

- Résistance à la ségrégation

Capacité du BAP frais à conserver une composition homogène

Les évolutions normatives

Annexe Nationale : nouvelle version (2012)

Un nouveau texte de l'annexe nationale doit être publié mi-novembre

Points principaux

- Utilisation possible de granulats recyclés
- Possibilité d'utiliser des additions avec des CEM II/A
- Nouvelle addition : Métakaolin
- Définition des bétons d'ingénierie : nouveau concept définissant des bétons dont la composition est étudiée spécifiquement et ne répond pas à certains critères de la norme, qui font l'objet de dispositions particulières en termes d'essai initial et de contrôle

Norme européenne

Publication prévue en 2014

Points principaux

- Intégration de la 206-1 et de la 206-9 dans une seule norme (EN 206)
- Utilisation possible de granulats recyclés
- Possibilité d'utiliser des additions avec des CEM II/A
- Nouvelle addition : Laitier moulu
- Ajout de règles de conformité sur les bétons fibrés
- Clarification du concept de conception performantielle

Normes d'exécution des ouvrages en béton : NF EN 13670

Paul ALLEGRE - CETE de l'Est

➤ Introduction – Présentation générale du champ d'application de la norme NF EN 13670

EN 13670 – 2009

Pr NF EN 13670/AN – Publication courant 2013.

XP ENV 13670 – 2002 (bientôt obsolète)

A compléter par :

NF P 18-201 (référence DTU 21)

Travaux de bâtiment. Exécution des ouvrages en béton.

Cahier des clauses techniques.

Cette norme DTU concerne exclusivement l'exécution des travaux.

Champ d'application

- Aux ouvrages en béton.

En particulier lorsque la prescription fait référence à l'Eurocode 2 ou à la partie « béton » de l'Eurocode 4.

- Aux ouvrages provisoires ou définitifs.

Des prescriptions additionnelles ou différentes sont à prévoir lors de l'utilisation de béton léger, d'autres matériaux ou constituants, ou lors de la mise en oeuvre de technologies particulières (ou innovantes).

Objectifs de la norme

- Transmettre au constructeur les exigences définies au cours de la conception c'est-à-dire former un lien entre le projet et l'exécution.
- Donner un ensemble d'exigences techniques normalisées pour l'exécution d'une structure en béton.
- Fournir à l'auteur du projet une liste de vérifications pour s'assurer qu'il transmet au constructeur toute l'information technique nécessaire pour l'exécution de l'ouvrage.

Contenu de la norme

Avant-propos national

Avant propos

Introduction

1. Domaine d'application
2. Références normatives
3. Termes et définitions
4. Gestion de l'exécution
5. Etaisements et coffrages
6. Armatures pour béton armé
7. Précontrainte
8. Opérations de bétonnage
9. Produits préfabriqués
10. Tolérances géométriques

Annexes (informatives) :

A – Guide sur la documentation

B – Guide sur le management de la qualité

C – Guide sur les étaisements et les coffrages

D – Guide sur les armatures de béton armé

E – Guide sur la précontrainte

F – Guide sur l'opération de bétonnage

G – Guide sur les tolérances géométriques

H – Guide sur l'annexe nationale

Les manifestations régionales

➤ Quelques spécifications

Spécifications d'exécution :

1. Description de tous les produits à mettre en oeuvre avec toutes les exigences de mise en oeuvre.
2. Définition des classes d'exécution à appliquer, toute tolérance spéciale, exigences relatives aux parements, etc.
3. Toutes les exigences pour l'exécution des travaux (séquence des opérations, appuis provisoires, procédures d'exécution, etc).
4. Les plans de construction (géométrie, quantité et position des armatures de béton armé et de précontrainte, ainsi que les dispositifs de levage, les poids, et les inserts des éléments préfabriqués).
5. Les spécifications pour la mise en place des éléments préfabriqués (position des liaisons, nature des matériaux de liaison et contrôle, manutention, stockage, pose, etc).

Les étaisements et coffrages

Corps du texte : Très général = Très léger...

Exemple :

«Les étaisements et coffrages, y compris leurs supports et leurs fondations, doivent être conçus et exécutés de manière à être :

- a) capables de résister à toutes les actions prévisibles auxquelles ils sont soumis pendant la construction ;
- b) suffisamment rigides pour assurer que les tolérances spécifiées pour la structure sont respectées et que l'intégrité de l'élément de structure n'est pas affecté. »

L'annexe C - guide sur les étaisements et coffrages (informatif) :

Précise que :

«Les actions principales à considérer dans le projet sont celles indiquées dans les Eurocodes principalement l'EN 1990, Eurocode – Base de calcul des structures et l'EN 1991-1-6, Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1.6 : Actions générales – Actions en cours d'exécution y compris des combinaisons de :

- a) poids propre des coffrages, des armatures et du béton ;
- b) pression sur les coffrages, fonction du type de béton (y compris éventuellement une poussée vers le haut) ;
- c) charges de construction (personnel, matériel, etc.) y compris les effets statiques et dynamiques du bétonnage, du compactage et du trafic sur le chantier ;
- d) charges de vent et de neige ;
- e) actions particulières sur le lieu d'utilisation telles que dispositions pour les actions sismiques.»

Coffrages :

- Maintenir la géométrie du béton jusqu'à son durcissement.
- Eviter la perte de laitance entre les panneaux.

Attention aux coffrages susceptibles d'absorber une quantité significative d'eau !

Attention à la propreté des surfaces intérieures !

Attention à la fixation du ferrailage par rapport au coffrage (en particulier pour les coffrages glissants !
Remarque : les agents de décoffrage ne doivent pas nuire à la qualité du béton, des armatures, ou du coffrage, ni à l'environnement.

Étaisements :

- Les cales de réglage des supports doivent permettre d'éviter tout glissement pendant les phases de bétonnage.
- Prise en compte du tassement différentiel dans le cas d'étaisement depuis le sol.

Vérification des coffrages :

L'annexe nationale conseille de « désigner dans les procédures d'exécution la personne chargée de contrôler les étaisements et ouvrages provisoires avant mise en charge ; il s'agit du COP (Chargé des Ouvrages Provisoires) dans le cadre du Fascicule 65.

Réception définie dans la partie 10.

Tolérance géométrique – Figure 4 – Ecart admissible des sections.

Démontage des coffrages et étaisements :

- Attention à la détérioration de surface.
- Attention aux actions appliquées à ce stade.
- Attention aux flèches trop importantes.

Epreuves d'information.

Si les coffrages font partie du système de cure, le délai avant décoffrage doit être pris en compte.

Armatures de béton armé :

- Conformés à la norme EN 10080.
- Dispositifs de raccordement conformes à la norme EN 1992-1-1 ou à un agrément technique européen (ATE).
- Façonnage à vitesse constante avec $T_{ext} > -5^{\circ}C$.
- Soudage si acier conforme à l'EN 10080.
- Pas de rouille non adhérente.

Enrobage : les armatures doivent être mises en place et fixées à leur position définitive.

Enrobage : les cales métalliques ne sont autorisées que dans la classe X0 (environnement sec).

Vérification du ferrailage :

- Enrobage déterminé initialement à l'aide de la norme NF EN 1992-1-1.
- Réception définie dans la partie 10. Tolérance géométrique - Figure 4 (suite) et Figure 4 (fin).

La précontrainte

Nature des matériaux

- Adhérente par pré-tension ou post-tension =
- Eurocode 2 et EN 10138.
- Non adhérente par post-tension interne ou externe = Eurocode 2.

Tous les éléments du système de précontrainte par post-tension doivent être compatibles (ie : appartenir au même système).

Les manifestations régionales

- Coulis de ciment = EN 447 + Règlement ASQPE (Association pour la Qualification de la Précontrainte et des Equipements de Génie Civil).

L'ASQPE est obligatoire en France.

Notamment avis techniques pour les coulis.

- Gaines, Cires, et autres produits : renvoi au fascicule 65 du CCTG...

Transport et stockage des armatures :

- Identification et l'agrément des matériaux doivent être disponibles sur le chantier.
- Les livraisons doivent s'accompagner d'un bon de livraison sinon rejet des armatures.
- Bons de livraisons, rapports d'essais, et nonconformités doivent être inclus dans le rapport de mise sous tension.

Fixation des gaines et des événements pour les phases de bétonnage.

Suivi de la mise sous tension :

- Attention au respect du programme pré-établi et accepté.
- Enregistrement des forces (pressions) et déplacements.
- L'appareil de mise sous tension doit être compatible avec le système (ATE).
- Les certificats d'étalonnage à jour des nanomètres doivent être disponibles sur chantier avant la mise sous tension.

