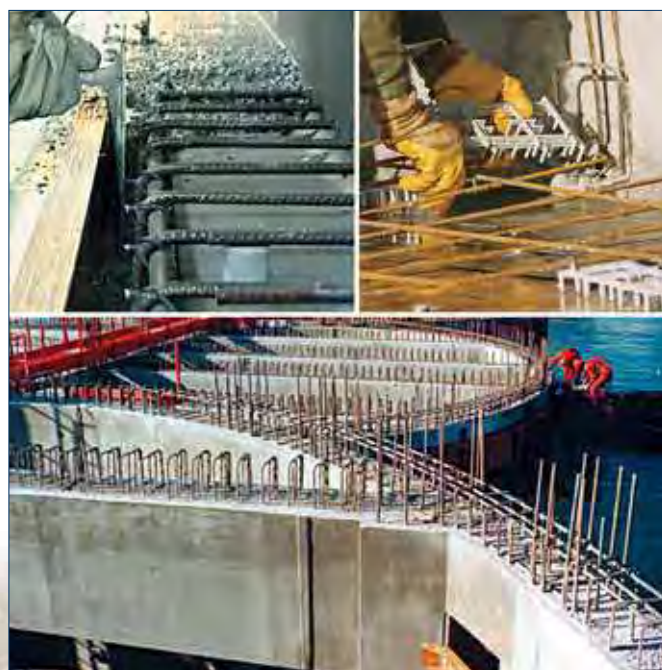


techniques et méthodes
des laboratoires des ponts et chaussées



Guide technique

Structures en béton conçues avec l'Eurocode 2

**Note technique sur les
dispositions relatives à l'enrobage
pour l'application en France**

Les collections du LCPC

Le libre accès à l'information scientifique est essentiel pour favoriser la circulation du savoir et pour contribuer à l'innovation et au développement socio-économique. Pour que les résultats des recherches soient plus largement diffusés, lus et utilisés, l'Université Gustave Eiffel a fait le choix de numériser et de mettre à disposition en téléchargement gratuit, l'intégralité des ouvrages publiés dans les collections du LCPC de 1969 à 2014, du fait de son caractère patrimonial.

La collection « techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées »

Issus de l'expertise du réseau scientifique et technique (RST), les ouvrages publiés dans la collection « techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées » ont été conçus et rédigés en vue des applications sur le terrain par les professionnels du BTP. La collection se décline en deux séries : guide technique et méthode d'essai.

- La série « guide technique » réunit des synthèses de connaissances, fruits de groupes de travail nationaux associant partenaires publics et privés. Ces guides n'ont pas de valeur normative mais servent de support au développement des techniques.
- La série « méthode d'essai » réunit des méthodes à caractère normatif ou de recommandations. Les méthodes font l'objet d'une qualification par le service qualité du LCPC.

La collection « études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées »

La collection ERLPC « études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées » se décline en 8 séries thématiques : construction routière, environnement et génie urbain, géotechnique et science de la terre, mécanique et mathématiques appliquées, ouvrage d'art, physique chimie, sécurité et exploitation routières, sciences de l'ingénieur. Des mémoires de thèses ou d'habilitation à la direction de recherche, des résultats d'études générales et d'expérimentations en laboratoire et *in situ* ont été notamment publiés dans cette collection.

La collection « rapport de recherche du laboratoire central des ponts et chaussées »


De 1969 à 1990, les travaux de recherche les plus significatifs du LCPC ont été publiés dans la collection « rapport de recherche du laboratoire central des ponts et chaussées ». Cette collection historique a ensuite laissé la place à la collection « études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées ».


La collection « actes des journées scientifiques du laboratoire central des ponts et chaussées »


Les ouvrages de la collection « actes des journées scientifiques du laboratoire central des ponts et chaussées » regroupent les communications présentées par les intervenants à l'occasion de manifestations scientifiques organisées ou co-organisées par le LCPC.

Les ouvrages des collections du LCPC sont diffusés sous la licence Creative Commons CC BY-NC-ND. Cette licence ne permet que la redistribution non commerciale de copies identiques à l'original. Dans ce cadre, les documents peuvent être copiés, distribués et communiqués par tous moyens et sous tous formats.



 Attribution — Vous devez créditer l'œuvre et intégrer un lien vers la licence. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens possibles mais vous ne pouvez pas suggérer que l'Université Gustave Eiffel vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son œuvre.

 Pas d'utilisation commerciale — Vous n'êtes pas autorisé à faire un usage commercial de cette œuvre, tout ou partie du matériel la composant.

 Pas de modifications — Dans le cas où vous effectuez une adaptation, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant l'œuvre originale (par exemple, une traduction, etc.), vous n'êtes pas autorisé à distribuer ou mettre à disposition l'œuvre modifiée.

***Structures en béton
conçues avec l'Eurocode 2***

**Note technique
sur les dispositions relatives
à l'enrobage
pour l'application en France**

Guide technique

Novembre 2005



Laboratoire Central
des Ponts et Chaussées

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
58, bd Lefebvre, F 75732 Paris Cedex 15

Ce document a été rédigé par :

- ↳ François Toutlemonde (LCPC),
- ↳ André Coin (EGF-BTP).

Pour commander cet ouvrage :

**Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
DISTC-Diffusion des Éditions**

58, boulevard Lefebvre
F-75732 PARIS CEDEX 15

Téléphone : 01 40 43 50 20

Télécopie : 01 40 43 54 95

Internet : <http://www.lcpc.fr>

Prix : 22 Euros HT

En couverture :

- *Ferraillage maintenu par des écarteurs et nécessité d'un enrobage suffisant pour permettre le bétonnage (Photo : LCPC).*
- *Mise en place de cales pour assurer la position du ferraillage d'un élément horizontal (Remerciements : EGF-BTP).*
- *Contrôle des enrobages pour une structure à la mer (Photo : Bouygues TP - Remerciements : Chapitre ACI de Paris).*
- *Image de fond : Plafond d'un bâtiment ancien avec enrobage insuffisant (Photo : LRMH - Remerciements : Chapitre ACI de Paris).*

Ce document est propriété du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
et ne peut être reproduit, même partiellement, sans l'autorisation de son Directeur général
(ou de ses représentants autorisés)

© 2005 - LCPC
ISSN 1151-1516
ISBN 2-7208-0416-9

Préface

La norme européenne EN 1992-1-1, adoptée par le CEN le 16 avril 2004, constitue la référence prochaine pour le calcul des structures en béton. La norme française qui transposera cet Eurocode devra comporter, outre le texte adopté au niveau européen, une Annexe Nationale, précisant notamment les choix nationaux de paramètres ou dispositions destinés à s'appliquer pour les ouvrages et bâtiments à construire en France. Lors de la préparation de cette Annexe Nationale, d'importants travaux de justification et calibrage ont été menés, notamment sur les sujets où l'adoption des valeurs recommandées au niveau européen conduirait à des différences significatives en termes de sécurité ou d'économie par rapport aux usages antérieurs. Les dispositions relatives à l'enrobage, qui correspondent à l'ensemble des choix nationaux de la section 4 de l'Eurocode « durabilité et enrobage des armatures », font partie de ces sujets.

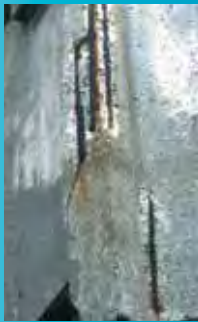
À la demande de M. Jacques Cortade, Président de la commission de normalisation BAEL/BPEL/EC2, un groupe de travail, comportant notamment des représentants du LCPC, du CERIB et d'EGF-BTP, a élaboré à partir d'octobre 2003 les éléments de l'Annexe Nationale française sur ce sujet, éléments qui ont été validés lors de réunions successives de la commission et de façon définitive dans sa séance du 28 juin 2005. À l'occasion de cette élaboration, un dossier technique a été constitué, permettant de comprendre les choix effectués et d'en vérifier le bien-fondé. Des données techniques ont notamment été fournies à cet effet par EDF, le CERIB et le LCPC, et les auteurs tiennent ici à remercier Mme Danièle Chauvel, M. Patrick Rougeau et Mme Véronique Baroghel-Bouny, ainsi que M. Roger Lacroix. Il a également été tenu compte des points de vue spécifiques portés par l'association ID Inox, Cimbéton ou le SNBPE. La relecture de MM. Bruno Godart, Thierry Kretz, Henry Thonier, François Cussigh et Daniel Devillebichot, que les auteurs remercient également, a contribué à l'amélioration technique et formelle du projet.

Ce dossier est proposé ici dans son intégralité, dans un but pédagogique vis-à-vis de l'application raisonnée de l'Eurocode 2, dans la mesure où se trouve prolongé et complété le nouveau cadre de description de l'environnement des ouvrages issu de l'EN 206, et que son application est étendue ici à la protection des armatures.

François Toutlemonde
LCPC

André Coïn
EGF-BTP

Jacques Cortade
Président de la Commission
EC2/BAEL/BPEL



Sommaire

Préface	3
Résumé	6
Introduction	9
Objet	9

Partie 1	11
<i>Les prescriptions françaises de 1906 à 2004</i>	

Partie 2	25
<i>Le choix actuel des paramètres nationaux</i>	

Partie 3	33
<i>Le retour d'expérience français et la justification des dispositions de l'Annexe Nationale</i>	

Principes	35
Précisions sur les classes d'exposition	35
Modulations de la classe structurale	38
Prise en compte des conditions et des choix de réalisation	40
Autres dispositions et modifications	43
Comparaison entre le calibrage et le retour d'expérience	44

Partie 4	51
<i>L'incidence économique en cas d'adoption des valeurs recommandées de l'EN 1992-1-1 : 2004</i>	

Résumé

Le dossier que constitue ce guide technique a pour objet de justifier le bien fondé du projet d'Annexe Nationale de l'EN1992-1-1 pour ce qui concerne **l'enrobage minimum des aciers vis-à-vis de l'exigence de durabilité**, projet qui ne reprend pas totalement les valeurs recommandées au niveau européen dans le choix des valeurs numériques laissé au niveau national.

Une première partie liste de la façon la plus exhaustive possible toutes les prescriptions françaises, relatives à l'enrobage minimum des aciers vis-à-vis de l'exigence de durabilité, depuis le premier texte de 1906 jusqu'à 2004.

On peut y constater une assez bonne permanence des points suivants :

- Classification en trois catégories d'exposition.
 - Ouvrages exposés à une atmosphère agressive ou en milieu marin.
 - Ouvrages exposés aux intempéries ou aux condensations.
 - Ouvrages dans des locaux couverts et non exposés aux condensations.
- Constance dans le temps des enrobages les plus faibles, soit 1 cm, dans le cas de la troisième catégorie, compte tenu d'un retour d'expérience de l'ordre de cent ans considéré comme satisfaisant.
- Augmentation dans le temps des enrobages les plus forts, soit 5 cm actuellement, dans le cas de la première catégorie, compte tenu d'une expérience croissante des structures soumises à des environnements très agressifs.

Une deuxième partie explicite le choix des paramètres retenus dans l'Annexe Nationale dans le cadre d'appréciation laissé par l'Eurocode 2 partie 1-1.

L'EN 1992-1-1 se réfère à l'EN 206-1, par son tableau 4.1 et les points suivants ont été précisés :

- Les exemples informatifs des classes d'exposition ont été rendus normatifs compte tenu de précisions visant à cerner le cas des ouvrages les plus courants et les frontières entre certaines classes d'exposition, en particulier :
 - Les ouvrages de bâtiments sont essentiellement en XC1, XC3 ou XC4, et les critères retenus, en cas de doute subsistant, sont d'une part le risque de condensations importantes en fréquence et durée (et non pas le taux d'humidité relative) qui pourrait conduire à la classe XC3 au lieu de la classe XC1, et l'exposition directe à la pluie qui conduit à retenir la classe XC4.
 - Les frontières des classes XS1 et XS3 exprimées par référence à la distance de la côte.
 - Les classes d'exposition XF en fonction des types de salage en cohérence avec les textes les plus récents relatifs au gel.

■ Moyennant quoi, l'essentiel des textes recommandés de l'EN 1992-1-1 a été retenu avec :

- Quelques précisions ou compléments pour le tableau 4.3, favorisant notamment l'emploi de qualités de bétons appropriées dans le cas d'environnements agressifs.
- La possibilité donnée d'avoir des provisions Δc_{dev} très faibles, voire nulles, pour tenir compte des tolérances, sous réserve de conditions strictes de contrôle qualité couvrant la conception et l'exécution.

Une troisième partie traite du retour d'expérience français et de la justification des dispositions retenues dans l'Annexe Nationale.

On présente les principes qui ont guidé l'élaboration des dispositions nationales françaises avec des précisions sur les classes d'exposition et sur les modulations possibles. On passe ensuite en revue des situations de projets typiques ou sensibles.

Il ressort de cette partie que les dispositions nationales françaises proposées en Annexe nationale recourent d'une part les usages français tels qu'ils résultent de l'application des règles nationales passées et présentes, et des bases scientifiques les plus récentes et les plus claires dans le domaine de la prévention de la corrosion des armatures, et d'autre part le retour d'expérience que l'on a vis-à-vis de la durabilité des ouvrages construits.

Une quatrième partie, rédigée par les entreprises, met en évidence l'incidence économique en cas d'adoption au niveau national français des valeurs recommandées par l'EN 1992-1-1.

L'incidence économique serait consécutive à l'augmentation de l'enrobage minimum, en particulier pour les ouvrages de bâtiment couverts mais non soumis à des risques de condensation importante en fréquence et durée.

Il est envisagé le cas d'une dalle courante de bâtiment d'habitation ainsi que celui d'un plancher de parking aérien coulé en place sur coffrage industriel.

L'incidence, exprimée en pourcent d'augmentation de prix de vente du gros œuvre se situerait, selon les cas, entre 0,3 % et 2 %. Elle est donc sensible, ce qui justifie tout l'intérêt de la position française quant aux dispositions retenues dans l'Annexe Nationale vis-à-vis de la durabilité.