Avant d'autoriser la mise sous tension il faut s'assurer que sur les n résultats d'information obtenus sur les prélèvements de béton les conditions suivantes soient respectées :

- $f_{c1} < f_{c2} < \dots < f_{cn}$
- $f_{c1} > \text{ou} =$ valeur minimale requise pour la mise sous tension

Dans le cas d'une post-tension

$0,97 \times P_0 < P < 1,03 \times P_0$ – armatures multiples,

$0,95 \times P_0 < P < 1,05 \times P_0$ – armature simple,

Avec P_0 : la force totale de mise en tension spécifiée.

Mesures de protection

- 12 semaines entre la fabrication des armatures de précontrainte et l'injection.
- 4 semaines entre la mise en place dans le coffrage et le coulage du béton.
- 2 semaines entre la mise sous tension et la mise en oeuvre des mesures de protection.

Y compris les ancrages.

Si délais non respectés : soufflage des gaines à l'air sec ou à l'azote.

Les opérations de bétonnage

Bétonnage par temps froid :

$T_{ext} > 0^{\circ}C$.

Attention au gel du support.

Bétonnage par temps chaud :

Spécifications d'exécution...

Cure et protection :

- Réduire le taux d'évaporation à la surface du béton. Empêcher le gel ($T_{\text{surface}} > 0^{\circ}\text{C}$ tant que $f_c < 5\text{MPa}$).
- Maintenir $T_{\text{béton}} < 65^{\circ}\text{C}$ (RSI).

Les tableaux F.1, F.2, et F.3 de l'annexe F – Guide sur les bétonnages donnent les temps minimaux de cure à respecter suivant la classe de cure.

Réception du béton sur site

- Durée entre le début de fabrication et la fin de la mise en oeuvre < 2 heures.
- Consistance : au moment de l'arrivée du camion sur chantier (avec un battement de 30 minutes autorisé).
- B.P. et F.T.P. (dans le cas d'ouvrages soumis au F65).

Les produits préfabriqués

Préfabrication

- Schéma de levage (définition des points de suspension et forces).
- Instructions relatives au stockage.
- Définition des supports, étais, dispositifs pour assurer la stabilité avant mise en place.
- Joints et opération de liaison :

Attention au ferrailage, coffrage, béton, ...

Les tolérances géométriques

Tolérances et géométrie (spécifiées au moment du projet)

- Résistance mécanique et stabilité en phase provisoire et en service.
- Performance de service pendant la vie de la structure.
- Compatibilité géométrique pour la réalisation de la structure et la mise en place des éléments non-structuraux.

Dans le cas où une tolérance est définie de manière redondante par plusieurs exigences, c'est la tolérance la plus stricte qui s'applique.

Tolérances et géométrie

- Fondations.
- Poteaux et Murs.
- Poutres et dalles.
- Sections.
- Planéité de surface et rectitude des arêtes.
- Réservations et inserts.

➤ **Classes d'exécution et mise en oeuvre du contrôle**

La notion de classe d'exécution

- 3 classes correspondantes aux trois niveaux de fiabilité de l'annexe B de l'EN 1990:2002.
- Relatives au management de la qualité.
- Sévérité du niveau d'exigences croît de la classe 1 à 3.

Les manifestations régionales

Classe d'exécution 1 : auto-contrôle

Classe d'exécution 2 : auto-contrôle + contrôle intérieur systématique

Classe d'exécution 3 : auto-contrôle + contrôle intérieur systématique + contrôle extérieur indépendant

L'étendue du contrôle

Pour les structures relevant de la classe d'exécution 3 : **Contrôle intérieur** : sur toutes les parties de l'ouvrage ayant une importance sur la capacité portante et la durabilité de la structure.

(Etaisements, coffrages, armatures, propreté avant bétonnage, béton en phase de bétonnage et de sa cure, précontrainte, injection...).

Contrôle extérieur indépendant : A minima, sur tous les bétonnages et poses d'armatures pour les éléments de structure importants tels que les éléments porteurs.

Pour les autres éléments, contrôle par sondage en fonction de l'importance des éléments vis-à-vis de la capacité portante et de la durabilité.

Action en cas de non-conformité

Examiner les points suivants :

- Incidences de la non-conformité sur l'exécution ultérieure et sur l'aptitude à remplir la fonction requise.
- Les mesures nécessaires pour rendre acceptable l'élément concerné.
- La nécessité de rejeter et de remplacer l'élément s'il n'est pas réparable.

Exemple :

Le béton n'a pas les propriétés permettant la protection des armatures

- ➔ Mise en place d'un revêtement pour améliorer la protection des armatures

➤ **Conclusions et perspectives**

De l'EN 13670 au Fascicule 65

Aujourd'hui :

Le CCTP fait référence aux articles du fascicule 65 et aux normes.

Demain :

Le CCTP fera référence uniquement aux normes, dont l'EN 13670, avec des classes d'exécution et de tolérance et des spécifications d'exécution.

Mais le fascicule 65 devra compléter certaines spécifications.

Positionnement de l'approche performantielle dans le contexte normatif Français et Européen

Patrick GUIRAUD - Cimbéton

L'approche traditionnelle

- Approche basée sur des recommandations d'exigences relative à la composition du béton et à certaines de ces propriétés en fonction de la nature de l'agression.

- Classes d'exposition
- Basée sur une durée de vie de 50 ans.
- Fondée sur un retour d'expérience de plusieurs décennies.

Version Française

Deux tableaux NA. F.1 et NA. F.2

Les valeurs limites pour les bétons utilisés en France sont données dans le Tableau NA.F.1, sauf dans le cas

Les manifestations régionales

de bétons destinés aux produits préfabriqués en usine pour lesquels le Tableau NA.F.2 s'applique excepté quand :

- la référence au Tableau NA.F.1 est explicite
- les produits sont couverts par une norme prévoyant des conditions d'environnement et fixant des exigences de durabilité spécifiques (alors seule la norme concernée s'applique).

	X0	XC1/xc2	XF1 XC3,XC4,XD1	XF2	XF3	XF4
E_{eff}/liant équivalent maxi	-	0,65	0,60	0,55	0,55	0,45
Résistance mini	-	C20/ 25	C25/ 30	C25/ 30	C30/ 37	C30/ 37
Liant éq. mini	150	260	280	300	315	340
Air mini	-	-	-	4	4	4
Additions maxi Ex: Cendres volantes	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,15

Tableau NA F1 (extrait)

Les limites de l'approche

Peu de possibilités

- D'innovations
- De prise en compte du concept de développement durable

Mal adapté aux ouvrages :

- Exceptionnels
- De durée d'utilisation supérieure à 50 ans
- Exigences parfois difficile à concilier : XF4 et RSI par exemple
- Faible possibilité de valorisation des ressources locales

Le concept de performance équivalente du béton dans la norme NF EN 206-1

Article 5.2.5.3 concept de performance équivalente

Le concept de performance équivalente du béton permet de modifier les exigences en ce qui concerne le dosage minimal en ciment et le rapport maximal eau/ciment dans les cas où une addition spécifique est utilisée avec un ciment spécifique.

Il doit être prouvé que le béton a une équivalence de performance avec celle d'un béton de référence, en particulier pour ce qui concerne son comportement vis-à-vis des agressions de l'environnement et sa durabilité, conformément aux exigences pour la classe d'exposition concernée.

L'annexe E donne les principes d'évaluation du concept de performance équivalente. Lorsque le béton est confectionné selon ces procédures, il doit être soumis à une évaluation continue, tenant compte des variations du ciment et de l'addition.

Annexe E (informative)

Lignes directrices d'application du concept de performance équivalente des propriétés du béton

La performance du béton contenant l'addition doit être au moins équivalente à celle du béton de référence

Le béton de référence :

- doit contenir un ciment conforme à l'EN 197-1, contenant des constituants correspondant à la combinaison du ciment et de l'addition
- soit conforme aux exigences requises pour la classe d'exposition correspondante.

De plus

- la quantité totale d'addition, y compris celle déjà contenue en tant que constituant du ciment, doit respecter les valeurs limites données dans l'EN 197-1, pour un type de ciment correspondant autorisé ;
- la somme du ciment et de l'addition doit être au moins égale à l'exigence relative à la teneur en ciment, pour la classe d'exposition correspondante
- le rapport eau / (ciment + addition) soit dans les limites prescrites pour le rapport eau/ciment

maximal, pour la classe d'exposition correspondante.

Conception performantielle dans la norme NF EN 206-1

5.3.3 Méthodes de conception performantielles

Les exigences relatives aux classes d'exposition peuvent être établies en utilisant les méthodes de conception performantielles pour la durabilité et elles peuvent être établies en termes de paramètres performantiels, par exemple une mesure d'écaillage dans un essai de gel/dégel.

L'annexe J (informative) de la présente norme donne des conseils relatifs à l'utilisation d'une autre méthode de conception en fonction des performances pour la durabilité.

L'utilisation d'une variante est soumise aux dispositions en vigueur là où le béton est utilisé.

Annexe J (informative)

Méthode de formulation basée sur les performances pour le respect de la durabilité

1 Introduction

La présente annexe présente brièvement les concepts et les principes applicables pour une méthode de formulation fondée sur la performance dans le respect de la durabilité.

2 Définition

Cette variante considère quantitativement chacun des mécanismes de détérioration, la durée de vie de l'élément ou de la structure, et les critères qui définissent la fin de cette durée de vie. Cette méthode peut se baser sur une expérience satisfaisante avec des pratiques locales dans des environnements locaux, sur des données recueillies à partir d'une méthode d'essai de performance établie pour le mécanisme étudié, ou sur l'utilisation de modèles prédictifs éprouvés.

Les premiers pas Européens

En 1990, les TC 51 (Ciment) et TC 104 (Béton) créent conjointement le TC 51(TC104)/ JWG 12 : « Additional performance criteria »

Le but de ce WG est de sélectionner des critères de performance et de mettre au point des méthodes d'essais associées.

Pour cela le WG 12 crée plusieurs TG (Task Groups).

TG1 : Résistance aux sulfates (Ciment et béton)

TG2 : Revue documentaire des normes nationales sur les ciments résistant aux sulfates

Pour mémoire

TG3 : Chaleur d'hydratation des ciments

Les manifestations régionales

TG4 : Résistance gel dégel des bétons

TG5 : Protection des armatures

- Carbonatation
- Pénétration des chlorures

Pour mémoire

TG6 : Lixiviation (Eau potable, SDR)

Le point à ce jour

TG1

Essais non discriminants ne permettant pas de fixer une limite normalisée.

Pas d'essais béton européens représentatifs.

(Délais trop long et problèmes de prise en compte des points de faiblesses).

Concentration en sulfates très élevés donnent gypse au lieu d'étringite.

Les modèles de diffusion ne fonctionnent pas.

- Décision de confier le sujet à NANOCEM (Polytechnique Lausanne).
- Les thèses soutenues à ce jour ne lèvent pas les interrogations au niveau du processus d'attaque sulfatique.
- Nouvelles thèses en cours.
- Publication d'un CEN/TR sur l'état de l'art des essais.
- Norme ciments résistants aux sulfates (SR) sur CEM I, CEM III B et C et CEM IV.
- Révision programmée de la norme NF P 15-319 pour couvrir les autres ciments (ES) CEM II; CEM V; CNP et CAC.

TG4

- Ecaillage : Un essai de référence « Plaque » scandinave.
- Délai environ 3mois.
- Deux critères : Masse d'écailles à 56 cycles < limite donnée et Masse d'écailles à 56 cycles < 2 x M é à 28 cycles.

Mais : pas de reproductibilité reste un TS et non une norme

- Gel interne : pas de consensus européen
- 300 cycles mais en France 4 cycles/j, ailleurs 1/j.
- Ne permet pas de classer les bétons.

TG5

Le WG 12 TG 5 a repris le travail.

Méthode de diffusion naturelle adoptée.

Méthode de migration sous champ électrique doit être confiée à la Rilem.

Méthode RILEM pour carbonatation (2 ans).

Cette méthode permet un classement des bétons, mais pas de valeur absolue.

Le TG5 a produit un TS pour l'utilisation en comparatif par rapport à un béton de référence.

Le projet de TS sur carbonatation accélérée a été abandonné (temporairement) après un vote négatif.

Evolutions prévues de la NF EN 206-1

- Lors de la réunion du TC 104 de Stockholm en juin 2007, il a été décidé la création d'un TG 17 : «Concept de performance équivalente des bétons», devenu depuis «Concept de durabilité équivalente des bétons».
- Le TG 17 a rédigé un CEN TR sur le sujet.
- Il s'agit d'un projet de concept d'approche performantielle pour des développements nationaux.

Le problème statistique

Le béton de référence est bien connu. On peut donc choisir une valeur respectée par 95% des résultats. Par contre, il faut définir le nombre de résultats nécessaires pour valider le béton testé.

D'autres problèmes

Prise en compte du facteur de vieillissement

- Les essais sont faits au jeune âge, or, il y a de grande différence dans l'évolution des bétons.
- Un C25/30 CEM I fera peut être 30 MPa à 360 jours.
- Un C25/30 avec cendres pourra atteindre 40 MPa à 360 j.

Conclusions (Niveau européen)

Il y a aujourd'hui un problème de disponibilité des essais de performance

- Bon espoir d'aboutir pour Carbonatation et chlorures, donc classes XC/XD/XS.
- Pas d'essais européens validés pour sulfates donc pour les classes XA.
- Essai de gel (écaillage) non classant, pas d'essai de gel interne (classes XF).
- La méthodologie doit être précisée, notamment prise en compte de méthodes statistiques pour l'évaluation des populations.
- Le choix du béton de référence doit être précisé.
 - ✓ En Europe, il y a une prise de conscience que le sujet est important et « d'avenir ».
 - ✓ Mais l'approche Européenne est une approche « pragmatique » validée par des essais comparatifs.
 - ✓ L'approche « indicateurs » développée en France demandera du temps pour être validée au niveau international.
 - ✓ Un projet national « PerfDub » est à l'étude pour aider au développement du concept au niveau Français.
 - Evaluation de la conformité
 - Développement des essais

Approche performantielle et prédictive de la durabilité des structures en béton (armé) fondée sur les indicateurs de durabilité

Véronique BAROGHEL-BOUNY – IFSTTAR

1 - Introduction : nouvelle approche de la durabilité

- Évaluation de la durabilité "potentielle" d'un béton armé sur la base de mesures sur éprouvettes de laboratoire + d'un système de classes
 - ➔ Comparaison et classement de bétons
 - ➔ (sélection ou optimisation de formules, contrôle qualité, ...)
- Conception de bétons pour une durabilité prédéfinie
- Qualification de formules de béton pour une structure donnée sur la base de critères performantiels (spécifications)
 - ➔ cahiers des charges, règlements de conception, normes, ...
- Prédiction de la durée de vie d'une structure (phase de concept.)
- Diagnostic et prédiction de la durée de vie résiduelle de structures existantes (éventuellement dégradées)
 - ➔ contrôle in situ
 - ➔ décision de réparation ou d'extension de la durée de service

➔ Approche multi-niveaux

Référence : document AFGC (état de l'art + guide) [AFGC, 2004], [AFGC, 2007] Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages"

Principaux objectifs et applications :

- évaluation de la durabilité "potentielle"
- conception de bétons pour une durée de vie donnée de l'ouvrage
- prédiction de la durée de vie / suivi des structures existantes
 - ✓ durabilité à (très) long terme (ouvrages spéciaux)
 - ✓ renforcer le lien entre formulation & durée de vie (structure)
 - ✓ faciliter l'utilisation de bétons "verts" + assurer la durabilité
 - ✓ aider au diagnostic et optimiser le suivi des structures

2 - Indicateurs de durabilité : définitions, caractéristiques,

Pertinence et méthodes de détermination

Pertinence théorique -> paramètres-clés (matériau) pour la quantification (équations) et la prédiction (modèles) de la durabilité

Détermination fiable et facile -> au moyen d'essais de laboratoire validés (précision, reproductibilité, ...)

adéquates), sur éprouvettes de laboratoire ou sur prélèvements

- ✓ indicateurs généraux (universels) valables pour différents types de dégradation
- teneur (initiale) en portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- porosité (accessible à l'eau)
- coef. de diffusion (app. ou eff.) des ions Cl^-
- perméabilité à l'eau liquide
- perméabilité aux gaz

- ✓ indicateurs spécifiques à un processus de dégradation donné (alcali-réaction, dégradations dues au gel, ...)
- ✓ paramètres complémentaires (optionnels)
- seuls quelques paramètres sont requis ...
- le même panel est utilisé pour différents objectifs

3 - Classes associées aux indicateurs de durabilité

Exemples d'évaluation de la durabilité « potentielle » (vis-à-vis de la corrosion des armatures)