Introduction

L'EN 1992-1-1, qui est approuvé au niveau européen, comporte des paragraphes, dont la liste figure à la fin de l'avant-propos, dans lesquels des choix nationaux peuvent être effectués. Les paragraphes concernés comportent ainsi un ou plusieurs paramètres pour lesquels des valeurs sont recommandées mais qui doivent cependant être déterminés au niveau National. Il est ainsi actuellement possible, soit de retenir les valeurs recommandées ou des valeurs voisines, soit de retenir des valeurs s'écartant nettement des valeurs recommandées si l'expérience nationale le justifie.

Il paraît donc nécessaire de pouvoir justifier tout choix de paramètre s'écartant notablement de la valeur recommandée dans un dossier technique et économique pertinent.

On doit, par ailleurs, envisager que, à terme, la poursuite de l'harmonisation européenne conduira à restreindre les possibilités de s'écarter des valeurs recommandées. Et le dossier technique, mentionné ci-dessus permettra alors soit de faire évoluer les valeurs recommandées au niveau européen, soit de faire connaître aux Pouvoirs publics nationaux l'enjeu économique attaché à l'abandon des usages nationaux.

Objet

Le présent dossier traite de la **Section 4 « Durabilité et enrobage des armatures »** et donc des enrobages en fonction des classes d'environnement. Sa lecture s'appuie sur la connaissance du texte de base de l'EN 1992-1-1 : 2004 (qui n'est pas ici rappelé, sauf par les tableaux qui interviennent directement), tant dans ses dispositions figées que dans celles qui sont ouvertes à choix national. Il se compose de quatre parties :

- Les prescriptions françaises de 1906 à 2004 (éléments rassemblés par A. Coin).
- Le choix actuel des paramètres nationaux (extrait de l'Annexe Nationale).
- Le retour d'expérience français et la justification des dispositions de l'Annexe Nationale (partie rédigée par F. Toutlemonde).
- L'incidence économique en cas d'adoption des valeurs recommandées de l'EN 1992-1-1 : 2004 (partie rédigée par EGF-BTP).

Partie 1

Les prescriptions françaises de 1906 à 2004



Introduction

Les textes techniques concernant le béton armé et le béton précontraint sont successivement passés en revue, en recopiant les clauses qui traitent de l'enrobage.

Il existe un grand nombre de textes du fait de l'évolution de leur domaine d'utilisation.

Au début du béton armé, toutes les règles de conception et d'exécution et concernant les ouvrages publics et privés figurent dans un même document.

Il viendra ensuite une séparation ouvrages publics (en fait ouvrages d'art) et ouvrages privés (en fait bâtiment au sens large). Avec en plus l'apparition des ouvrages en béton précontraint. Puis des murs et des fondations, ce qui conduit à des familles de textes distincts.

Puis il viendra la séparation entre la partie conception et règles de calcul d'une part et exécution d'autre part : fascicule 65 pour les ouvrages d'art et le béton précontraint et DTU 21 pour le bâtiment (béton armé, murs et fondations).

Dans le même temps, les règles de conception et de calcul du béton armé relatives aux ouvrages d'art et au bâtiment sont regroupées dans un texte commun, le BAEL.

On note cependant, pour le béton armé, une constance dans le temps de la prescription des enrobages les plus faibles (1 cm) avec une tendance à l'augmentation de la prescription des enrobages les plus forts (actuellement 5 cm).

Légende photo page 11 :

- *Contrôle des enrobages pour une structure à la mer
(Photo : Bouygues TP - Remerciements : Chapitre ACI de Paris).*

◆ **Circulaire de 1906, modifiée en 1927 : Instructions relatives à l'emploi du béton armé**

III : Exécution des travaux, Article 16

Les distances des armatures entre elles et aux parois des coffrages seront telles qu'elles permettent le parfaitamage du béton et son serrage contre les armatures. Ces dernières distances, même quand on n'emploie que du mortier sans gravier, ni cailloux, devront toujours être d'au moins 15 à 20 millimètres, de façon à mettre les armatures à l'abri des intempéries.

◆ **Le nouveau règlement de béton armé de 1934, pour les ouvrages dépendant du Ministère des Travaux Publics**

Article 12 : Distance minimale des armatures entre elles et aux parois des coffrages

Les distances des armatures aux parois ne descendront pas en-dessous de 35 mm, s'il s'agit d'ouvrages à la mer, ou de 20 mm s'il s'agit d'autres ouvrages.

Ces prescriptions ne s'appliquent pas aux croisements d'armatures principales ayant des directions différentes, ni aux croisements des armatures principales avec les armatures transversales (ou étriers), ni aux distances de ces dernières avec les coffrages.

En général, lorsqu'il s'agit d'armatures principales isolées, ces prescriptions exigent que les distances des armatures entre elles et aux parois des coffrages soient au moins égales au diamètre des plus gros éléments du béton augmenté de 5 mm.

Il est rappelé que le taux de fatigue admis pour l'adhérence à l'article 2 suppose d'autre part que les armatures sont à une distance de la surface libre du béton au moins égale à leur diamètre.

◆ **BA 45, modifié en 1948, applicable aux travaux du Ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme et aux travaux privés**

Clause 5,23 : Distance minimum des armatures entre elles et aux parois des coffrages

- 5,232 : Dans les ouvrages ou parties d'ouvrage dont aucun parement n'est exposé aux intempéries, les barres de hourdis, les ligatures transversales et les étriers seront enrobés d'au moins 1 cm de béton.
- 5,233 : Toutes les armatures voisines des parements exposés aux intempéries seront enrobées d'au moins 2 cm de béton ; en atmosphère agressive, l'enrobage minimum sera fixé par le cahier des charges particulier.

◆ BA 60 : Texte DTU couvrant le domaine du Bâtiment et traitant de la conception et de l'exécution

Clause 2,31 : Distances minimales des armatures entre elles et aux parois des coffrages

- 2,311 : Distances minimales des armatures entre elles.
- 2,312 : Distances minimales des armatures aux parois des coffrages.

En milieu non agressif, la distance libre entre toute génératrice extérieure d'une armature quelconque et la paroi de coffrage la plus voisine sera au moins égale à :

- 2 cm pour les parements exposés aux intempéries ou susceptibles de l'être, aux condensations ou, eu égard à la destination des ouvrages, au contact d'un liquide (réservoirs, tuyaux, canalisations, etc.),
- 1 cm dans les autres cas.

En outre, les armatures principales (barres tendues ou comprimées des hourdis, poutres, poteaux, etc.) seront protégées par une épaisseur de béton au moins égale à :

- la moitié de leur diamètre nominal augmentée de 8 mm, si ledit diamètre est au plus égal à 16 mm,
- à leur diamètre nominal, si ce diamètre est au moins égal à 16 mm.

En milieu agressif, les enrobages minimaux et la protection éventuelle du béton seront fixés par le cahier des charges particulier.

En particulier, les faces inférieures des planchers sur cuisines, buanderies, salles de bains, etc., seront considérées comme exposées aux condensations et les distances des génératrices extérieures des armatures aux dites faces seront prises égales à 2 cm, à moins que ces faces ne soient pourvues d'un revêtement étanche et durable, tel qu'un enduit en plâtre lui-même recouvert par une peinture étanche.

Il est rappelé que sont agressives, notamment :

- . l'eau très pure telle que celle qu'on rencontre en terrain granitique,
- . l'eau chargée de sulfate de calcium (eau séléniteuse) ou de sulfate de magnésium,
- . l'eau de mer.

Clause 6,613 : Position des armatures

- 1 : Aucune tolérance en moins n'est admise sur les distances minimales des armatures entre elles et aux parois des coffrages telles qu'elles sont définies, clause 2,31.

2, 3 et 4 : Le texte traite des tolérances en plus et des écarts de positionnement.

◆ Titre VI du fascicule 61 : Fascicule spécial n° 64-21 ter, Circulaire n° 70 du 14 novembre 1964

Concerne les ouvrages d'art en béton armé.

Article 36 : Protection des armatures

L'enrobage de toute barre sera au moins égal à :

L'enrobage d'une barre est défini aux commentaires de l'article 23 (axe de la barre au parement diminué de la moitié du diamètre nominal).

La prescription s'applique aux barres de hourdis, armatures et ligatures transversales des poutres et poteaux, etc.

Les enrobages minimaux fixés au chapitre VI en considération de l'adhérence devront, en outre, être respectés (article 23 qui concerne les distances entre barres).

- 4 cm pour les ouvrages à la mer ou exposés aux embruns ou aux brouillards salins,
 - ⋮ *L'attention est attirée sur ce qu'il ne semble pas y avoir intérêt à augmenter dans les parties tendues l'enrobage minimal fixé pour les armatures des ouvrages à la mer, en raison de l'accroissement de la fissuration qui en résulterait.*
- 2 cm pour les autres ouvrages,
- 1 cm, exceptionnellement, pour des parois qui seraient situées dans des locaux couverts, clos et chauffés et qui ne seraient pas exposés aux condensations.
 - ⋮ *Les enrobages des barres seront calculés compte tenu des enlèvements éventuels de matière postérieurs à la mise en place du béton pour bouchardage, lavage ou brossage précoce, etc.*

◆ **Circulaire n° 44 du 12 août 1965 : Fascicule n° 65 bis**

Concerne l'exécution des travaux en béton précontraint pour les ouvrages d'art.

Article 19-2 : Distance des armatures ordinaires aux parois

Elles ne devront pas être inférieures aux valeurs minimales prescrites pour les ouvrages en béton armé.

- ⋮ *L'enrobage minimal de ces armatures est fixé par l'article 36 - Protection des armatures - du titre VI du fascicule n° 61 du CPC.*

Article 19-3 : Distance des armatures de précontrainte sous gaine aux parois des coffrages

Elles devront être au moins égales au diamètre d'encombrement des gaines (compte tenu des ondulations le cas échéant).

Pour les parois d'exécution difficile, telles les parois des âmes et les faces verticales et inclinées des talons des poutres, cette valeur devra être augmentée de la marge d'imprécision résultant du projet d'exécution et des conditions de mise en œuvre.

- ⋮ *Cette marge pourra, dans la plupart des cas, être fixée au quart du diamètre d'encombrement des gaines. Elle ne pourra être considérée comme nulle que sous les conditions suivantes :*
- ⋮ *. présentation d'un projet d'exécution indiquant d'une façon très précise les positions des armatures,*
- ⋮ *. fixation longitudinale et transversale de celles-ci dans le coffrage afin de garantir pendant le bétonnage leur maintien en position correcte,*
- ⋮ *. modalités d'exécution donnant toute garantie sur le remplissage des moules et sur la qualité du béton.*

Article 19-4 : Distances des armatures de précontrainte sous gaine aux parements non coffrés

Dans le cas d'armatures isolées, cette distance devra être au moins égale à la plus grande des deux distances suivantes :

- le demi-diamètre d'encombrement des gaines (compte tenu des ondulations le cas échéant),
- la valeur minimale de 3 cm.

Dans le cas de paquets d'armatures, cette distance devra être au moins égale à celle prescrite dans le cas de parois coffrées.

- ⋮ *Un exemple de parement non coffré est constitué par la face supérieure de la dalle d'un pont à poutres sous chaussée.*
- ⋮ *L'attention est attirée sur ce qu'il peut y avoir lieu, dans certains cas, de majorer ces distances pour des armatures présentant une courbure dans un plan parallèle au parement en cause.*

◆ CCBA 68 : Texte commun Ouvrages d'art (Fascicule 61 du Titre VI du CPC) et Bâtiments (DTU)

Ne traite que de la conception, du calcul et des plans pour le béton armé (texte révisé en 1970).

Article 43 - Protection des armatures

- 43,1 : L'enrobage de toute barre est au moins égal à :

- 4 cm pour les ouvrages à la mer ou exposés aux embruns ou aux brouillards salins,

L'expression « embruns » s'étend ici aux gouttelettes d'eau de mer, de dimension comparable à celle de la pluie fine, susceptibles d'être transportées par le vent et de se déposer sur les parements des ouvrages. Les brouillards salins diffèrent des embruns par la dimension encore moindre de leurs gouttelettes qui permet à ces dernières de demeurer longtemps en suspension. Les distances de la mer auxquelles il peut y avoir exposition aux embruns ou aux brouillards salins dépendent des circonstances locales. Elles peuvent atteindre des centaines de mètres pour les embruns et des kilomètres pour les brouillards salins si la mer brise violemment sur la côte et si la terre n'offre aucune protection vis-à-vis du vent.

- 2 cm pour les parements exposés aux intempéries ou susceptibles de l'être, exposés aux condensations ou, eu égard à la destination des ouvrages, au contact d'un liquide (réservoirs, tuyaux, canalisations, etc.),

- 1 cm pour des parois qui seraient situées dans des locaux couverts et clos et qui ne seraient pas exposés aux condensations.

L'enrobage d'une barre est défini aux commentaires de l'article 29 (29,13 : l'enrobage d'une barre est égal à la plus courte distance de l'axe de cette barre au parement de béton le plus voisin diminué de la moitié du diamètre nominal de cette barre).

La prescription s'applique aux barres des hourdis, armatures et ligatures transversales des poutres et poteaux, etc.

Les enrobages minimaux fixés au chapitre VI en considération de l'adhérence doivent, en outre, être respectés.

L'attention est attirée sur ce qu'il ne semble pas y avoir intérêt à augmenter dans les parties tendues l'enrobage minimal fixé pour les armatures des ouvrages à la mer, en raison de l'accentuation de la fissuration qui en résulterait.

L'attention est attirée sur ce qu'une protection efficace des ouvrages à la mer, ou exposés aux embruns ou brouillards salins, ne peut être offerte par le seul respect de l'enrobage prescrit. Il est non moins essentiel que le béton soit suffisamment, sinon fortement dosé en ciment (350 à 400 kg/m³) et qu'il soit aussi peu perméable et hygroscopique que possible, ce qui ne peut s'obtenir que par l'étude sérieuse de sa composition et par le soin apporté à sa mise en place.

- 43,2 : Les enrobages des barres sont calculés compte tenu des enlèvements éventuels de matière postérieurs à la mise en place du béton par bouchardage, lavage ou brossage précoce, etc.