Durabilité "potentielle" → Indicateur général ↓	Très faible (TF)	Faible (F)	Moyenne (M)	Elevée (E)	Très élevée (TE)
Porosité accessible à l'eau P_{eau} (%)	> 16	14 à 16	12 à 14	9 à 12	6 à 9
Coef. de diffusion "effectif" des Cl^- D_{eff} ($10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	> 8	2 à 8	1 à 2	0,1 à 1	< 0,1
Coef. de diffusion "apparent" des Cl^- (mesuré par essai de migration) $D_{\text{app(mig)}}$ ($10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	> 50	10 à 50	5 à 10	1 à 5	< 1
Coef. de diffusion "apparent" des Cl^- (mesuré par essai de diffusion ns) $D_{\text{app(dif)}}$ ($10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)				< 5	
Perméabilité "apparente" aux gaz $K_{\text{app(gaz)}}$ (10^{-18} m^2) (à $S=0$)	> 1000	300 à 1000	100 à 300	30 à 100	< 30
Perméabilité intrinsèque à l'eau liq. k_{liq} (10^{-18} m^2) (à $S=1$)	> 10	1 à 10	0,1 à 1	0,01 à 0,1	< 0,01
Teneur initiale en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (% par rapport à la masse de ciment)	< 10	10 à 13	13 à 20	20 à 25	≥ 25

[valeurs moy.] Mesures sur éprouv. conservées préalablement dans l'eau (âge ≤ 90 j)]

4 - Spécifications performantielles, en fonction du type d'environnement et de la durée de vie exigée

5 - Prédiction de la durée de vie des structures : témoins de durée de vie et modélisation "multi-niveaux"

6 - Conclusion : boîte à outils pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité

- Etablissement de cahiers des charges types (CCTP) pour une utilisation systématique intégration de l'approche dans PETRA, guide "Bétons", ... (SETRA)
- Mise à disposition de formules locales "clés en main", à durabilité élevée, à faible coût, respectueuses de l'environnement (granulats locaux, utilisation d'additions minérales, ...), et pré-caractérisées selon la nouvelle approche de la durabilité
- Introduction de la méthodologie proposée (approche performantielle) en solution alternative (à l'approche prescriptive) dans les normes et

règlements (norme européenne béton EN 206-1, fascicule 65, Eurocode 2, ...) + "exportation" de l'approche française

- évolution forte actuellement (nombreux nouveaux textes relatifs à la durabilité)
- Appliquer la démarche proposée en amont de la construction dans le cas d'un ouvrage neuf (i.e. dès la phase de conception)
 - prévoir le délai de préparation adéquat avant le démarrage des travaux (temps nécessaire pour la réalisation des essais, l'évolution éventuelle des formules de béton, ...)
- Appliquer avec la même rigueur les recommandations pour une mise en oeuvre correcte du béton et le contrôle d'exécution
 - optimisation des procédures de cure en fonction de [formule béton - géométrie structure - cond. aux limites (i.e. environ.)]
 - la qualité du béton d'enrobage y est hautement sensible !

Pourquoi une révision ?

Objectif principal

- Mettre le fascicule 65 en conformité avec la norme NF EN 13670.

Objectifs secondaires

- Introduire l'approche performantielle.
- Promouvoir le développement durable.
- Prendre en compte les évolutions normatives (notamment NF EN 206-1/NA).
- Harmoniser les clauses relatives aux documents à fournir par le titulaire, à la qualité et au respect de l'environnement avec les autres fascicules du CCTG.
- Supprimer la partie gauche.

Méthode

Un groupe de travail réunissant :

- Des représentants du RST (Sétra, IFSTTAR, CETE...).
 - Des représentants des entreprises (Eiffage, Vinci, FNTP, SNBPE, CERIB...).
 - Des représentants des maîtres d'ouvrage et des maîtres d'oeuvre (DIR, CG, SNCF, EDF, Systra...).
- Un sommaire calqué sur la norme NF EN 13670.
Un sous-groupe par chapitre.
Des réunions mensuelles.

Calendrier

Démarré en avril 2011

Avancement : 80%

Finalisation prévue fin 2012 – début 2013

Mode de validation

- Validation par le GEM-OTM après enquête.
- Validation par l'OEAP.
- Signature des Ministres.

AVERTISSEMENT : les éléments présentés correspondent à l'état d'avancement actuel.

Sommaire du fascicule

Chapitre 1 : Domaine d'application

Chapitre 2 : Références normatives

Chapitre 3 : Termes et définitions

Chapitre 4 : Gestion de l'exécution

Chapitre 5 : Ouvrages provisoires (dont étaitements) et coffrages

Chapitre 6 : Armatures de béton armé

Chapitre 7 : Précontrainte

Chapitre 8 : Bétons et opérations de bétonnage

Chapitre 9 : Eléments préfabriqués

Chapitre 10 : Tolérances d'exécution

Chapitre 11 : Peintures

L'approche performantielle

Principes

- Introduire des garde-fous : les écarts par rapport à l'approche prescriptive sont bornés

Les manifestations régionales

- Laisser le choix entre les approches «absolue» et «performance équivalente».
- Se référer aux recommandations provisoires existantes.
- Les compléter et les amender en fonction des retours d'expérience.

Garde-fous

Référence : le tableau F de l'approche Prescriptive

- Le rapport Eeff/Liant équivalent ne doit pas dépasser la limite indiquée au tableau F (en fonction de la classe d'exposition) de plus de 0,10.
- La teneur en liant équivalent devra être au moins égale à 80 % de celle imposée au tableau F en fonction de la classe d'exposition.
- Le rapport maximal A/A+C pourra être supérieur à celui imposé au tableau F en fonction de la classe d'exposition, dans les limites suivantes en fonction de la nature du ciment de base :

Epreuve d'étude

Les résultats doivent être conformes pour toutes les grandeurs associées aux classes d'exposition.

Détermination des indicateurs généraux suivants en vue des épreuves de convenance et de contrôle :

- Porosité à l'eau à 28 jours en approche «absolue».
- Absorption d'eau à 28 jours en approche «performance équivalente».

Dispense par références probantes : au moins 3 prélèvements, tous conformes, dans chacune des épreuves d'étude, de convenance et de contrôle.

Epreuve de convenance

En approche « absolue » :

- $P_{\text{eau}}(\text{convenance})_{28j} < 1,1 \cdot P_{\text{eau}}(\text{étude})_{28j}$.
- Les résultats doivent être conformes pour toutes les grandeurs associées aux classes d'exposition.

En approche « performance équivalente » :

- $Ab_{\text{eau}}(\text{convenance})_{28j} < Ab_{\text{eau}}(\text{étude})_{28j} + 0,5$.
- Les résultats doivent être conformes pour toutes les grandeurs associées aux classes d'exposition.

Epreuve de contrôle

Indicateurs généraux mesurés tous les 500 m³ ou tous les mois, au premier terme échu.

Grandeurs associées aux classes d'exposition mesurées tous les 3 mois.

En approche « absolue » :

- $P_{\text{eau}}(\text{contrôle})_{28j} < 1,1 \cdot P_{\text{eau}}(\text{étude})_{28j}$
- Porosité à l'eau < 1,1* (Porosité à l'eau limite autorisée).
- Perméabilité au gaz < Perméabilité au gaz limite autorisée + 30 10⁻¹⁸.
- Coefficient de diffusion des chlorures < 1,3* (Coefficient de diffusion des chlorures limite autorisé).

En approche « performance équivalente » :

- $Ab_{\text{eau}}(\text{contrôle})_{28j} < Ab_{\text{eau}}(\text{étude})_{28j} + 0,5$.
- Porosité à l'eau < 1,1* (Porosité à l'eau limite autorisée).

- Absorption d'eau < (Absorption d'eau limite autorisée) + 0,5.
- Coefficient de diffusion des chlorures < 1,3*(Coefficient de diffusion des chlorures du béton de référence caractérisé lors de l'étude).
- Profondeur de carbonatation accélérée < min[1,5* (Profondeur de carbonatation accélérée du béton de référence caractérisé lors de l'étude), (Profondeur de carbonatation accélérée du béton de référence caractérisé lors de l'étude) + 5mm].
- Epaisseurs dégradées < min[1,5* (Epaisseurs dégradées du béton de référence caractérisé lors de l'étude selon l'essai de lixiviation à pH constant), (Epaisseurs dégradées du béton de référence caractérisé lors de l'étude selon l'essai de lixiviation à pH constant) + 1mm].

En résumé

Une dérogation partielle au tableau de l'approche prescriptive.

Des spécifications issues des recommandations provisoires mais adaptées en fonction des retours d'expérience :

- Seuils revus en approche « absolue ».
 - Béton de référence très encadré en approche « performance équivalente ».
- Epreuves de convenance renforcées au détriment des épreuves de contrôle pour anticiper les problèmes.

Une note importante...