Annexe B : B 22, Dessins d'armatures

- B 22,13 : Les dessins d'armatures doivent représenter tous les détails nécessaires pour permettre l'exécution complète du ferrailage. Les dessins d'armatures étant des dessins d'exécution complets, les références aux plans de coffrage à consulter, les joints ou plans d'arrêt ou de reprise de bétonnage, les nota importants concernant des sujétions particulières figurent sur ces dessins. En particulier, sont définies les distances des barres entre elles ou aux parois, notamment aux croisements. Il peut y avoir intérêt, dans les nœuds où le ferrailage est dense, à représenter l'enchevêtrement des barres par un détail coté et dessiné à grande échelle.

Les modifications de 1970 n'ont pas apporté d'évolution aux clauses précédentes.

◆ Fascicule spécial 73-64 bis, Circulaire n° 73-153 du 13 août 1973

Concerne le béton précontraint pour les ouvrages d'art et autres ouvrages relevant du Ministère de l'Équipement et du Logement.

Article 47 : Position et enrobages des armatures

● 47-2 : Armatures de précontrainte sous gaines injectées

Au paragraphe 47.2.3 : Dans tous les cas, les épaisseurs minimales *c* (latérales) ou *d* (en sous-face) de béton entre une paroi coffrée et une gaine ou un paquet de gaines, doivent satisfaire les conditions ci-après :

- « *c* » supérieur ou égal à : la largeur du paquet, la demi-hauteur du paquet, 4 cm,
- « *d* » supérieur ou égal à : la demi-largeur du paquet, 4 cm.
 - ⋮ *Ces distances sont prévues pour assurer une bonne mise en place du béton et, en ce qui concerne les âmes, éviter une fissuration le long des gaines (...).*

Dans le cas des ouvrages exposés à une atmosphère agressive, et sauf disposition particulière du CPS, les épaisseurs minimales *c* et *d* ci-dessus sont portées à 5 cm.

⋮ *L'attention est attirée sur ce qu'une protection efficace des ouvrages exposés à une atmosphère agressive ne peut être offerte par le seul respect de l'enrobage prescrit. Il est non moins essentiel que le béton soit suffisamment dosé en ciment et qu'il soit aussi peu perméable et hygroscopique que possible, ce qui ne peut s'obtenir que par l'étude sérieuse de sa composition et par le soin apporté à sa mise en place.*

Enfin, la distance minimale des nus des gaines aux parements non coffrés doit être au moins égale à la plus grande des deux distances suivantes :

- le demi-diamètre d'encombrement des gaines (compte tenu des ondulations le cas échéant),
- la valeur minimale de 3,55 cm.
 - ⋮ *Un exemple de parement non coffré est constitué par la face supérieure de la dalle d'un pont à poutres sous chaussée.*
 - ⋮ *Le CPS peut prescrire des distances minimales supérieures, notamment dans les cas d'ouvrages exposés au salage en période d'hiver, une étanchéité pouvant rarement à elle seule procurer une garantie de protection suffisante à cet égard.*

● 47-3 : Armatures de précontrainte adhérentes

Les épaisseurs minimales de béton à réserver entre les armatures de précontrainte et les parements des pièces dépendent des mêmes facteurs (distance des armatures entre elles). En outre, les enrobages de ces armatures doivent être au moins égaux à :

- 1 cm pour les parements coffrés qui sont situés dans des locaux couverts et clos et qui ne sont pas exposés aux condensations,
- 3 cm pour les parements coffrés exposés aux intempéries ou susceptibles de l'être, exposés aux condensations ou, eu égard à la destination des ouvrages, au contact d'un liquide,
- 3 et 4 cm, respectivement, pour les parements non coffrés, dans les cas définis dans les deux alinéas qui précèdent,
- 5 cm, sauf dispositions particulières du CPS, pour les ouvrages exposés à une atmosphère agressive.
 - ⋮ *L'enrobage d'un fil non rond ou d'un toron est, par définition, la distance à la paroi du plus petit cercle circonscrit à sa section.*

De plus, les cotes nominales de position des armatures adhérentes portées sur les dessins d'exécution doivent tenir compte des tolérances de mise en place de façon que les cotes minimales qui précèdent soient respectées.

⋮ *Cette dernière condition doit jouer essentiellement en raison de l'espacement toujours relativement grand des pièces de fixation de ces armatures et, éventuellement, des déformations de ces pièces lors des mises en tension.*

- 47-4 : Armatures passives

L'enrobage de toute barre doit être au moins égal à :

- 1 cm pour les parements coffrés qui sont situés dans des locaux couverts et clos et qui ne sont pas exposés aux condensations,
- 2 cm pour les parements coffrés exposés aux intempéries ou susceptibles de l'être, exposés aux condensations ou, eu égard à la destination des ouvrages, au contact d'un liquide,
- 3 cm pour les parements non coffrés,
- 4 cm pour les ouvrages exposés à une atmosphère agressive.

⋮ L'enrobage d'une barre est celui défini au commentaire de l'article 29 du fascicule 61, titre VI du CPC.

Les enrobages minimaux fixés au chapitre VI du fascicule 61, titre VI du CPC en considération de l'adhérence doivent en outre être respectés.

L'enrobage des armatures de peau ne doit pas être supérieur à 4 cm (à 5 cm pour la seconde nappe en cas d'exposition à une atmosphère agressive).

⋮ Les armatures de peau sont définies à l'article 21,4.1.

Les autres dispositions d'armatures passives, notamment les distances minimales entre armatures voisines, doivent satisfaire aux règles concernant les pièces en béton armé.

◆ DTU 23-1 d'octobre 1975 : Murs en béton banché

Ce texte concerne la conception, le calcul et l'exécution des murs porteurs armés ou non des bâtiments (texte DTU).

Règles de calcul clause 2,13 : Armatures des murs extérieurs et conditions d'épaisseur de ces murs

- 2,132 : Ces murs doivent comporter une armature constituée par des aciers de peau enrobés d'environ 3 cm vis-à-vis de l'extérieur.

Cahier des charges clause 3.5 : Armatures

- 3,52 : Les armatures doivent être munies de cales de positionnement en nombre suffisant pour permettre d'assurer les enrobages réglementaires.

◆ BAEL 80 : Texte commun Ouvrages d'art (Fascicule 79-48 bis) et Bâtiments (DTU)

Ce texte ne traite que de la conception et du calcul pour le béton armé. Il a été révisé en 1983 (Fascicule n° 62 du titre 1^{er}-Section 1 et DTU) puis en 1991.

Article A.7,1 : Protection des armatures

L'enrobage* de toute armature est au moins égal à :

- 4 cm pour les ouvrages à la mer ou exposés aux embruns ou aux brouillards salins**, ainsi que pour les ouvrages exposés à des atmosphères très agressives,

- 3 cm pour les parements non coffrés susceptibles d'être soumis à des actions agressives*** ,
- 2 cm pour les parements exposés aux intempéries ou susceptibles de l'être, exposés aux condensations ou, eu égard à la destination des ouvrages, au contact d'un liquide (réservoirs, tuyaux, canalisations, etc.),
- 1 cm pour des parois qui seraient situées dans des locaux couverts et clos et qui ne seraient pas exposés à des condensations****.

Les enrobages des armatures doivent être assurés après enlèvements éventuels de matière postérieurs à la mise en place du béton tels que bouchardage, lavage ou broissage précoce.

** L'enrobage est défini comme la distance de l'axe d'une armature au parement le plus voisin diminuée du rayon nominal de cette armature. L'attention est attirée sur le fait que les règles données ici sont valables pour toutes les armatures, qu'elles soient principales ou secondaires. Les enrobages minimaux fixés en A.7.2,4 doivent en outre être respectés (au moins le diamètre pour les barres isolées et la largeur du paquet dont elle fait partie dans le cas contraire). Il convient enfin de prévoir l'enrobage minimal compte tenu de la dimension maximale des granulats et de la maniabilité du béton.*

*** Les distances de la mer auxquelles il peut y avoir exposition aux embruns ou aux brouillards salins dépendent des circonstances locales (nature et tracé de la côte, conditions d'exposition aux vents dominants). L'attention est attirée sur ce qu'il ne semble pas y avoir intérêt à augmenter dans les parties tendues l'enrobage minimal fixé pour les armatures des ouvrages à la mer, sauf pour les pièces massives.*

D'autre part, une protection efficace des armatures ne peut être offerte par le seul respect de l'enrobage prescrit ; il est non moins essentiel que le béton soit suffisamment dosé en ciment (350 à 400 kg/m³) et qu'il soit aussi peu perméable et hygroscopique que possible (donc qu'il présente une bonne compacité), ce qui ne peut s'obtenir que par l'étude sérieuse de sa composition et par le soin apporté à sa mise en place.

**** Il en est notamment ainsi des faces supérieures des hourdis des ponts routiers.*

***** L'attention est attirée sur le fait que l'enrobage de 1 cm ne saurait admettre à l'exécution des tolérances en moins par rapport à cette valeur nominale. Le strict respect de celle-ci exige en particulier une densité convenable de cales ou écarteurs entre les armatures et le coffrage.*

La version modifiée de 1983 n'apporte pas de changement sur les clauses précédentes.

◆ **BPEL 83 : Texte commun Ouvrages d'art (Fascicule 62, Titre I, Section II) et Bâtiments (DTU)**

Ce texte ne traite que de la conception et du calcul pour le béton précontraint.

● 10.4,2 : Enrobage des armatures passives

L'enrobage* de toute armature doit être au moins égal à :

- 1 cm pour des parois qui sont situées dans des locaux couverts et clos et qui ne sont pas exposés à des condensations,

*! * L'enrobage d'une barre est défini en commentaire de l'article A.7.1 du BAEL.*

- 2 cm pour les parements exposés aux intempéries ou susceptibles de l'être, exposés aux condensations, ou encore, eu égard à la destination des ouvrages, au contact d'un liquide,
- 3 cm pour les parements non coffrés susceptibles d'être soumis à des actions agressives,
- 4 cm pour les ouvrages à la mer ou exposés aux embruns ou aux brouillards salins, ainsi que pour les ouvrages exposés à une atmosphère agressive.

Les enrobages minimaux résultant des prescriptions de l'article A.7.2 du BAEL doivent être également respectés (Outre la règle A.7.2,4, rappelée ci-avant, les autres règles concernent les distances entre barres).

- 10.3,3 : Distances des armatures de précontrainte aux parements

La distance de l'axe de ces armatures au parement le plus proche ne doit pas être inférieure à 2,5 fois leur diamètre.

⋮ Cette condition vise à assurer un scellement convenable des armatures. Elle n'a donc pas à être prise en compte pour la définition de la zone d'enrobage selon l'article 5.3.

En outre l'enrobage* de toute armature doit être au moins égal à :

➤ 1 cm pour les parois coffrées qui sont situées dans des locaux couverts et clos et qui ne sont pas exposés à des condensations,

⋮ * L'enrobage d'une barre est défini comme la distance de l'axe d'une armature à la paroi la plus voisine diminuée du rayon de cette armature.

➤ 3 cm pour les parois coffrées exposées aux intempéries ou susceptibles de l'être, exposées aux condensations, ou, eu égard à la destination des ouvrages, au contact d'un liquide,

➤ 3 et 4 cm, respectivement, pour les parois non coffrées, dans les cas définis dans les deux alinéas qui précèdent,

➤ 5 cm, sauf dispositions particulières du marché pour les ouvrages exposés à une atmosphère agressive**.

⋮ ** Pour les bâtiments, il y a lieu de considérer aussi les actions agressives susceptibles de se développer à l'intérieur.

◆ DTU 21 de septembre 1984 : NF P 18-201

Ce texte concerne l'exécution des travaux en béton de bâtiments (DTU).

⋮ Il fait renvoi aux règles de béton armé en vigueur en citant, au paragraphe 5,12 Position des armatures, de larges extraits du Chapitre A,7 du BAEL 83.

- L'enrobage est défini comme la distance de l'axe d'une armature au parement le plus voisin diminuée du rayon nominal de cette armature. L'attention est attirée sur le fait que les règles données ici sont valables pour toutes les armatures, qu'elles soient principales ou secondaires. Les enrobages minimaux fixés en A.7.2,4 doivent en outre être respectés (au moins le diamètre pour les barres isolées et la largeur du paquet dont elle fait partie dans le cas contraire). Il convient enfin de prévoir l'enrobage minimal compte tenu de la dimension maximale des granulats et de la maniabilité du béton.

À cet effet, l'enrobage de toute armature est au moins égal à :

➤ 4 cm pour les ouvrages à la mer ou exposés aux embruns ou aux brouillards salins, ainsi que pour les ouvrages exposés à des atmosphères très agressives. Les distances de la mer auxquelles il peut y avoir exposition aux embruns ou aux brouillards salins dépendent des circonstances locales (nature et tracé de la côte, conditions d'exposition aux vents dominants). L'attention est attirée sur ce qu'il ne semble pas y avoir intérêt à augmenter dans les parties tendues l'enrobage minimal fixé pour les armatures des ouvrages à la mer, sauf pour les pièces massives.

D'autre part, une protection efficace des armatures ne peut être offerte par le seul respect de l'enrobage prescrit ; il est non moins essentiel que le béton soit suffisamment dosé en ciment (350 à 400 kg/m³) et qu'il soit aussi peu perméable et hygroscopique que possible (donc qu'il présente une bonne compacité), ce qui ne peut s'obtenir que par l'étude sérieuse de sa composition et par le soin apporté à sa mise en place,

➤ 3 cm pour les parements non coffrés susceptibles d'être soumis à des actions agressives. Il en est notamment ainsi des faces supérieures des hourdis,

➤ 2 cm pour les parements exposés aux intempéries ou susceptibles de l'être, exposés aux condensations ou, eu égard à la destination des ouvrages, au contact d'un liquide (réservoirs, tuyaux, canalisations, etc.),

➤ 1 cm pour des parois qui seraient situées dans des locaux couverts et clos et qui ne seraient pas exposés à des condensations. L'attention est attirée sur le fait que l'enrobage de 1 cm ne saurait admettre à l'exécution de tolérance en moins par rapport à cette valeur nominale. Le strict respect de celle-ci exige en particulier une densité convenable de cales ou écarteurs entre les armatures et le coffrage.

Les enrobages des armatures doivent être assurés après enlèvements éventuels de matière postérieurs à la mise en place du béton tels que bouchardage, lavage ou brossage précoce.

⋮ Certains aciers doivent être positionnés et maintenus en place avec précision durant le coulage du béton (chapeaux assurant la stabilité des balcons, aciers concernés par la tenue au feu, aciers des parements exposés aux intempéries et autres actions agressives).

Sauf justification particulière, aucun écart en moins n'est admis pour la distance minimale des aciers aux parois et pour les distances minimales des aciers entre eux.

⋮ Cette exigence de distance minimale concerne d'abord le bureau d'études dont les plans d'exécution doivent avoir été conçus de telle sorte qu'ils permettent le respect de cette clause. Une coordination entre le bureau d'études et le chantier peut être nécessaire à ce sujet.

- Chapitre 6 : Plans et notes de calculs

Le dossier des plans d'exécution des ouvrages doit préciser les indications suivantes :

(...) les enrobages des aciers lorsqu'ils sont fondamentaux pour la stabilité (balcons, poteaux très élancés, etc.), pour la bonne conservation de l'ouvrage (parements exposés aux intempéries et autres actions agressives, etc.) et pour la sécurité (sécurité au feu, garde corps, etc.).

◆ DTU 13-11 et 13-12 de mars 1988, NF P 11-211 et 11-711 : Fondations superficielles des bâtiments

Clause 2,54 du texte 13-12 : Position des armatures

La distance libre minimale entre toute génératrice extérieure d'une armature quelconque et la surface de la semelle ou du béton de propreté la plus voisine doit respecter les enrobages prescrits par les règles de béton armé en vigueur. À défaut, cette distance sera prise égale à 4 cm.

⋮ Article A.7.1 du BAEL 83.

◆ DTU 23-1 de mai 1993 : Murs en béton banché, NF P 18-210 reprenant sans modification le DTU 23-1 de février 1990, issu de celui d'octobre 1975

Il concerne la conception et le calcul et fait renvoi au DTU 21 pour l'exécution.

- 4,13 : Armatures et épaisseurs des murs extérieurs

➤ Enrobage :

- . 3 cm dans les cas d'exposition courante,
- . 3 ou 5 cm dans les cas d'exposition aux embruns ou aux brouillards salins (bord de mer) ainsi que dans les autres cas d'exposition à des atmosphères très agressives, suivant qu'il existe ou non une protection complémentaire efficace de l'acier ou du béton.

Pour la définition des atmosphères très agressives, se reporter aux règles de béton armé en vigueur.

Donc cela fait renvoi au BAEL 91 paragraphe A.7.1, avec d'autres indications au paragraphe A.4.5,31. Ces paragraphes mentionnent bien les atmosphères agressives mais ne les définissent pas.

◆ BAEL 91 : Texte commun Ouvrages d'art (Fascicule n° 62 du Titre 1^{er} - Section 1) et Bâtiments (DTU)

Ce texte ne traite que de la conception et du calcul pour le béton armé.

Ce texte, modifié en 1999, est celui actuellement en vigueur.

Article A.7,1 : Protection des armatures

L'enrobage de toute armature est au moins égal à :

- 5 cm pour les ouvrages à la mer ou exposés aux embruns ou aux brouillards salins, ainsi que pour les ouvrages exposés à des atmosphères très agressives*
- 3 cm pour les parois coffrées ou non et qui sont soumises (ou sont susceptibles de l'être) à des actions agressives, ou à des intempéries, ou des condensations, ou encore, eu égard à la destination des ouvrages, au contact d'un liquide**,
- 1 cm pour des parois qui seraient situées dans des locaux couverts et clos et qui ne seraient pas exposés à des condensations.

L'enrobage est défini comme la distance de l'axe d'une armature au parement le plus voisin diminuée du rayon nominal de cette armature. L'attention est attirée sur le fait que les règles données ici sont valables pour toutes les armatures, qu'elles soient principales ou secondaires. Les enrobages minimaux fixés en A.7.2,4 doivent en outre être respectés (au moins le diamètre pour les barres isolées et la largeur du paquet dont elle fait partie dans le cas contraire). Il convient enfin de prévoir l'enrobage minimal compte tenu de la dimension maximale des granulats et de la maniabilité du béton.

** Cet enrobage de 5 cm peut être réduit à 3 cm si, soit les armatures, soit le béton sont protégés par un procédé dont l'efficacité a été démontrée.*

*** La valeur de 3 cm peut être ramenée à 2 cm lorsque le béton présente une résistance caractéristique supérieure à 40 MPa. En effet, l'efficacité de la protection apportée par l'enrobage est fonction de la compacité du béton, laquelle croît avec sa résistance.*

Les enrobages des armatures doivent être strictement assurés à l'exécution, c'est-à-dire qu'ils ne comportent aucune tolérance en moins par rapport à la valeur nominale ; ceci implique qu'il faut tenir compte des enlèvements éventuels de matière postérieurs à la mise en place du béton. D'autre part, il y a lieu de s'assurer par des dessins de détail comportant toutes les armatures secondaires non calculées que ces conditions d'enrobage peuvent être satisfaites.

Le respect de l'enrobage exige une densité convenable de cales ou écarteurs entre les armatures et le coffrage, ainsi que des carcasses rendues suffisamment rigides par l'adjonction d'armatures secondaires qui ne résultent pas forcément des calculs réglementaires.

◆ **BPEL 91 : Texte commun Ouvrages d'art (Fascicule n° 62 du Titre 1^{er} - Section 2) et Bâtiments (DTU)**

Ce texte ne traite que de la conception et du calcul pour le béton précontraint.

Ce texte, modifié en 1999, est celui actuellement en vigueur.

● 10.4,2 : Enrobage des armatures passives

L'enrobage* de toute armature doit être au moins égal à :

➤ 1 cm pour des parois qui sont situées dans des locaux couverts et clos et qui ne sont pas exposés à des condensations,

⋮ * L'enrobage d'une barre est défini en commentaire de l'article A.7.1 du BAEL.

➤ 3 cm pour les parois coffrées ou non et qui sont soumises (ou sont susceptibles de l'être) à des actions agressives, ou à des intempéries, ou des condensations, ou encore, eu égard à la destination des ouvrages, au contact d'un liquide,

⋮ La valeur de 3 cm peut être ramenée à 2 cm lorsque le béton présente une résistance caractéristique supérieure à 40 MPa. En effet, l'efficacité de la protection apportée par l'enrobage est fonction de la compacité du béton, laquelle croît avec sa résistance.

➤ 5 cm pour les ouvrages à la mer ou exposés aux embruns ou aux brouillards salins, ainsi que pour les ouvrages exposés à une atmosphère agressive,

⋮ Cet enrobage de 5 cm peut être réduit à 3 cm si, soit les armatures, soit le béton sont protégés par un procédé dont l'efficacité a été démontrée.

Les enrobages minimaux résultant des prescriptions de l'article A.7.2 du BAEL doivent être également respectés. (Outre la règle A.7.2,4, rappelée ci-avant, les autres règles concernent les distances entre barres).

● 10.3,3 : Distances des armatures de précontrainte aux parements

La distance de l'axe de ces armatures au parement le plus proche ne doit pas être inférieure à 2,5 fois leur diamètre.

⋮ Cette condition vise à assurer un scellement convenable des armatures. Elle n'a donc pas à être prise en compte pour la définition de la zone d'enrobage selon l'article 5.3.

En outre, l'enrobage* de toute armature doit être au moins égal à :

➤ 1 cm pour les parois coffrées qui sont situées dans des locaux couverts et clos et qui ne sont pas exposés à des condensations,

⋮ * L'enrobage d'une barre est défini comme la distance de l'axe d'une armature à la paroi la plus voisine diminuée du rayon de cette armature.

➤ 3 cm pour les parois coffrées exposées aux intempéries ou susceptibles de l'être, exposées aux condensations, ou, eu égard à la destination des ouvrages, au contact d'un liquide,

➤ 3 et 4 cm, respectivement, pour les parois non coffrées, dans les cas définis dans les deux alinéas qui précèdent,

➤ 5 cm, sauf dispositions particulières du marché, pour les ouvrages exposés à une atmosphère agressive,

⋮ Pour les bâtiments, il y a lieu de considérer aussi les actions agressives susceptibles de se développer à l'intérieur.

Les enrobages minimaux résultant des prescriptions de l'article A.7.2 du BAEL doivent être également respectés. (Outre la règle A.7.2,4, rappelée ci-avant, les autres règles concernent les distances entre barres).

◆ DTU 21 de mars 2004 : NF P 18-201

Ce texte, qui concerne l'exécution des travaux en béton de bâtiments (DTU) est la révision du texte de septembre 1984, en vue de préparer l'Annexe Nationale de la future norme européenne relative à l'exécution des ouvrages en béton armé ou précontraint.

⋮ *Le paragraphe 7.1.4 qui traite du positionnement des aciers, est conforme dans sa présentation à l'EN 1992-1-1.*

⋮ *Le paragraphe 8 qui traite des plans et notes de calculs est le suivant :*

Les enrobages des aciers.

(...) lorsqu'ils sont fondamentaux pour la stabilité (balcons, poteaux très élancés, etc.), pour la bonne conservation de l'ouvrage (parements exposés aux intempéries et autres actions agressives, etc.) et pour la sécurité (sécurité au feu, garde corps, etc.), ces enrobages doivent figurer sur des détails d'armatures appropriés.

⋮ *Note : Les enrobages figurant sur les plans sont les enrobages nominaux correspondant à l'enrobage minimal augmenté de la tolérance.*

Ce DTU devra sans doute être repris car :

- au paragraphe 7.1.4 : la valeur de $\Delta_{(\text{moins})}$ est fixée à 10 mm alors qu'elle peut être choisie et
- au paragraphe 8 : l'EN 1992-1 donne la possibilité de faire figurer sur les plans la valeur minimale de l'enrobage.

Partie 2

Le choix actuel des paramètres nationaux



Introduction

Dans cette partie, on cite, à d'éventuelles évolutions de forme près, le contenu de la future Annexe Nationale Française de l'EN 1992-1-1 correspondant à la section 4 « Durabilité et enrobage des armatures ».

Comme dans cette future Annexe Nationale, les clauses sont répertoriées par le numéro de la clause correspondante dans l'EN 1992-1-1 où un choix national est rendu possible, avec la mention systématique « Note ».

Ces éléments de l'Annexe Nationale ont donc la valeur d'une note à la clause de l'Eurocode et se substituent le cas échéant aux notes « par défaut » du texte européen.

En outre, quelques clauses, non reprises dans l'Annexe Nationale car conformes au texte européen, sont rappelées dans le présent document pour faciliter la compréhension.

Légende photo page 25 :

- Mise en place de cales pour assurer la position du ferrailage d'un élément horizontal (Remerciements : EGF-BTP).

TABLEAU 4.1 : CLASSES D'EXPOSITION EN FONCTION DES CONDITIONS D'ENVIRONNEMENT, CONFORMÉMENT À L'EN 206-1

Ce tableau, figurant dans le texte européen, ne sera pas repris dans l'Annexe Nationale.

Désignation de la classe	Description de l'environnement	Exemples informatifs illustrant le choix des classes d'exposition
1 Aucun risque de corrosion ni d'attaque		
X0	Béton non armé et sans pièces métalliques noyées : toutes expositions, sauf en cas de gel/dégel, d'abrasion et d'attaque chimique béton armé ou avec des pièces métalliques noyées : très sec.	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est très faible.
2 Corrosion induite par carbonatation		
XC1	Sec ou humide en permanence.	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est faible. Béton submergé en permanence dans de l'eau.
XC2	Humide, rarement sec.	Surfaces de béton soumises au contact à long terme de l'eau. Un grand nombre de fondations.
XC3	Humidité modérée.	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est moyen ou élevé. Béton extérieur abrité de la pluie.
XC4	Alternativement humide et sec.	Surfaces de béton soumises au contact de l'eau, mais n'entrant pas dans la classe d'exposition XC2.
3 Corrosion induite par les chlorures		
XD1	Humidité modérée.	Surfaces de béton exposées à des chlorures transportés par voie aérienne.
XD2	Humide, rarement sec.	Piscines. Éléments en béton exposés à des eaux industrielles contenant des chlorures.
XD3	Alternativement humide et sec.	Éléments de ponts exposés à des projections contenant des chlorures. Chaussées. Dalles de parcs de stationnement de véhicules.
4 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 sur ou à proximité d'une côte.
XS2	Immergé en permanence.	Éléments de structures marines.
XS3	Zones de mamage, zones soumises à des projections ou à des embruns.	Éléments de structures marines.
5 Attaque gel/dégel		
XF1	Saturation modérée en eau, sans agent de déverglaçage.	Surfaces verticales de béton exposées à la pluie et au gel.
XF2	Saturation modérée en eau, avec agents de déverglaçage.	Surfaces verticales de béton des ouvrages routiers exposés au gel et à l'air véhiculant des agents de déverglaçage.
XF3	Forte saturation en eau, sans agents de déverglaçage.	Surfaces horizontales de béton exposées à la pluie et au gel.
XF4	Forte saturation en eau, avec agents de déverglaçage ou eau de mer.	Routes et tabliers de pont exposés aux agents de déverglaçage. Surfaces de béton verticales directement exposées aux projections d'agents de déverglaçage et au gel. Zones des structures marines soumises aux projections et exposées au gel.
6 Attaques chimiques		
XA1	Environnement à faible agressivité chimique selon l'EN 206-1, Tableau 2.	Sols naturels et eau dans le sol.
XA2	Environnement d'agressivité chimique modérée selon l'EN 206-1, Tableau 2.	Sols naturels et eau dans le sol.
XA3	Environnement à forte agressivité chimique selon l'EN 206-1, Tableau 2.	Sols naturels et eau dans le sol.