« Lorsqu'il est fait appel à ces méthodes les différents intervenants doivent adopter les dispositions organisationnelles et mobiliser les capacités techniques et les compétences actualisées nécessaires à la conduite d'une telle démarche. »

Rôle du maître d'ouvrage

Pierre CORFDIR - DIR EST

Évolutions du rôle du MOA

Les Eurocodes remettent le maître d'ouvrage au coeur des décisions techniques.

L'Europe amène à avoir des exigences de performance plutôt que des exigences de moyens.

Le DD l'incite à aller vers des analyses sur le cycle de vie...-> investissement initial et entretien, exploitation, impact social, environnemental,...

-> Des responsabilités lourdes...il faut aider le MOA !

Le MOA gère la fiabilité de son ouvrage

1) Les exigences vraies du MOA :

- La durée de vie de l'ouvrage.
- La catégorie de l'ouvrage : importance économique (enjeux) et stratégique (conditions d'exploitation).
- Les conditions d'exploitation (salage,...).

2) Tous les éléments de contexte de l'ouvrage (indépendants du MOA) :

Les manifestations régionales

- Les conditions environnementales générales (classes d'exposition, gel, sol,...).

Aujourd'hui, le maître d'ouvrage définit les hypothèses qui conditionnent les classes d'exposition :

- Gel/dégel (température, salage,...).
- Carbonatation (pollution/ humidité).
- Chlorure (bord de mer, salage, humidité).
- Attaques chimiques (sol et eau).
- ...Et espère que son ouvrage sera durable.

Prescrire avec l'EUROCODE

L'eurocode et la NF EN206-1 aident le maître d'ouvrage avec 18 classes d'exposition.

Il est parfois clair : « sont à classer en XC4 les parties aériennes non protégées ».

Il est parfois moins clair : «sont à classer en XS1 les éléments de structure au-delà de la zone de classement XS3 et situées à moins de 1 km de la cote, parfois plus, jusqu'à 5 km, lorsqu'ils sont exposés à un air véhiculant du sel marin, suivant la topographie»...ou « classe 2 si hygrométrie supérieure à 80% ».

...Et avec des difficultés

- Le maître d'ouvrage a du mal à définir les éléments de contexte sur 100 ans : (salage dans 100 ans, climat,...???)
- Le MOA peut être tenté de se protéger par des exigences maximales : MOE et l'entrepreneur risquent de se retrouver dans l'impasse avec XF4, G+S, RSI, Cs.
- L'Eurocode (et l'actuel F65) n'aide pas le MOA à gérer sa prescription par le biais des compromis.

La quête du béton parfait ?

- L'équation impossible du béton « parfait »
- Résistance -> augmenter les dosages en ciment et prendre des ciments purs, plein de clinker type CEM I.
- Gel -> entraîneur d'air pour faire des « bulles ».
- Compacité -> enlever les bulles.
- RSI -> limiter l'échauffement donc prendre des ciments CEM III ou V.
- + les problèmes de rhéologie sur chantier.

L'approche performantielle

- L'approche performantielle offre au MOA des paramètres vrais
- Par exemple, pour la corrosion :
 - Porosité à l'eau.
 - Perméabilité au gaz.
 - Diffusion des chlorures.
- Et donc une meilleure maîtrise de la durée de vie et de meilleurs choix de compromis.
- Et une plus grande place à l'innovation des bétons.

Conditions d'application de la démarche performantielle

- Une démarche encore innovante : à conduire avec un bon maître d'oeuvre, en laissant un peu de temps (avec des essais à 90 jours) !

- Définir les aléas contre lesquels lutter (température, sel,...) par partie d'ouvrage.
- Choisir en conséquence les indicateurs de durabilité et les seuils à respecter.
- S'assurer de la faisabilité d'un tel béton.
- Définir des critères de réception de l'ouvrage vis-à-vis des bétons.

Approche performantielle : intérêts pour les gestionnaires

Ouvrages existants

- Analyser l'état de l'ouvrage (diagnostic).
 - Evaluer la durabilité résiduelle de l'ouvrage.
 - Contrôler et suivre les bétons dans le temps.
 - Prédire l'évolution future de l'ouvrage (pronostic).
- Méthodologie complète pour la spécification, l'évaluation et la prédiction.
Mais, les seuils présentés dans le guide LCPC sont-ils aujourd'hui toujours atteignables ?

Approche performantielle de la durabilité des ouvrages d'art en béton

Application du guide LPC : démarche, principes et limites

Bruno GODART – IFSTTAR

L'APPROCHE PERFORMANTIELLE

Une démarche innovante, globale et prédictive de la durabilité des structures en béton armé, basée sur :

- la notion d'indicateurs de durabilité
 - une démarche scientifique (modèles calibrés des différentes dégradations prises en compte)
 - si possible, des formules locales de béton pré-qualifiées (pour éviter des dérives en matière d'économie et de délais)
- qui nécessite que le maître d'ouvrage définisse (comme normalement prévu pour une conception selon les Eurocodes) :
- la durée de vie souhaitée de son ouvrage
 - les fonctions de son ouvrage (utilisation, enjeu,...)
 - l'environnement local et l'exploitation attendue

UTILITÉ DE L'APPROCHE PERFORMANTIELLE

- meilleure prise en compte du contexte local de l'ouvrage : utilisation des matériaux locaux, meilleure adaptation des formules de béton aux conditions environnementales
- meilleure maîtrise de la « durée de vie » (élément du contrat)
- meilleure adaptation aux exigences du développement durable
- démarche favorisant l'innovation

Elle résout le problème des limites de l'Approche Prescriptive

- qui multiplie les référentiels prescriptifs
- et peut aboutir à des exigences de moyens difficiles à concilier (par exemple, le conflit Gel – RSI)

Les manifestations régionales

CONTEXTE NORMATIF D'APPLICATION DE L'APPROCHE PERFORMANTIELLE

- une méthode visée dans les textes normatifs ou contractuels :

NF EN 1992-1-1 (note (1) du tableau 4.3 NF)

NF EN 206-1 (article 5.3.3 et annexe J)

Fascicule 65 (commentaire 81.2.2)

- mais dont la mise en oeuvre détaillée a nécessité un guide recommandations provisoires en date de mars 2010

Evitant la difficulté du recours à un « béton de référence » nécessité par le « concept de performance équivalente » prévu à l'annexe 5.2.5.3 de la norme NF EN 206-1 et son annexe E

Utilisation de l'approche :

- Choix du maître d'ouvrage sur proposition du maître d'oeuvre, ou
- Proposition de l'entreprise validée par le maître d'ouvrage, dans la mesure où le marché a ouvert la possibilité et où la démarche proposée est respectée

LE GUIDE (support de cet exposé)

Document issu d'un groupe de travail du réseau des LPC (17 participants)

Amélioré par un groupe de 19 relecteurs externes

(Sétra, instituts de recherche, DIR, profession...)

MISE EN OEUVRE DE L'APPROCHE PERFORMANTIELLE

Les 6 étapes de la démarche

- Choix de la durée d'utilisation du projet
- Prise en compte des conditions environnementales et des principaux risques de dégradation
- Choix des classes d'exposition et des niveaux de prévention
- Sélection des indicateurs de durabilité et des spécifications « performantielles » associées
- Formulation des bétons - épreuves d'étude
 - ➔ vérifications de l'atteinte des performances des formules
- Réalisation des épreuves de convenance et de contrôle
 - ➔ vérifications des performances des formules mises en oeuvre
- Point zéro durabilité et suivi (témoins de durée de vie)

1 - Choix de la durée d'utilisation du projet

Eurocode 0 (NF EN 1990) : choix de la durée d'utilisation du projet (DUP) = 100 ans pour les ponts (avec maintenance normale et adaptée)

Au delà de 100 ans, adaptation nécessaire des seuils des indicateurs de durabilité

DUP : Il s'agit de la période au cours de laquelle la structure est censée rester normalement utilisable en étant entretenue, mais sans qu'il soit nécessaire de procéder à de grosses réparations.