4.2(2) Note

Pour l'application en France de la norme européenne EN 1992-1-1 : 2004 pour ce qui concerne l'enrobage, la colonne d'exemples informatifs du Tableau 4.1 est rendue normative compte tenu des notes suivantes :

Note (1)

Le béton non armé se trouve dans d'autres classes d'exposition que X0, dès lors que ce béton comporte des armatures ou des pièces métalliques noyées et que l'environnement n'est pas classé « très sec ».

Note (2)

Les parties des bâtiments à l'abri de la pluie, que ceux-ci soient clos ou non, sont à classer en XC1 à l'exception des parties exposées à des condensations importantes à la fois par leur fréquence et leur durée qui sont alors à classer en XC3.

C'est le cas notamment de certaines parties :

- d'ouvrages industriels,
- de buanderies,
- de papeteries,
- de locaux de piscines, etc.

Note (3)

Sont à classer en XC4 les parties aériennes des ouvrages d'art et les parties extérieures des bâtiments non protégées de la pluie, comme par exemple les façades, les pignons et les parties saillantes à l'extérieur, y compris les retours de ces parties concernés par les cheminements et/ou rejaillissements de l'eau.

Note (4)

Ne sont à classer en XD3 que les parties d'ouvrages soumises à des projections fréquentes et très fréquentes et contenant des chlorures et sous réserve d'absence de revêtement d'étanchéité assurant la protection du béton.

Ne sont donc à classer en XD3 que les parties des parcs de stationnement de véhicules exposées directement aux sels contenant des chlorures (par exemple, les parties supérieures des dalles et rampes) et ne comportant pas de revêtement pouvant assurer la protection du béton pendant la durée de vie du projet.

Note (5)

Sont à classer en XS3 les éléments de structures en zone de marnage et/ou exposés aux embruns lorsqu'ils sont situés à moins de 100 m de la côte, parfois plus, jusqu'à 500 m, suivant la topographie particulière.

Sont à classer en XS1 les éléments de structures situés au-delà de la zone de classement XS3 et situés à moins de 1 km de la côte, parfois plus, jusqu'à 5 km, lorsqu'ils sont exposés à un air véhiculant du sel marin, suivant la topographie particulière.

Note (6)

En France, les classes d'exposition XF1, XF2, XF3 et XF4, sont indiquées dans la carte donnant les zones de gel, sauf spécification particulière notamment fondée sur l'état de saturation du béton (cf. Annexe E en E.2 ou l'AN de l'EN 206-1 en NA 4.1, Figure NA.2 et Note).

Pour ces classes d'exposition XF, et sous réserve du respect des dispositions liées au béton (EN 206-1 et documents normatifs nationaux), l'enrobage sera déterminé par référence à une classe d'exposition XC ou XD, comme indiqué clause 4.4.1.2 (12).

Les classes de référence à retenir pour l'enrobage sont les suivantes :

		Classes d'exposition			
		XF1	XF2	XF3	XF4
Type de salage (cf. Recommandations Gel 2003)	Peu fréquent	XC4	Sans objet	XC4 si le béton est formulé sans entraîneur d'air, XD1 si le béton est formulé avec entraîneur d'air	Sans objet
	Fréquent	Sans objet	XD1, XD3 pour éléments très exposés*	Sans objet	XD2, XD3 pour éléments très exposés*
	Très fréquent	Sans objet	Sans objet	Sans objet	XD3
* Pour les ponts : corniches, longrines d'ancrage des dispositifs de retenue, solins des joints de dilatation.					

Note (7)

Les exemples informatifs donnés pour les classes XA1, XA2 et XA3 sont à comprendre et préciser comme suit :

- Éléments de structures en contact avec le sol ou un liquide agressif.
- Ouvrages de Génie Civil soumis à des attaques chimiques (par exemple certains bâtiments de catégorie E (cf. clause 1.1.1 (1)P)), suivant les documents particuliers du marché.

Note (8)

Les risques de lixiviation et d'attaque par condensation d'eau pure sont à traiter dans les classes d'exposition XA1, XA2 et XA3 suivant leur sévérité.

4.4.1.2 (3) Note

Clause indiquée ici pour mémoire, figurant dans l'Annexe Nationale mais sans lien direct avec la durabilité.

4.4.1.2 (5) Note

Pour l'application en France de la norme européenne EN 1992-1-1 : 2004, la classe structurale à utiliser pour les bâtiments et ouvrages de génie civil courants est S4, pour des bétons conformes au tableau N.A.F.1 ou N.A.F.2, selon le cas, de l'Annexe Nationale de l'EN 206-1.

Les modifications possibles de classe structurale sont données dans le tableau 4.3NF.

La classe structurale minimale est S1.

Les valeurs de $c_{min,dur}$ à utiliser sont celles du tableau 4.4N (armatures de béton armé) et du tableau 4.5NF (armatures de précontrainte) donné ci-dessous.

NOTE : L'attention est attirée sur les problèmes de fissuration auxquels risque de conduire un enrobage c_{nom} supérieur à 50 mm. Il est donc recommandé, en cas d'environnement agressif, d'utiliser les dispositions du tableau 4.3NF et les clauses 4.4.1.2. (7) et (8) et 4.4.1.3 (3).

L'attention est également attirée sur les difficultés de bétonnage auxquelles risque de conduire un enrobage c_{nom} inférieur à la dimension nominale du plus gros granulat.

TABLEAU 4.3NF : MODULATIONS DE LA CLASSE STRUCTURALE RECOMMANDÉE, EN VUE DE LA DÉTERMINATION DES ENROBAGES MINIMAUX $C_{MIN,DUR}$ DANS LES TABLEAUX 4.4 N ET 4.5 NF

Critère	Classe d'exposition selon tableau 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1 / XA1 (3)	XD2 / XS2 / XA2 (3)	XD3 / XS3 / XA3 (3)
Durée d'utilisation de projet	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2
	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1
Classe de résistance (1)	≥ C30/37 : minoration de 1	≥ C30/37 : minoration de 1	≥ C30/37 : minoration de 1	≥ C35/45 : minoration de 1	≥ C40/50 : minoration de 1	≥ C40/50 : minoration de 1	≥ C45/55 : minoration de 1
	≥ C50/60 : minoration de 2	≥ C50/60 : minoration de 2	≥ C55/67 : minoration de 2	≥ C60/75 : minoration de 2	≥ C60/75 : minoration de 2	≥ C60/75 : minoration de 2	≥ C70/85 : minoration de 2
Nature du liant		Béton de classe ≥ C35/45 à base de CEM I sans cendres volantes : minoration de 1	Béton de classe ≥ C35/45 à base de CEM I sans cendres volantes : minoration de 1	Béton de classe ≥ C40/50 à base de CEM I sans cendres volantes : minoration de 1			
Enrobage compact (2)	Minoration de 1	Minoration de 1	Minoration de 1	Minoration de 1	Minoration de 1	Minoration de 1	Minoration de 1

Note (1)

Par souci de simplicité, la classe de résistance joue ici le rôle d'un indicateur de durabilité. Il peut être judicieux d'adopter, sur la base d'indicateurs de durabilité plus fondamentaux et des valeurs de seuil associées, une justification spécifique de la classe structurale adoptée, en se référant utilement au guide AFGC « Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages », ou à des documents normatifs reposant sur les mêmes principes.

Note (2)

Ce critère s'applique dans les éléments pour lesquels une bonne compacité des enrobages peut être garantie :

- Face coffrée des éléments plans (assimilables à des dalles, éventuellement nervurées), coulés horizontalement sur coffrages industriels.
- Éléments préfabriqués industriellement : éléments extrudés ou filés, ou faces coffrées des éléments coulés dans des coffrages métalliques.
- Sous-face des dalles de pont, éventuellement nervurées, sous réserve de l'accessibilité du fond de coffrage aux dispositifs de vibration.

Note (3)

Pour les classes d'exposition X_{Ai} , cette correspondance est indicative sous réserve d'une justification de la nature de l'agent agressif.

TABLEAU 4.4N : VALEURS DE L'ENROBAGE MINIMAL $c_{\text{MIN,DUR}}$ REQUIS VIS-À-VIS DE LA DURABILITÉ DANS LE CAS DES ARMATURES DE BÉTON ARMÉ CONFORMES À L'EN 10080

Ce tableau, indiqué ici pour mémoire, est conforme au tableau 4.4N des valeurs recommandées et, figurant dans le texte européen, ne sera pas dans l'Annexe Nationale.

Exigence environnementale pour $c_{\text{min,dur}}$ (mm)							
Classe structurale	Classe d'exposition suivant le tableau 4.1						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

TABLEAU 4.5NF : VALEURS DE L'ENROBAGE MINIMAL $c_{\text{MIN,DUR}}$ REQUIS VIS-À-VIS DE LA DURABILITÉ DANS LE CAS DES ARMATURES DE PRÉCONTRAÎNTE

Exigence environnementale pour $c_{\text{min,dur}}$ (mm)							
Classe structurale	Classe d'exposition suivant le tableau 4.1						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	Sans objet	10	15	25	30	35	40
S2		15	25	30	35	40	45
S3		20	30	35	40	45	50
S4		25	35	40	45	50	55
S5		30	40	45	50	55	60
S6		35	45	50	55	60	65

4.4.1.2 (6) Note

Pour l'application en France de la norme européenne EN 1992-1-1 : 2004, la valeur de $\Delta c_{\text{dur,y}}$ à utiliser est celle recommandée.

4.4.1.2 (7) Note

Pour l'application en France de la norme européenne EN 1992-1-1 : 2004, la valeur de $\Delta c_{\text{dur,st}}$ à utiliser est $\Delta c_{\text{dur,st}} = 0$ mm. Toutefois, sur justification spéciale et à condition d'utiliser des aciers dont la résistance à la corrosion est éprouvée (certains aciers inox ou galvanisés, par exemple), pour la durée d'utilisation et dans les conditions d'exposition du projet, les documents particuliers du marché pourront fixer la valeur de $\Delta c_{\text{dur,st}}$. En outre, le choix des matériaux, des paramètres de mise en œuvre et de maintenance doivent faire l'objet d'une étude particulière. De même, l'utilisation de tels aciers ne peut s'effectuer que si les caractéristiques propres de ces aciers (notamment soudabilité, adhérence, dilatation thermique, compatibilité des aciers de nature différente) sont vérifiées et prises en compte de façon appropriée.

4.4.1.2 (8) Note

Pour l'application en France de la norme européenne EN 1992-1-1 : 2004, la valeur à utiliser est $\Delta c_{dur,add} = 0$ mm, sauf pour les revêtements adhérents justifiés vis-à-vis de la pénétration des agents agressifs pendant la durée d'utilisation de projet (ces revêtements sont alors réputés faisant partie intégrante de la structure (cf. clause 1.3 (1)P)). L'enrobage minimal ne peut être inférieur à $c_{min,b}$ et à 10 mm.

4.4.1.2 (13) Note

Pour l'application en France de la norme européenne EN 1992-1-1 : 2004, les valeurs de k_1 , k_2 et k_3 à utiliser sont celles recommandées.

4.4.1.3 (1)P Note

Pour l'application en France de la norme européenne EN 1992-1-1 : 2004, la valeur de Δc_{dev} à utiliser est celle recommandée.

4.4.1.3 (3) Note

Pour l'application en France de la norme européenne EN 1992-1-1 : 2004, la valeur à utiliser pour Δc_{dev} est la suivante :

➤ Lorsque la réalisation est soumise à un système d'assurance qualité dans lequel la surveillance inclut des mesures de l'enrobage des armatures, il est possible de réduire la marge de calcul pour tolérance d'exécution, de sorte que :

$$10 \text{ mm} \geq \Delta c_{dev} \geq 5 \text{ mm.}$$

➤ Lorsqu'on peut garantir l'utilisation d'un appareil de mesure très précis pour la surveillance ainsi que le rejet des éléments non conformes (éléments préfabriqués, par exemple), il est possible de réduire la marge de calcul pour tolérance d'exécution, de sorte que :

$$10 \text{ mm} \geq \Delta c_{dev} \geq 0 \text{ mm.}$$

➤ Lorsque la conception et l'exécution des éléments d'ouvrages y compris leur ferrailage sont soumis à un système d'assurance qualité couvrant toutes les phases de la conception à l'exécution et comprenant les impositions suivantes et ce pour toutes les classes d'exposition,

. en phase de conception et dessin : élaboration des dessins de détail à une grande échelle des ferrillages sensibles (coupe sur bandeau, lisse, parapet, etc.), précisant les enrobages et les façonnages,

. en phase de ferrailage : réception des aciers façonnés et contrôle de leurs dimensions,

. en phase mise en place dans coffrage : élaboration des plans de calage des aciers (type de cales, fréquence des cales, fixation des cales, etc.) ; réception des ferrillages et contrôle des enrobages avant coulage,

. en phase de mise en œuvre du béton : le cas échéant et en tant que de besoin, confection d'un élément témoin qui sera détruit,

$$10 \text{ mm} \geq \Delta c_{dev} \geq 0 \text{ mm.}$$

4.4.1.3 (4) Note

Pour l'application en France de la norme européenne EN 1992-1-1 : 2004, les valeurs à utiliser sont $k_1 = 30$ mm et $k_2 = 65$ mm.

Partie 3

Le retour d'expérience français et la justification des dispositions de l'Annexe Nationale



Introduction

Les dispositions d'enrobage de l'Annexe Nationale française de l'EN 1992-1-1 ont fait l'objet d'une élaboration concertée entre notamment A. de Chefdebien et P. Rougeau (CERIB), A. Coin (mandaté par EGF-BTP), V. Baroghel-Bouny et F. Toutlemonde (LCPC), I. Fonteneau et F. Moulinier (ID Inox), et ont intégré, outre les avis des membres de la commission en séance, ceux de R. Lacroix et J. Cortade (ancien et actuel présidents de la commission BAEL/BPEL/EC2), D. Chauvel (EDF), T. Kretz et B. Godart (LCPC). Ce travail a été effectué sur la base de l'état des connaissances entre octobre 2003 et mars 2004 et l'élaboration du consensus s'est prolongée jusqu'en mai 2005.

Ces dispositions correspondent à une approche cohérente des différents articles susceptibles d'être précisés et des valeurs susceptibles d'être adoptées en Annexe Nationale, relativement à la durabilité des structures en béton, et qui ont trait à la protection des armatures (section 4 de l'EN 1992-1-1).