2 - Prise en compte des conditions environnementales et des principaux risques de dégradation

Choix des classes d'exposition (description des conditions environnementales)

L'approche performantielle permet de prendre en compte :

- le risque de corrosion des armatures (XC, XD, XS)
- l'attaque par le gel et les sels (XF)
- les risques d'alcali-réaction et de RSI

Mais elle ne prend pas en compte les attaques chimiques d'origine externe -> se référer pour cela aux prescriptions de la norme NF EN 206-1, du fascicule 65 et du fascicule de documentation FD P

18 011 (notamment pour le milieu marin ou pour les fondants avec sulfates où les ciments PM restent imposés)

3 - Sélection des indicateurs et des spécifications associées

Vis à vis du risque de corrosion des armatures

Trois Indicateurs principaux :

- Porosité accessible à l'eau : P_{eau} en %
- Perméabilité aux gaz : K_{gaz} en $10^{-18} m^2$
- Coef. de diffusion des chlorures : D_{app} en $10^{-12} m^2s^{-1}$

+ mesure de résistivité (pour les épreuves d'études, de convenance et de contrôle)

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

Possibilité de minorer la classe structurale de 2 (EN 1992 tab 4.3NF)

Classe d'exposition	DUP de 100 ans	Seuils des indicateurs à 90 jours	Exemples de partie d'ouvrage
XC1 sec ou humide en permanence XC2 humide rarement sec		$P_{eau} < 15$	Fondations (immergées ou non) Parties enterrées des appuis
XC3 humidité modérée XC4 alternance d'humidité et de séchage		$P_{eau} < 13$ ET $K_{gaz} < 150$	Bétons protégés par une étanchéité Bétons exposés à l'air
XS1 Exposé à l'air véhiculant du sel marin XS2 Immergé en permanence dans l'eau de mer XD1 exposé à des chlorures non marins transportés par voie aérienne XD2 Humide rarement sec, béton exposé à des eaux industrielles contenant des chlorures		$P_{eau} < 13$ ET $D_{app} < 7$	Ouvrage à proximité d'une côte Partie d'ouvrage immergée en permanence dans l'eau de mer Zones d'un ouvrage faiblement exposées aux sels de déverglaçage (semelles ou radiers non profonds à proximité de ou sous voies fréquemment salées)
XD3 Alternance d'humidité et de séchage, béton exposé à des projections contenant des chlorures XS3 Zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns		$P_{eau} < 11$ ET $K_{gaz} < 150$ ET $D_{app} < 3$	Piles d'un ouvrage très exposées aux sels de déverglaçage Ouvrage soumis aux embruns (à moins de 100 m de la côte dans le cas général) Zones de marnage

Spécifications face aux dégradations dus au gel et aux sels de déverglaçage :

	Zone de gel modéré	Zone de gel sévère
Salage peu fréquent	XF 1 Pas de spécifications propres au gel (se reporter au tableau corrosion – classe XC4)	XF3 (G) $L_{bar} \leq 250 \mu m$ $\Delta \epsilon \leq 400 \mu m/m$ $f^2 / f_0^2 \geq 75\%$ $f_{c28} \geq 30 MPa$
Salage fréquent	XD3 (se reporter au tableau corrosion) XD3 + XF2 pour les éléments très exposés (teneur en air $\geq 4\%$)	XF4 (G+S) $L_{bar} \leq 200 \mu m$ $E_c \leq 600 g/m^2$ $\Delta \epsilon \leq 400 \mu m/m$ $f^2 / f_0^2 \geq 75\%$ $f_{c28} \geq 35 MPa$
Salage très fréquent	XF4 (G+S)	XF4 (G+S)

Indicateur vis-à-vis de la réaction sulfatique interne (RSI) :

- Température du béton, T_{max} en °C.

Classes d'exposition	Niveau de prévention/Critère (pour un ouvrage courant)	Exemple
XH2 Alternance d'humidité et de séchage, humidité élevée	Bs $T_{max} < 75^{\circ}\text{C}$ <i>ou</i> $T_{max} < 85^{\circ}\text{C}$ et critère de performance en expansion <i>ou</i> $T_{max} < 85^{\circ}\text{C}$ et conditions sur choix du ciment	Piles et tabliers
XH3 En contact durable avec l'eau immersion permanente, stagnation d'eau à la surface, zone de marnage	Cs $T_{max} < 70^{\circ}\text{C}$ <i>ou</i> $T_{max} < 80^{\circ}\text{C}$ et critère de performance en expansion <i>ou</i> $T_{max} < 80^{\circ}\text{C}$ et conditions sur choix du ciment	Pieux et semelles de fondation

Spécifications ou indicateurs vis-à-vis de l'alcali-réaction :

- Utilisation de granulats non réactifs ;
- Bilan des alcalins contenus dans le ciment.

ou

- Essai de performance : $D_e < 0,020\%$

Concernant les formulations des bétons et les épreuves d'étude, l'attention est attirée sur le fait que certains essais demandent une durée de mûrissement de 90 jours, ce qui confirme l'anticipation nécessaire à l'application de l'approche performantielle. Ensuite, le fournisseur de béton doit disposer de capacités techniques et de compétences, éléments à anticiper et à intégrer dans le PAQ de l'opération. Pour aller dans le sens des 2 remarques précédentes, on voit tout de suite l'intérêt de disposer de formules préqualifiées ayant des références probantes d'emploi avec mesures des indicateurs.

4 - Formulation des bétons et épreuves d'études

Attention particulière => durée de mûrissement de 90 jours pour certains essais

Prise en compte de la démarche dans le PAQ de l'opération (compétences, moyens, modes opératoires d'essai...)

=> Le fournisseur de béton doit disposer de capacités techniques et de compétences

Intérêt de disposer de formules locales préqualifiées

=> Concept de références probantes d'emploi disposant de mesures des indicateurs

5 - Epreuves de convenance et de contrôle

Formalisation des critères d'acceptation

Epreuves de convenance :

$$P_{eau}(\text{convenance})_{28j} < 1,1 P_{eau}(\text{étude})_{28j}$$

$$\rho(\text{convenance})_{28j} > 0,8 \rho(\text{étude})_{28j}$$

Epreuves de contrôle

Epreuves de contrôle à 28 jours	Epreuves de contrôle à 90 jours
$\rho(\text{contrôle})_{28j} > 0,8\rho(\text{étude})_{28j}$	$P_{eau}(\text{contrôle})_{90j} < P_{eau}(\text{spécifiée au marché})_{90j}$
$P_{eau}(\text{contrôle})_{28j} < 1,1 P_{eau}(\text{étude})_{28j}$	$K_{gaz}(\text{contrôle})_{90j} < K_{gaz}(\text{spécifiée au marché})_{90j}$
	$D_{app}(\text{contrôle})_{90j} < D_{app}(\text{spécifiée au marché})_{90j}$

6 - Point zéro durabilité

- Réception de l'ouvrage avec initiation du suivi dans le temps
- Établissement par parties d'ouvrage d'une synthèse «durabilité » spécifications attendues, indicateurs retenus et seuils, mesures des indicateurs, mesures des enrobages)
- Définition des parties d'ouvrage qui feront l'objet d'un suivi de durabilité (nature et périodicité selon conditions d'exposition)
- Inspections ciblées avec mesure des témoins de durée de vie

Exemples de témoins de vie

Carbonatation :

Evaluation de la profondeur de carbonatation (zone ou pH < 9) ou Evolution du profil de teneur en CaCO₃

En présence de chlorures :

Profondeur de pénétration des chlorures (zone ou [Cl-] > [Cl-] crit) ou Évolution du profil de chlorures

EN GUISE DE CONCLUSION

L'approche performantielle est ...

- une façon de répondre à l'enjeu croissant de durabilité dans un cadre rationnel et «contractuel»
- un choix de maîtrise d'ouvrage, à assumer (en cohérence avec la responsabilisation issue des Eurocodes)
- une approche « rôdée » dans le cadre de grands ouvrages concédés (justification de durabilité)

La nécessaire anticipation de la problématique «matériau» : une contrainte qui peut être une chance ? L'approche performantielle ne dispense ni de bonne conception, ni de qualité d'exécution, ni de contrôle, ni d'entretien...

Principales limites

- Des références pour l'instant un peu limitées à de grands ouvrages à longue durée de vie

- Des applications à des ouvrages plus courants sont en cours

- Contraintes de durée et coût initial des études et essais associés

- Durée difficilement compressible des essais
- Délais d'organisation en rodage, réduits pour des formules préqualifiées

- Recul limité sur la variabilité et la métrologie des indicateurs et le lien avec les modèles

- Recherches sur les modèles encore en progrès et base de données en cours de constitution au niveau national pour améliorer la prise en compte de la dispersion

Mais l'approche prescriptive a aussi les siennes...

Pour une bonne application (quelle que soit l'approche), des questions restent ouvertes

- Comment anticiper la vie de l'ouvrage dès la conception ?

Un effort spécifique du maître d'ouvrage et du maître d'oeuvre et de dialogue avec le futur exploitant

- Comment organiser la prise en compte de la durabilité, de la conception à l'exécution du projet ?

Un effort dans la définition des spécifications d'exécution (cf. NF

EN 13670), le contrôle extérieur (études et exécution)... et la formation des intervenants

- Comment se placer dans une analyse globale, en lien avec la gestion durable du patrimoine ?

Les manifestations régionales

Des dispositions de choix des offres favorisant effectivement une vision responsable sur l'ensemble de la vie de l'ouvrage : à prévoir, améliorer ou inventer ?

Indicateurs de durabilité : essais et seuils

Paul ALLEGRE - CETE de l'Est

1. Les différents indicateurs

Les dégradations du béton :

- Corrosion des armatures.
- Réactions de gonflements internes (RSI & RAG).
- Effets du gel.

2. Les essais

• Corrosion des armatures :

- Résistivité électrique (r) : l'échantillon est placé entre 2 éponges reliées à des électrodes. Principe : moins le béton est poreux → Moins il contient de liquide → Moins l'échantillon est conducteur → Plus la résistivité électrique est grande.

- Coefficient de diffusion apparent des chlorures (D_{app}) : cela revient à mesurer la migration des ions chlorures sous champ électrique. En fin d'essai, les éprouvettes sont fendues afin d'apprécier la profondeur de pénétration.

- Porosité accessible à l'eau (P_{eau}) : l'échantillon est saturé en eau, et la porosité est donnée par la relation suivante :

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

- Perméabilité au gaz (K_{gaz}) : l'échantillon est soumis à un gradient de pressions de gaz, et la perméabilité est obtenue en mesurant le flux de gaz traversant.

• Réaction de gonflement interne :

- Alkali-réaction : la formule de béton est testée durant 5 mois dans des conditions accélérant le phénomène (augmentation du taux d'alcalins, atmosphère saturée, température élevée), avec mesure des déformations longitudinales ;

- RSI : application d'un traitement thermique en enceinte climatique, avec 2 cycles de séchage et d'humidification, puis mesure des déformations longitudinales pendant 12 mois.

- Effets du gel : selon l'intensité du gel et la fréquence de salage, les paramètres à mesurer sont à choisir parmi :
 - Teneur en air occlus sur béton frais, mesurée au microscope ;
 - Facteur d'espacement des bulles d'air, mesurée au microscope ;
 - Ecaillage : mesure de la masse d'écaillés recueillies après application de cycles de chauffage - refroidissement ;
 - Essai de performance vis-à-vis du gel interne : mesure des déformations et fréquence de résonance d'éprouvettes soumises à des cycles gel - dégel ;
 - Résistance à la compression à 28 jours.

Recommandations pour la rédaction des CCTP

Davy PRYBYLA - CETE de l'Est

Dispositions générales

Le Maître d'ouvrage doit définir :

- La durée de service de l'ouvrage : 100 ans pour les OA,
- Le niveau de prévention vis à vis des risques liés à l'alcali-réaction,
- Le niveau de prévention vis à vis de la réaction sulfatique interne :
- Les dispositions particulières relatives à la durabilité des bétons durcis soumis au gel et aux sels de déverglaçage,

Choix des classes d'exposition

Les classes d'exposition

X0 : Aucun risque de corrosion, ni d'attaque (gel/dégel, abrasion, attaque chimique)

XC : Corrosion induite par carbonatation

XC1 : Sec ou Humide en permanence

XC2 : Humide rarement sec

XC3 : Humidité modérée

XC4 : Alternance humidité et de séchage

XF : Attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage

XF1 : Gel faible ou modéré sans agent de déverglaçage

XF2 : Gel faible ou modéré avec agent de déverglaçage

XF3 : Gel sévère sans agent de déverglaçage

XF4 : Gel sévère avec agent de déverglaçage

XS : Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer

XS1 : Exposé à l'air véhiculant du sel marin mais pas en contact direct avec l'eau de mer. Structures situées à moins d'1 km de la côte.

XS2 : Immergé en permanence

XS3 : Zones de marnage, zones soumises des projections

Les manifestations régionales

XD : Corrosion induite par des chlorures ayant une origine autre que marine

XD1 : Humidité modérée

XD2 : Humide, rarement sec

XD3 : Alternance d'humidité et de séchage

XA : Attaque chimique

XA1 : Environnement à faible agressivité chimique

XA2 : Environnement d'agressivité chimique modérée

XA3 : Environnement à forte agressivité chimique

Détermination de l'enrobage

Classe structurale = S4 ; DUP = 100 ans donc majoration de 2 classes = S6.

Hypothèse : enrobage compact (tableau 4.3NF NF EN 1992-1-1 /NA)), minoration d'une classe = S5, pas d'hypothèse sur la nature du liant.

Définition des bétons

Seuils d'acceptabilité des indicateurs par parties d'ouvrage (selon futur fascicule 65)

Epreuves d'études

- une gâchée nominale avec :
 - 1 essai de consistance (et de maintien de consistance pendant la DPU),
 - 3 éprouvettes pour essai de résistance à la compression à 28 jours,
 - 3 éprouvettes 11x22 pour mesures des indicateurs de durabilité,
- Pour la prévention de la RSI, dans le cas où la température Tmax évaluée selon les méthodes préconisées par les Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne du béton (LCPC, 2007) se situe à moins de 5°C de la valeur du seuil de température à considérer, une mesure de calorimétrie permettant de confirmer l'exothermie du béton et de vérifier les dispositions à prendre par rapport aux éventuelles pièces critique
 - dans la perspective des épreuves de contrôle :
 - porosité à l'eau à 28 jours dans le cas de la méthode de conception performantielle
 - absorption d'eau à 28 jours dans le cas du concept de performance équivalente.

• Gâchées dérivées : évaluation de la sensibilité de la formule au dosage des constituants du béton,

- par une modification de la quantité d'eau de gâchage, respectivement de plus et de moins 10 litres,

Et éventuellement

- par une modification du rapport entre le poids de sable et le poids total des granulats, respectivement de plus et de moins 10 pour 100 ;
- par une modification de la quantité de ciment de plus ou moins 20 kg par mètre cube de béton ;

- par une modification du dosage des adjuvants, compatible avec leur zone d'efficacité.

Sur chaque gâchée dérivée, le même programme d'essai que pour la gâchée nominale

Epreuves de convenance

- sur une gâchée nominale (ou sur le mélange de 3 gâchées nominales)
- cas de la méthode de conception performantielle :
- $P_{\text{eau}}(\text{convenance})28j < 1,1 \cdot P_{\text{eau}}(\text{étude}) 28j$,
- $\rho(\text{convenance}) 28j > 0,8 \cdot \rho(\text{étude}) 28j$.
- cas du concept de performance équivalente :
 $Ab_{\text{eau}}(\text{convenance})28j < Ab_{\text{eau}}(\text{étude}) 28j + 0,5$,

Les résultats de l'épreuve de convenance constituent un point d'arrêt.

Epreuves de contrôles

Critères de conformité sont les suivants :

- dans le cas de la méthode de conception performantielle :
 - $P_{\text{eau}}(\text{contrôle})28j < 1,1 \cdot P_{\text{eau}}(\text{étude}) 28j$,
 - $P_{\text{eau}}(\text{contrôle}) < 1,1 \cdot P_{\text{eau}}(\text{limite})$
 - $K_{\text{gaz}} < K_{\text{gaz}} \text{ limite} + 30 \cdot 10^{-18}$
 - $D_{\text{app}} < 1,3 \cdot D_{\text{app}} \text{ limite}$

Les manifestations régionales

- dans le cas du concept de performance équivalente :
 - $Ab_{\text{eau}}(\text{contrôle})28j < Ab_{\text{eau}}(\text{étude}) 28j + 0,5$,
 - $P_{\text{eau}}(\text{contrôle}) < 1,1 \cdot P_{\text{eau}}(\text{limite})$
 - $Ab_{\text{eau}} < Ab_{\text{eau}} \text{ limite} + 0,5$
 - $D_{\text{app}} < 1,3 \cdot D_{\text{app}} \text{ limite}$
 - Profondeur de carbonatation accélérée $< 1,5 \cdot (\text{Profondeur de carbonatation accélérée du béton de référence caractérisé lors de l'étude})$ et (Profondeur de carbonatation accélérée du béton de référence caractérisé lors de l'étude) +5mm.

Doublement du viaduc de Volesvres

Christophe AUBAGNAC - CETE de Lyon

Christophe AUBAGNAC présente une application concrète de l'approche performantielle, avec le Viaduc de Volesvres. La DIR Centre Est en a été le moteur afin de tester l'application de la démarche pour la rendre contractuelle « à terme » ; en effet, vu de la part d'un exploitant de réseau routier, il est intéressant d'obtenir la plus grande durée d'utilisation avec le moins d'interventions possibles.