Ces articles sont les suivants (référence EN 1992-1-1, liste précédant la section 1) :

- Paragraphes 3, 5, 6, 7, 8 et 13, clause 4.4.1.2.
- Paragraphes 1(P), 3 et 4, clause 4.4.1.3.

En outre, l'article 4 du paragraphe 4.1 fait référence à l'Annexe informative E, et le tableau 4.1 de l'alinéa 2 du paragraphe 4.2 contient une colonne également informative, ces éléments informatifs étant basés sur l'EN 206 elle-même associée à une Annexe Nationale. La cohérence avec la norme française issue de l'EN 206 a donc été recherchée, en bénéficiant de la liberté de compléments non contradictoires (notes au tableau 4.1) pour viser la protection des armatures, préoccupation propre à l'EN 1992. Par ailleurs, il a été recherché la possibilité d'appliquer ces dispositions sans modifications pour l'EN 1992-2 (ponts) et l'EN 1992-3 (silos et réservoirs).

Légendes photo page 33 :

- Voûte du CNIT à Paris lors de son réaménagement après trente ans de service. (Remerciements PX-DAM - chapitre ACI de Paris).
- Corrosion des armatures sur un monument historique dans les zones d'enrobage insuffisant. (Remerciements photo LRMH - chapitre ACI de Paris).
- Voile en BAP du centre culturel de Meudon, parement soigné tout en respectant des enrobages faibles. (Photo LCPC).
- Digue flottante de Monaco, ouvrage à la mer ayant fait l'objet d'une étude de durabilité complète. (Photo : Bouygues TP - Remerciements : Chapitre ACI de Paris).

◆ Principes

Les principes suivants ont guidé l'élaboration des dispositions nationales françaises :

- Conserver absolument la méthodologie de détermination de l'enrobage à partir de la détermination successive :

- de la détermination des classes d'exposition (tableau 4.1),
- de la classe structurale (EN 1990, article 5 de la clause 4.4.1.2),
- de modulations de la classe structurale en fonction de choix particuliers pour le projet, engageant le maître d'œuvre (tableau 4.3NF),
- ce qui par application du tableau 4.4N ou 4.5NF conduit à une valeur $c_{\min, \text{dur}}$ qu'il convient de moduler en fonction d'autres aspects complémentaires (articles 3 et 6 à 13 de la clause 4.4.1.2) et de la prise en compte des tolérances d'exécution (clause 4.4.1.3), ce qui engage là aussi le maître d'œuvre.

- Modifier le moins possible les tableaux 4.4N et 4.5N dans lesquels la gradation de l'épaisseur d'enrobage en fonction de la classe d'exposition d'une part, et de la classe structurale de l'autre, paraît à la fois simple et saine du point de vue scientifique.

- Éviter absolument de modifier la classe structurale de référence par rapport à la valeur recommandée au niveau européen.

- Favoriser l'obtention de la durabilité par un choix équilibré entre la qualité de la barrière que constitue l'enrobage, son épaisseur, et les diverses dispositions complémentaires, en privilégiant les dispositions sanctionnées par une base scientifique sûre et vérifiée de façon représentative, et/ou un retour d'expérience satisfaisant. Ceci a notamment conduit à étoffer et préciser les dispositions du tableau 4.3N et les notes afférentes, en s'appuyant non seulement sur les valeurs minimales de résistance de béton issues de l'annexe E, de l'EN 206 ou des documents parallèles dans le domaine des produits préfabriqués, mais aussi en rendant possible et fructueuse l'adoption d'une démarche performancielle vis-à-vis de la durabilité du matériau (cf. document AFGC « Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages », juillet 2004).

- Inciter, par les dispositions liées à la clause 4.4.1.3, à un meilleur contrôle du positionnement des armatures, afin de remédier à un défaut trop courant.

- Assurer la cohérence des dispositions avec les recommandations françaises concernant la durabilité vis-à-vis du gel (Guide technique de la collection Techniques et Méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées « Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel », décembre 2003).

La déclinaison de ces principes est exposée dans ce qui suit, en soulignant les modifications apportées par rapport aux valeurs ou clauses recommandées dans le texte européen. La démarche de validation a notamment consisté à vérifier les valeurs d'enrobage finalement obtenues en appliquant l'ensemble de la démarche, et à les comparer aux pratiques actuelles et au retour d'expérience.

◆ Précisions sur les classes d'exposition (Tableau 4.1)

Cas du béton non armé

Note (1)

- ⋮ Le béton non armé se trouve dans d'autres classes d'exposition que X0 dès lors que ce béton comporte des armatures ou des pièces métalliques noyées et que l'environnement n'est pas classé « très sec ».

Ce complément vise à attirer l'attention sur le fait que la corrosion d'armatures, même si elles se trouvent en faible quantité et n'assurent aucun rôle structural, nuit à la durabilité de l'ouvrage, tant en termes esthétiques que fonctionnels. Il faut donc interpréter le terme « béton non armé » de la deuxième colonne du tableau 4.1 de façon stricte, et non comme dans le titre de la section 12.

Précisions relatives aux classes d'exposition XC

Note (2)

- Les parties des bâtiments à l'abri de la pluie, que ceux-ci soient clos ou non, sont à classer en XC1 à l'exception des parties exposées à des condensations importantes à la fois par leur fréquence et leur durée qui sont alors à classer en XC3.
- C'est le cas notamment de certaines parties d'ouvrages industriels, de buanderies, de papeteries, de locaux de piscines, etc.

Note (3)

- Sont à classer en XC4 les parties aériennes des ouvrages d'art et les parties extérieures des bâtiments non protégées de la pluie, comme par exemple les façades, les pignons et les parties saillantes à l'extérieur, y compris les retours de ces parties concernés par les cheminements et/ou rejaillissements de l'eau.

Ces notes sont de nature à guider le maître d'œuvre dans le choix des classes d'exposition retenues, en précisant les critères permettant de situer sans ambiguïté les parties des bâtiments et constructions usuelles, et le caractère normatif donné au tableau compte tenu des notes, vise ainsi à limiter les interprétations concernant les classes d'exposition dans les cas les plus courants. L'appréciation du risque accru de carbonatation par apport d'eau liquide en surface (pluie ou condensation) est explicité de façon graduelle entre les classes XC1, XC3 et XC4. L'appréciation du risque de projections d'eau et d'environnement favorable à la carbonatation pour les bâtiments (choix entre XC3 et XC4) relève partiellement de la maîtrise d'œuvre. Les exemples indiqués incitent cependant clairement à classer les balcons et leurs retours (pour lesquels le retour d'expérience fait état de risques forts) en classe d'exposition XC4. Pour les ponts, le classement en XC4 tient compte d'un environnement extérieur où même les parties abritées de la pluie sont susceptibles d'être soumises à des ruissellements ou projections d'eau, et où la teneur en gaz carbonique dans l'air environnant l'ouvrage est *a priori* plutôt élevée. L'EN 1992-2 précise par ailleurs que les surfaces protégées par une étanchéité sont à classer en XC3 (classe recommandée que la France prévoit d'adopter).

Précisions relatives aux classes d'exposition XD

Note (4)

- Ne sont à classer en XD3 que les parties d'ouvrages soumises à des projections fréquentes et très fréquentes et contenant des chlorures et sous réserve d'absence de revêtement d'étanchéité assurant la protection du béton. Ne sont donc à classer en XD3 que les parties des parcs de stationnement de véhicules exposées directement aux sels contenant des chlorures (par exemple les parties supérieures des dalles et rampes) et ne comportant pas de revêtement pouvant assurer la protection du béton pendant la durée de vie du projet.

L'interprétation précisée par cette note consiste notamment à réserver *a priori* la classe XD3 aux situations de salage fréquent ou très fréquent, au sens des « Recommandations Gel », pour les chaussées et les ponts et les parties des parcs de stationnement (exemples cités dans le tableau 4.1), le critère de l'humidité qui distingue XD1, XD2 et XD3 devenant alors secondaire.

Précisions relatives à la classe d'exposition XS

Note (5)

Sont à classer en XS3 les éléments de structures en zone de marnage et/ou exposés aux embruns lorsqu'ils sont situés à moins de 100 m de la côte, parfois plus, jusqu'à 500 m, suivant la topographie particulière. Sont à classer en XS1 les éléments de structures situés au-delà de la zone de classement XS3 et situés à moins de 1 km de la côte, parfois plus, jusqu'à 5 km, lorsqu'ils sont exposés à un air véhiculant du sel marin, suivant la topographie particulière.

L'indication de distance à la côte pour les classes d'exposition XS précise les errements issus des documents nationaux actuels, et recherche la cohérence d'interprétation avec les indications de la norme NF EN 206, même si cette dernière vise la prescription du béton et non celle de l'enrobage. En particulier, dans la continuité du CCBA 68 et du BAEL 80, il a paru utile d'attirer l'attention sur le risque d'agents de corrosion que constituent les chlorures véhiculés par voie aérienne jusqu'à une distance typique de 5 km de la côte, avec une sévérité accrue pour l'exposition directe aux embruns jusqu'à plusieurs centaines de mètres. La mention « suivant la topographie particulière » doit permettre de donner au maître d'œuvre une marge d'appréciation. En tout état de cause, ces indications doivent inciter à classer en XS3 non seulement des structures « marines », mais également des bâtiments et ouvrages en zone côtière (pour lesquels le retour d'expérience témoigne du risque effectif de corrosion).

Précisions relatives à la classe d'exposition XF

Note (6)

En France, les classes d'exposition XF1, XF2, XF3 et XF4 sont indiquées dans la carte donnant les zones de gel, sauf spécification particulière notamment fondée sur l'état de saturation du béton (cf. Annexe E en E.2 ou voir l'AN de l'EN 206-1 en NA 4.1, figure NA.2 et Note). Pour ces classes d'exposition XF, et sous réserve du respect des dispositions liées au béton (EN 206-1 et documents normatifs nationaux), l'enrobage sera déterminé par référence à une classe d'exposition XC ou XD, comme indiqué clause 4.4.1.2 (12).

Les classes de référence à retenir pour l'enrobage sont les suivantes :

		Classes d'exposition			
		XF1	XF2	XF3	XF4
Type de salage (cf. Recommandations Gel 2003)	Peu fréquent	XC4	Sans objet	XC4 si le béton est formulé sans entraîneur d'air, XD1 si le béton est formulé avec entraîneur d'air	Sans objet
	Fréquent	Sans objet	XD1, XD3 pour éléments très exposés*	Sans objet	XD2, XD3 pour éléments très exposés*
	Très fréquent	Sans objet	Sans objet	Sans objet	XD3

* Pour les ponts : corniches, longrines d'ancrage des dispositifs de retenue, solins des joints de dilatation.

L'indication de la classe XD1 semble sévère par rapport à l'indication de salage « peu fréquent ». Cependant, la référence à des classes correspondant à la seule carbonatation n'aurait pas conduit à un niveau de protection suffisant, lorsque la présence d'entraîneur d'air augmente la porosité du béton d'enrobage. Le tableau tient donc compte de l'avantage que procure un BHP résistant au gel, formulé sans entraîneur d'air, du point de vue de la protection des armatures.

Par ailleurs, la clause 4.2 (106) de l'EN 1992-2 est cohérente avec ce tableau et ces notes sous réserve d'interpréter « éléments très exposés » (XD3) de façon plus large pour les ponts : sont explicitement visées dans l'EN 1992-2 « toutes les surfaces exposées situées à moins de 6 m de la chaussée dans le sens horizontal, et à moins de 6 m au-dessus de la chaussée, et surfaces supérieures des appuis situés sous les joints de dilatation ». Cette note vise ainsi à assurer la cohérence entre les documents destinés à s'appliquer en France notamment pour les ouvrages relevant des marchés publics, et à guider le maître d'œuvre dans le choix des classes d'exposition. L'appréciation concernant les éléments « très exposés » (classement en XD3) et sa déclinaison pour les ponts s'appuie sur le retour d'expérience (cf. guide technique de la collection Techniques et Méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées « Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel », décembre 2003).

Précisions relatives à la classe d'exposition XA

Note (7)

Les exemples informatifs donnés pour les classes XA1, XA2 et XA3 sont à comprendre et préciser comme suit :

- Éléments de structures en contact avec le sol ou un liquide agressif.
- Ouvrages de Génie civil soumis à des attaques chimiques, par exemple certains bâtiments de catégorie E (cf. clause 1.1.1(1)P), suivant les documents particuliers du marché.

Note (8)

Les risques de lixiviation et d'attaque par condensation d'eau pure sont à traiter dans les classes d'exposition XA1, XA2 et XA3 suivant leur sévérité.

Ces notes visent à attirer l'attention sur l'ampleur des types d'exposition pouvant faire l'objet d'une classification XA, et à engager le maître d'œuvre dans une démarche spécifique suivant la destination de l'ouvrage et la nature de son environnement. Il apparaît en effet que ce type d'environnement peut conduire à des sinistres particulièrement graves ou à des dégradations particulièrement rapides si l'agression n'a pas été correctement identifiée (ouvrages agricoles, couvertures de réservoirs soumis à condensations, agents biologiques, etc.). Ceci a conduit à placer à titre indicatif (selon la note 3 du tableau 4.3NF) les dispositions liées aux classes XA au même niveau que celles relatives aux classes XS, soit la gamme la plus élevée. Il apparaît cependant que les dispositions permettant d'assurer la durabilité sont éminemment variables tant en termes de nature du béton d'enrobage, de choix de ciment, que d'épaisseur d'enrobage, voire de choix d'armatures intrinsèquement protégées, ce qui nécessite une étude au cas par cas.

◆ Modulations de la classe structurale (Tableau 4.3NF)

Modulation de la classe structurale en fonction de la durée d'utilisation de projet

■ La majoration de deux classes pour les structures dont la durée d'utilisation de projet escomptée est de 100 ans est conforme à la disposition recommandée.

■ La minoration d'une classe pour les ouvrages dont la durée d'utilisation de projet est de 25 ans et moins, pour toutes les classes d'exposition, constitue une disposition nationale propre visant à éviter le surdimensionnement des ouvrages à caractère provisoire.