L'ouvrage, d'une longueur totale de 206 mètres avec 5 travées de 32 à 52 mètres, est constitué d'un tablier en caisson mixte de hauteur constante reposant sur des piles et culées fondées sur pieux.

L'approche performantielle a été appliquée au béton des appuis et du hourdis, dont les classes d'exposition sont XC4/XF1. Il a donc été établi un programme de contrôle, conformément aux recommandations provisoires du LCPC, et 4 laboratoires (CETE et cimentiers) ont été associés au projet afin de mesurer la convergence des essais.

Mises à part quelques valeurs « absurdes », les laboratoires ont montré une bonne cohérence, la valeur de porosité à l'eau se révélant systématiquement supérieure au seuil d'acceptabilité.

Finalement, les premières conclusions et pistes dégagées sont :

- Une bonne adhésion des acteurs, avec une information préalable indispensable ;
- Une nouvelle donne pour le couple « entreprise – bétonnier » ;

- Un enjeu pour trouver une optimisation technico-économico-environnementale des formules ;
- Une anticipation indispensable pour assurer la gestion des délais sur chantier (durée de mûrissement de 90 jours préalable à la mesure des indicateurs de durabilité), avec recours à des formules régionales préqualifiées ;
- Une besoin de développer le nombre de laboratoires capables de réaliser les essais.

Retour d'expérience du viaduc de Volesvres

Rémy CHARPENTIER – SNBPE

Produire des bétons pour les ouvrages d'art contribue à :

- Intensifier la fierté de l'âme du constructeur ;
- Professionnaliser l'équipe ;
- Trop rarement améliorer la rentabilité du producteur.

LE BETONNIER ACTEUR ET PARTENAIRE

Un indispensable travail doit être réalisé très en amont avant le début du chantier.

Objectif : Le meilleur compromis

- Conformité aux prescriptions du CCTP.
- Adapter le béton aux besoins de l'entrepreneur consistance, ouvrabilité, granulométrie, perméabilité, montée en température,...
- Optimisation économique, raisonner sur la base du bilan, béton mis en place sans se focaliser sur le coût du m³.

L'impact de l'approche performantielle

- Perméabilités = recherche d'une haute compacité de la pâte du béton durci.
- RSI = maîtrise de la montée en température en fonction de l'exposition retenue.

Perméabilités

- Diminution du E/C, tendre vers 0.4.
- Maximiser la formation des hydrates.
- Augmentation du G/S en fonction des caractéristiques du sable.

Stratégie adjuvant(s) primordiale.

RSI : les conditions

- Classe d'exposition.
- Période des coulages.
- Dimension des pièces à couler.
 - ➔ Suivi de la montée en température sur une pièce d'essai.

RSI : les solutions

- Choix du ciment.
- Dosage en ciment.
- Stratégie adjuvant(s).

Les manifestations régionales

Refroidissement : matières premières, coffrages, serpents...

Conséquences 1

- Pour le béton : perte de robustesse et de rusticité de la formule.
- Forte réactivité aux fluctuations de température et des matières premières.
- Maîtrise délicate de la consistance.
- Réglages et suivis du béton avant et pendant chaque coulée.

Conséquences 2 : les coûts

- Prévoir un poste significatif pour les essais.
- Prévoir le suivi par le laboratoire lors de chaque coulée.

Remarque

Le béton reste le matériau le plus économique, moulable à froid, souvent 20 fois moins cher que l'acier.

Evaluation de la durée de vie résiduelle d'un ouvrage en service

Davy PRYBYLA - CETE de l'Est

Problématique : Patrimoine vieillissant qui se dégrade plus ou moins rapidement selon :

- ✓ les propriétés intrinsèques du matériau,
- ✓ la qualité de mise en oeuvre à la construction,
- ✓ l'entretien,
- ✓ les conditions d'exposition

Le gestionnaire a besoin d'informations fiables pour :

- évaluer l'état de son patrimoine,
- évaluer l'état d'avancement des dégradations,
- déterminer le moment optimum pour réaliser des actions de maintenance préventive (donc avant l'apparition de désordres),

Informations fiables = application de l'approche performantielle sur des ouvrages en service

Définition de la durée de vie résiduelle

Durée de vie résiduelle du béton vis-à-vis d'un phénomène particulier correspond à la phase d'incubation (pas de symptôme) de ce phénomène.

Durée au bout de laquelle la propagation du phénomène s'amorce.

Estimation de la durée de vie résiduelle

Mesure des indicateurs de durabilité

Objectif : pour les armatures en phase d'incubation, savoir en combien de temps la corrosion s'initiera

Choix du modèle prédictif : Approche classique : diffusion selon lois de Fick.

Conclusions et perspectives

L'approche performantielle est à la fois un outil de diagnostic et de pronostic.

- Témoins de durée de vie = diagnostic de l'avancement de la corrosion
- Indicateur de durabilité = évaluer à quelle vitesse la corrosion va s'amorcer
- Evolution des témoins de durée de vie : développement de méthodes non destructives (par exemple techniques RADAR pour déterminer les profils de chlorures ?)
- Evolution des indicateurs de durabilité : Nouveaux indicateurs ?
- Evolution des modèles de transfert : utilisation de modèle prédictif plus précis couplant les phénomènes qui interagissent entre eux.

Perspectives de développement de l'approche performantielle

Christian LEFEBVRE - CG Moselle

Evolution des réglementations

- BA 68
 - Performance = Résistance
 - Dispositions constructives
- BAEL 83 révisé 99
 - Calculs aux états limites.
- Harmonisation européenne : Eurocodes
 - Nouvelles normes.
 - Durée d'utilisation.
 - Contraintes d'environnement.
 - Protection contre la corrosion.

Le rôle du Maître d'Ouvrage

- Définir la durée d'usage
 - Eternité ...?
 - 6 ans ?
 - On propose 100 ans.
- Définir les conditions d'utilisation
 - Sel ou pas ? Gel ou pas ?
- Faire des choix prescriptifs
 - Nécessité de s'entourer de « sachants ».
 - Attention aux incohérences.
- Intégration des contraintes nouvelles
 - Délais d'études supérieurs.
 - Attentif au dispositif de suivi permanent.
- Eviter les risques
 - Dépendance aux « sachants ».
 - Rupture de concurrence.

Conditions de réussite

- Faire passer ces réflexions de spécialiste auprès :
 - Des Maîtres d'ouvrage.
 - Des Maîtres d'oeuvre.
 - Des entreprises.

Les manifestations régionales

- Nécessité d'engager un important programme de formation des ingénieurs et techniciens.
- Besoin de « cibler » la méthode sur certains ouvrages ?
- Révision de la constitution des dossiers d'ouvrages
 - Méthodologie de suivi pour les exploitants.
- Veiller à ne pas générer de rupture de concurrence.
- Etre attentif aux démarches similaires développées en Europe : le « modèle » français doit rester compétitif.
- Ne pas perdre de vue l'essentiel : L'acte de Construire

Synthèse et conclusion

Pierre CORFDIR - DIR EST

Synthèse globale

- La méthode de l'approche performantielle est opérationnelle : un guide, des pièces écrites types, de premiers retours d'expérience
- Elle nécessite une action volontariste de la Moa et un affichage clair vis à vis des acteurs. Le MOA ne doit pas être un mou.
- Elle offre des perspectives extrêmement intéressantes dans une logique DD (gestion de la durabilité, choix des ciments,...)

Quelques précautions...

Cette méthode ne doit pas être un prétexte à l'abandon des règles de l'art issues de l'expérience (cure, modalités de mise en œuvre et de décoffrage, normes sur les constituants,...)
Attention, c'est toute la chaîne MOA / MOE / BE / Entrepreneurs/Producteurs de bétons qui doit évoluer et travailler ensemble....

Un processus à suivre...

- Affiner les référentiels d'aléas (salage peu fréquent (<10j) / fréquent au delà ; le gel,...).
- Besoin de retours d'expérience pour affiner le calage des seuils (selon les types de ciment, optimum économique,...).
- Préciser et fiabiliser les modes opératoires des essais pour réduire encore la dispersion.
- Tenir compte des disponibilités locales pour prescrire les bétons (centrales, ciment PM, granulats,...).
- Continuer la recherche....

Perspectives

L'approche performantielle ouvre de nouvelles voies :

- Recherche d'optimisations : bétons écologiques, économiques et durables, ...
- Evolution de la commande publique (vers un achat en réception ?)
- Favoriser les évolutions par un intéressement des acteurs (BPE et entreprises) aux optimisations ?
- Avoir des critères de jugement des offres en lien avec l'approche performantielle ?