Elle se trouve bornée par la classe minimale recommandée S1 et se trouve justifiée par la progression en racine du temps du front de pénétration des agents agressifs. Pour une profondeur de pénétration égale

par exemple à 15 mm en 50 ans, la pénétration au bout de 25 ans est de $15 / \sqrt{2}$ soit environ 10 mm. On peut donc admettre une réduction d'enrobage de 5 mm ce qui correspond à la réduction de classe envisagée. Pour un environnement plus agressif, la réduction d'une classe structurale est plus sécuritaire. Pour un environnement conduisant à une profondeur de pénétration moindre, la valeur de l'enrobage reste supérieure à 10 mm en classe S1. Le seul cas où la réduction dépasse 5 mm concerne les environnements XC2/XC3 en béton précontraint, si l'on passe de classe S2 en S1, avec les valeurs du tableau 4.5NF. Néanmoins, dans l'éventualité d'une épaisseur de 25 mm consommée au bout de 50 ans, la profondeur de pénétration correspondrait à $25 / \sqrt{2}$ soit environ 17 mm, ce qui n'est pas très différent des 15 mm proposés. On peut en outre penser que cette clause liée aux durées d'utilisation de projet réduites a peu de chances de concerner des éléments en béton précontraint.

Modulation par prise en compte des performances de durabilité du béton

Cet aspect, qui se matérialise essentiellement dans le tableau 4.3NF, correspond aux modifications les plus significatives des dispositions nationales françaises par rapport à celles recommandées au niveau européen.

LIGNES « CLASSE DE RÉSISTANCE » DU TABLEAU 4.3NF, ASSORTIES DE LA NOTE 1

Critère	Classe d'exposition selon le tableau 4.1						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1/XA1 (3)	XD2/XS2/XA2 (3)	XD3/XS3/XA3 (3)
Classe de résistance (1)	≥ C30/37 : minoration de 1	≥ C30/37 : minoration de 1	≥ C30/37 : minoration de 1	≥ C35/45 : minoration de 1	≥ C40/50 : minoration de 1	≥ C40/50 : minoration de 1	≥ C45/55 : minoration de 1
	≥ C50/60 : minoration de 2	≥ C50/60 : minoration de 2	≥ C55/67 : minoration de 2	≥ C60/75 : minoration de 2	≥ C60/75 : minoration de 2	≥ C60/75 : minoration de 2	≥ C70/85 : minoration de 2

Note (1)

Par souci de simplicité, la classe de résistance joue ici le rôle d'un indicateur de durabilité. Il peut être judicieux d'adopter, sur la base d'indicateurs de durabilité plus fondamentaux et des valeurs de seuil associées, une justification spécifique de la classe structurale adoptée, en se référant utilement au guide AFGC « Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages », ou à des documents normatifs reposant sur les mêmes principes.

■ La première ligne, qui conduit à une minoration de 1, est identique à celle du tableau recommandé, sauf :

- pour les classes XC2 / XC3 où le seuil est de C30/37 au lieu de C35/45,
- pour la classe XC4 où le seuil est de C35/45 au lieu de C40/50.

Il est à noter que les valeurs minimales de résistance retenues dans l'Annexe Nationale française de l'EN 206 (annexe E de l'EN 1992-1-1) sont C20/25 pour les classes d'exposition XC1 et XC2, et C25/30 pour les classes d'exposition XC3 et XC4, alors que les valeurs recommandées sont C20/25 pour XC1, C25/30 pour XC2, et C30/37 pour XC3 et XC4. L'incitation à une amélioration de la qualité du béton « rentabilisée » par une minoration de la classe structurale, se situe donc deux classes au-dessus du minimum requis au titre de l'EN 206 pour XC1, XC2 et XC4, et une classe au-dessus pour XC3. La discussion détaillée de ces modifications est reportée à la partie « calibrage et retour d'expérience », un des enjeux importants étant de ne pas modifier de façon économiquement sensible les dispositions actuelles qui donnent satisfaction.

■ La deuxième ligne, qui conduit à une minoration de deux classes, correspond à un seuil de résistance qui se situe quatre classes de résistance au-dessus du seuil permettant la minoration de 1, par rapport à

la ligne du tableau recommandé (soit 20 MPa d'écart sur la résistance sur cylindres, sauf pour la colonne XD3/XS3/XA3 où l'écart est accru vers les bétons à très hautes performances).

Cette deuxième ligne s'appuie sur la réduction très importante de profondeur de carbonatation apportée par les bétons à hautes performances, et sur la réduction également très importante de la diffusion des ions chlorés dans les bétons à hautes et très hautes performances (cf. document AFGC « Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages », juillet 2004). Cette valorisation des BHP pour leur durabilité améliorée est cohérente avec un retour d'expérience important en France sur ce sujet, depuis plus de quinze ans, et avec le retour d'expérience international et la littérature scientifique. Comme indiqué dans la note 1, la classe de résistance est ici utilisée de façon simplifiée comme un indicateur de durabilité ou de compacité. Les réductions d'enrobage proposées n'en restent pas moins sûres (cf. ci-après) et incitatives, notamment dans les cas d'environnements particulièrement agressifs.

■ La note 2 du tableau 4.3N recommandé, incitant à une diminution du seuil de résistance en cas d'utilisation d'air entraîné, si elle a son intérêt vis-à-vis du gel, ne paraît absolument pas justifiée vis-à-vis des agressions considérées (cf. calibrages ci-après) et a été supprimée.

LIGNE « NATURE DU LIANT » DU TABLEAU 4.3NF

Critère	Classe d'exposition suivant le tableau 4.1						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1/XA1 (3)	XD2/XS2/XA2 (3)	XD3/XS3/XA3 (3)
Nature du liant		Béton de classe \geq C35/45 à base de CEM I sans cendres volantes : minoration de 1	Béton de classe \geq C35/45 à base de CEM I sans cendres volantes : minoration de 1	Béton de classe \geq C40/50 à base de CEM I sans cendres volantes : minoration de 1			

Cette ligne illustre l'amorce d'une démarche de justification de la durabilité par dispositions d'enrobage, basée sur une performance du matériau (résistance, traduisant la compacité, située à un niveau de classe de résistance de 5 MPa au-dessus du seuil de la première ligne « classe de résistance » du même tableau 4.3 et nature chimique du liant).

La possibilité de réduction de la classe structurale donnée par cette ligne traduit de façon simplifiée la diminution significative de la profondeur de carbonatation, pour des bétons suffisamment compacts et de nature chimique appropriée (cf. calibrage ci-après). L'exclusion des liants avec cendres volantes tient notamment au fait que, résultats expérimentaux à l'appui, et compte tenu des conditions actuelles de contrôle et de disponibilité industrielle de ces matériaux, une cure nettement plus soignée et prolongée (difficilement réalisable) serait nécessaire pour leur conférer la même compacité en peau, permettant d'atteindre la résistance souhaitée vis-à-vis de la pénétration du gaz carbonique.

◆ Prise en compte des conditions et des choix de réalisation

Modulation par prise en compte des dispositions de mise en œuvre

■ L'intitulé de la ligne du tableau 4.3NF « Éléments assimilables à une dalle (position des armatures non affectée par le processus de construction) » permettant la minoration de 1 de la classe structurale, a été changé en « enrobage compact (2) », permettant la même minoration, assorti de la note 2 :

Note (2)

Ce critère s'applique dans les éléments pour lesquels une bonne compacité des enrobages peut être garantie :

- *Face coffrée des éléments plans (assimilables à des dalles, éventuellement nervurées), coulés horizontalement sur coffrages industriels.*
- *Éléments préfabriqués industriellement : éléments extrudés ou filés, ou faces coffrées des éléments coulés dans des coffrages métalliques.*
- *Sous-face des dalles de ponts, éventuellement nervurées, sous réserve de l'accessibilité du fond de coffrage aux dispositifs de vibration.*

Ces modifications ont pour objet d'explicitier les conditions d'application d'une minoration de la classe structurale, liées à un surcroît de compacité dû au mode de mise en œuvre du béton, en dissociant clairement cette clause des réductions liées au contrôle de la position des armatures, qui se traduisent par une modulation de Δc_{dev} (cf. ci-après). Les zones visées sont effectivement la sous-face des dalles (ce qui était bien le cas dans le tableau recommandé), mais il y a lieu de traiter de façon comparable les parties des éléments préfabriqués industriellement où une bonne compacité des enrobages peut, de la même façon, être garantie. Le retour d'expérience est effectivement positif pour ce type d'éléments, les dispositions nationales n'ont donc pas lieu de modifier les pratiques présentes (cf. précisions du BPEL 91 sur les « parois coffrées »).

Tolérances d'exécution

La valeur de base recommandée pour Δc_{dev} (soit 10 mm, cf. clause 4.4.1.3. 1(P)) est adoptée, et il s'agit d'une nouveauté explicite par rapport aux usages nationaux, qui attire l'attention sur une source connue de dommages. Pour favoriser une meilleure qualité de réalisation, les conditions d'adoption d'une valeur inférieure pour tenir compte des conditions d'exécution et de contrôle sont précisées (cf. clause 4.4.1.3 (3)) :

La valeur de Δc_{dev} est la suivante :

- Lorsque la fabrication est soumise à un système d'assurance qualité dans lequel la surveillance inclut des mesures de l'enrobage des armatures, il est possible de réduire la marge de calcul pour tolérance d'exécution, de sorte que :

$$10 \text{ mm} \geq \Delta c_{dev} \geq 5 \text{ mm.}$$

- Lorsqu'on peut garantir l'utilisation d'un appareil de mesure très précis pour la surveillance ainsi que le rejet des éléments non conformes (éléments préfabriqués, par exemple), il est possible de réduire la marge de calcul pour tolérance d'exécution, de sorte que :

$$10 \text{ mm} \geq \Delta c_{dev} \geq 0 \text{ mm.}$$

- Lorsque la conception et l'exécution des éléments d'ouvrages y compris leur ferrailage sont soumis à un système d'assurance qualité couvrant toutes les phases de la conception à l'exécution et comprenant les impositions suivantes et ce pour toutes les classes d'exposition :

. en phase de conception et dessin : élaboration des dessins de détail à une grande échelle des ferrillages sensibles (coupe sur bandeau, lisse, parapet, etc.), précisant les enrobages et les façonnages,

. en phase de ferrailage : réception des aciers façonnés et contrôle de leurs dimensions,

. en phase mise en place dans coffrage : élaboration des plans de calage des aciers (type de cales, fréquence des cales, fixation des cales, etc.) ; réception des ferrillages et contrôle des enrobages avant coulage,

. en phase de mise en œuvre du béton : le cas échéant et en tant que de besoin, confection d'un élément témoin qui sera détruit,

$$10 \text{ mm} \geq \Delta c_{dev} \geq 0 \text{ mm.}$$

Ces précisions sont apparues comme une explicitation nécessaire des conditions dans lesquelles on pouvait ne pas majorer l'enrobage c_{nom} dans les projets. Elles favorisent notamment, dans la logique de la clause recommandée, les pièces préfabriquées en usine, et développent les conditions parallèles pour des éléments coulés en place. Cette clause se veut pédagogique tant pour la maîtrise d'œuvre que pour

l'entreprise, et voudrait inciter à de meilleures pratiques quant au contrôle de la position réelle des aciers, source d'économies pour tous les acteurs, et d'importants gains de durabilité pour un certain nombre d'éléments exposés. Il pourrait être utile de préciser (mais cela relève de la norme d'exécution, ou de dispositions particulières du marché) les conditions de « réception », une procédure d'assurance de la qualité pouvant par exemple prévoir le rejet des aciers (respectivement ferrailrages) non conformes, pour les phases de ferrailage et de mise en place dans le coffrage respectivement.

Commentaires relatifs à c_{nom}

⋮ L'attention est attirée sur les problèmes de fissuration auxquels risque de conduire un enrobage c_{nom} supérieur à 50 mm, il est donc important, en cas d'environnement agressif, d'utiliser les dispositions du tableau 4.3N et les clauses 4.4.1.2 (7) et (8) et 4.4.1.3 (3).

⋮ L'attention est également attirée sur les difficultés de bétonnage auxquelles risque de conduire un enrobage c_{nom} inférieur à la dimension nominale du plus gros granulats.

Ces commentaires, situés au sein de la clause 4.4.1.2 (5) qui donne en quelque sorte le « mode d'emploi » de détermination de l'enrobage au titre de la durabilité, par référence à la classe structurale et à l'exposition, ne sont pas directement issus d'une valeur à fixer au niveau national. Ils traduisent en revanche une préoccupation constante de la réglementation française vis-à-vis de défauts avérés : nids de cailloux, fissurations excessivement ouvertes. Le texte actuel de l'EN 1992-1-1 apparaît lacunaire à cet égard. **L'enjeu de ces remarques est donc tout à fait capital en termes de qualité et de durabilité des ouvrages.**

La remarque concernant la dimension du plus gros granulats se justifie aisément, elle est par exemple issue des dispositions françaises actuelles, assez détaillées (BAEL Article A.7.2). Elle est cohérente avec une modification de la clause 4.4.1.2 (3) où une ouverture était rendue possible en Annexe Nationale :

⋮ La valeur de $c_{min,b}$ à utiliser est (...) pour les armatures de précontrainte pré-tendues, deux fois le diamètre du toron ou du fil lisse ou du fil cranté, ou le diamètre du plus gros granulats si celui-ci est supérieur.

Par ailleurs, la valeur plafond de 50 mm, admise dans les pratiques et réglementations françaises actuelles (BAEL Article A.7.1), est réputée avoir conduit à un retour d'expérience satisfaisant y compris dans des conditions d'exposition extrêmes (plates-formes off-shore), pour autant que les conditions de nature et compacité du béton aient été remplies. On note la remarque « Il ne semble pas y avoir intérêt à augmenter dans les parties tendues l'enrobage minimal fixé pour les armatures des ouvrages à la mer, sauf pour les pièces massives » (CCBA 68, BAEL 80, DTU 21 de 1984) suivie par « une protection efficace des armatures ne peut être offerte par le seul respect de l'enrobage prescrit » (mêmes textes). Le premier commentaire insiste donc de la même façon sur cet équilibre des moyens à mettre en œuvre pour atteindre un niveau de protection satisfaisant des armatures, dans les conditions d'exposition les plus sévères. Cette remarque est cohérente avec l'adoption de la valeur recommandée $\Delta c_{dur,\gamma}$ de 0 mm, clause 4.4.1.2 (6).

Modulation par prise en compte d'une protection propre à l'armature

La rédaction de la note de l'Annexe Nationale à la clause 4.4.1.2 (7) a fait l'objet de discussions longues, compte tenu à la fois de l'élégance et de l'efficacité de solutions assurant la durabilité principalement par une protection propre à l'armature (par exemple, lorsque l'élément a une vocation esthétique ou que sa réparation est difficile), et d'un retour d'expérience très limité en France. Le texte final traduit ce compromis, en engageant le maître d'œuvre à une étude détaillée de la nature chimique des agressions, permettant un choix approprié de la solution :

⋮ La valeur de $\Delta c_{dur,st}$ à utiliser est 0 mm. Toutefois, sur justification spéciale et à condition d'utiliser des aciers dont la résistance à la corrosion est éprouvée (certains aciers inox ou galvanisés, par exemple) pour la durée d'utilisation et dans les conditions d'exposition du projet, les documents particuliers du marché pourront fixer la valeur de $\Delta c_{dur,st}$. En outre, le choix des matériaux, des paramètres de mise en œuvre et de maintenance doivent faire l'objet d'une étude particulière. De même, l'utilisation de tels aciers ne peut s'effectuer que si les

caractéristiques propres de ces aciers (notamment soudabilité, adhérence, dilatation thermique, compatibilité des aciers de nature différente) sont vérifiées et prises en compte de façon appropriée.

On note que la valeur recommandée est conservée comme valeur par défaut, et que ce sont les conditions de dérogation qui sont précisées, sans qu'une valeur maximale de $\Delta c_{dur,st}$ ne soit fixée, car l'appréciation du risque résiduel et de l'efficacité de la disposition dépendent trop de chaque cas d'espèce. Le point d'attention principal soulevé lors de la discussion est tracé autant que possible dans cette rédaction, à savoir que l'agressivité des conditions d'exposition est à apprécier de façon particulière pour le choix des nuances d'acier inoxydable : par exemple, l'immersion prolongée ou la présence de chlorures nécessiteront une nuance plus résistante, et à cet égard les classes XC2 et XD2 peuvent recouvrir un risque potentiel élevé de corrosion si l'inox est mal choisi. L'état de l'art consulté, faisant notamment référence à des travaux européens et à des utilisations en Amérique du Nord, a permis de lister des points d'attention particulière qui doivent être appréciés dans le contexte de chaque projet.

Prise en compte de protections ou défauts de protection et irrégularités de surface

- En cas de risques d'abrasion, clause 4.4.1.2 (13), adoption des valeurs recommandées.
- En cas d'utilisation d'un revêtement, clause 4.4.1.2 (8), adoption de la valeur recommandée avec précision des conditions de dérogation :

La valeur à utiliser est $\Delta c_{dur,add} = 0$ mm, sauf pour les revêtements adhérents justifiés vis-à-vis de la pénétration des agents agressifs pendant la durée d'utilisation de projet (ces revêtements sont alors réputés faisant partie intégrante de la structure, cf. 1.3 (1)P). L'enrobage minimal ne peut être inférieur à $c_{min,b}$ et à 10 mm.

La fin de la clause rappelle l'équation 4.2, clause 4.4.1.2 2(P) tout en indiquant l'absence de limite pour $\Delta c_{dur,add}$ dans le cas général. De façon analogue à la prise en compte d'une protection propre à l'armature, la justification de l'adhérence et de l'efficacité du revêtement doit en effet s'apprécier vis-à-vis du projet, tant en termes performanciers qu'en termes de durée, et la valeur de réduction d'enrobage doit se déduire de cette étude particulière. La mention de la clause 1.3 (1)P et le rattachement du revêtement à la structure correspond au rattachement des responsabilités y afférentes, notamment eu égard à la maintenance, ce qui est particulièrement important dans le cas du bâtiment.

- Béton coulé au contact de surfaces irrégulières, clause 4.4.1.3 (4) : adoption de valeurs $k_1 = 30$ mm et $k_2 = 65$ mm au lieu de 40 mm et 75 mm respectivement. Les valeurs recommandées sont apparues excessives eu égard à la pratique française et à la dimension des irrégularités rencontrées.

◆ Autres dispositions et modifications

Modifications du tableau 4.5 NF par rapport aux valeurs recommandées

- Ces modifications sont strictement limitées aux trois cas suivants :
 - pour toutes classes structurales, non pertinence de la classe X0 en béton précontraint,
 - classe structurale S1, exposition XC1 : 10 mm (au lieu de 15 mm),
 - classe structurale S1, exposition XC2/XC3 : 15 mm (au lieu de 20 mm).

La première modification est de justification évidente, elle vise plutôt à éviter des erreurs : en effet compte tenu de l'incidence de la corrosion sur les armatures actives même en cas d'environnement « très sec » il n'est pas raisonnable d'envisager une classe X0, et la classe XC1 n'apporte pas de contrainte importante par rapport à la pratique.

La seconde et la troisième modifications concernent essentiellement les poutrelles préfabriquées précontraintes, et autres éléments filants utilisés en bâtiment. Elles se raccordent à la pratique actuelle en

France pour laquelle le retour d'expérience est satisfaisant pour les éléments préfabriqués en usine avec le contrôle qualité adapté. En effet pour de tels éléments, la classe de référence est S4. Les conditions d'enrobage compact et la résistance, supérieure à C30/37 et généralement même supérieure à C50/60 voire C55/67, permettent de se placer en classe structurale S1 (tableau 4.3NF). Les conditions d'exécution permettent de réduire Δc_{dev} à 0, d'après la clause 4.4.1.3 (3). La valeur du tableau 4.5N au croisement S1, XC1 ou XC2/XC3, correspond alors à la valeur de l'enrobage nominal, qu'il n'y a pas lieu de majorer par rapport à la pratique actuelle. On note que pour la classe XC1, la disposition proposée conduit à une gradation plus régulière en fonction de la classe structurale. Par ailleurs, pour la classe d'exposition XC4 correspondant au risque le plus élevé de carbonatation (exposition extérieure avec alternances d'humidité et de séchage), la valeur recommandée est conservée.

◆ Comparaison entre le calibrage et le retour d'expérience

Les modifications les plus importantes apportées aux valeurs recommandées, et conduisant de la façon la plus nette à des réductions d'enrobages par rapport aux dispositions par défaut au niveau européen, correspondent à la prise en compte de la résistance et de la composition de certains bétons, notamment pour des ouvrages ou éléments situés dans les classes d'exposition XC1, XC3 et XC4. On s'est donc particulièrement attaché à vérifier ces situations, ainsi que des cas typiques d'éléments d'ouvrages d'art ou de bâtiments.

Mesures et retour d'expérience quantitatif

■ Mesures de profondeur de carbonatation sur des ponts courants

⋮ Référence des données : B. Tonnoir, actes des journées « Durabilité », Bordeaux, mars 2000, éd. LCPC, pp. 145-152.

Le laboratoire a réalisé 259 prélèvements à 20 ans dans 48 ouvrages courants sur l'autoroute A21 (PS et PI). La classe probable de résistance du béton est C30/37. Une porosité moyenne de 14,9 % a été mesurée.

Les résultats significatifs sont les suivants :

- profondeur moyenne de carbonatation à 20 ans = 9,3 mm,
- profondeur de carbonatation « caractéristique » (dépassée par 22 % de l'échantillon) au bout de 20 ans égale à 15 mm,
- profondeur de carbonatation plus élevée et plus dispersée pour les éléments verticaux, indépendamment de l'exposition à la pluie,
- profondeur moyenne de carbonatation à 20 ans en sous-face de tablier égale à 6,5 mm, et porosité moyenne plus faible (15,1 % pour 15,5 % en moyenne).

On en déduit les extrapolations suivantes en supposant en première approximation et faute d'autres éléments d'information une progression du front de carbonatation en racine carrée du temps :

- profondeur moyenne : à 50 ans 14 mm à 100 ans 20 mm,
- profondeur « caractéristique » : à 50 ans 24 mm à 100 ans 33 mm,
- profondeur moyenne « tabliers » : à 50 ans 10,3 mm à 100 ans 14,5 mm.

Interprétation pour les ponts : Exposition XC4, classe structurale S6, pas de modulation liée à la qualité du béton. Pour les parties verticales, l'enrobage requis est de 40 mm et couvre la profondeur de carbonatation « caractéristique » à 100 ans. Pour les parties horizontales, on bénéficie de la réduction

« enrobage compact », l'enrobage requis est de 35 mm soit un peu plus de deux fois la profondeur moyenne de carbonatation observée. Il couvre environ 90 % de l'échantillon (par extrapolation des mesures pour les tabliers on aurait au bout de 100 ans une profondeur de carbonatation supérieure à 33 mm dans 9 % des cas).

Interprétation pour les bâtiments : Pour les parties exposées à la pluie, exposition XC4, classe structurale S4, pas de modulation liée à la qualité du béton. L'enrobage requis est de 30 mm et couvre la profondeur de carbonatation « caractéristique » à 50 ans. Pour les parties extérieures abritées de la pluie, exposition XC3, classe structurale S3 par minoration liée à la qualité du béton. L'enrobage requis est de 20 mm, il est supérieur à la profondeur moyenne mais la profondeur de carbonatation lui est supérieure dans au moins 25 % des cas. **On note donc l'enjeu important du choix par la maîtrise d'œuvre de la classification de l'exposition en XC3 ou XC4 pour les éléments extérieurs protégés courants de bâtiment, de nature à conduire au bout de 50 ans à une différence significative dans l'état de corrosion des armatures.**

■ Mesures de profondeur de carbonatation sur des éléments témoins

Référence des données : V. Baroghel-Bouny et al., « Vieillissement des bétons en milieu naturel : une expérimentation pour le XXI^e siècle. IV. Résultats issus des prélèvements effectués sur les corps d'épreuve de différents sites aux premières échéances de mesure », Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées n° 249, mars-avril 2004, pp. 49-100.

L'étude a porté sur 15 bétons, de classe variant entre C20/25 et C90/105. Les éléments ont été exposés dans 3 sites correspondant vis-à-vis de la carbonatation aux classes XC2, XC4 et XC4/XF2. Les prélèvements concernent des faces subverticales. Les profondeurs de carbonatation ont été mesurées à 1 an, 2 ans et 4 ans, avec 3 prélèvements par échéance, et manifestent une bonne cohérence entre les 3 échéances : la valeur expérimentale maximale est indiquée dans les tableaux et peut être assimilée à une valeur « caractéristique », utilisée ensuite pour extrapolation à 50 et 100 ans.

SITE CORRESPONDANT À UNE EXPOSITION XC2 VIS-À-VIS DE LA CARBONATATION (ZONE DE MARNAGE)

Classe	Référence article	Profondeur relevée à 4 ans (mm)	Profondeur extrapolée à 50 ans (mm)	Profondeur extrapolée à 100 ans (mm)	Enrobage requis EC2 (mm)	
					Bâtiment Béton armé S4, 50 ans	Ouvrage d'art Béton armé S6, 100 ans
C20/25	M25CV	5 à 7	17 à 25	25 à 35	25	35 **
C20/25	M25	3 à 5	10 à 18	15 à 25	25	35 **
C40/50	M30CV*	2 à 5	7 à 18	10 à 25	20	30
C50/60	M50CV	0 à 5	0 à 18	0 à 25	20	30
C50/60	M50	0 à 2	0 à 7	0 à 10	15	25
C70/85	M75	0	< 5	< 5	10	20
C70/85	M75FS	0 à 1	0 à 4	0 à 5	10	20
C90/105	M100FS	0	< 5	< 5	10	20
C90/105	M120FS	0	< 5	< 5	10	20

* Formulation non conforme au sens de la norme NF P 18-305.

** Classe exclue au sens du fascicule 65, mais autorisée au sens de l'EN 206.

La proposition faite est **assez ajustée** notamment quand on a une addition significative de cendres volantes (moins bonne résistance à la carbonatation liée à une cure plus exigeante au jeune âge). On note le cas limite du C50/60 avec CV qui justifie la précaution par rapport au C50/60 ne comportant pas de cendres volantes (M50CV par rapport à M50).

SITES CORRESPONDANT À UNE EXPOSITION XC4 VIS-À-VIS DE LA CARBONATATION

Classe	Référence article	Profondeur relevée à 4 ans (mm)		Profondeur extrapolée à 50 ans (mm)	Profondeur extrapolée à 100 ans (mm)	Enrobage requis EC2 (mm)	
		Melun	Maurienne			Bâtiment S4, 50 ans	Ouvrage d'art S6, 100 ans
C20/25	M25CV	15	10 à 15	35 à 53	50 à 75	30**	40****
C20/25	M25	10	5 à 12	17 à 42	25 à 60	30**	40****
C25/30	M25CVEA		9 à 20	31 à 70	45 à 100	30***	40*****
C25/30	M25EA		7 à 10	24 à 35	35 à 50	30***	40*****
C40/50	M30CV*	7	5 à 10	25 / 17 à 35	35 / 25 à 50	25	35*****
C40/50	M50CVEA		3 à 6	10 à 21	15 à 30	25	35*****
C40/50	M50EA		1 à 2	3 à 7	5 à 10	20	30
C50/60	M50CV	3	2 à 10	11 / 7 à 35	15 / 10 à 50	25	35*****
C50/60	M50	1	0	4	5	20	30
C60/75	M75FSEA		2 à 10♦	7 à 35	10 à 50	20	30
C70/85	M75EA		0	< 5	< 5	20	30
C70/85	M75	0	0	< 5	< 5	20	30
C70/85	M75FS	1	0	4	5	20	30
C90/105	M100FS	0	0	< 5	< 5	20	30
C90/105	M120FS	0	0	< 5	< 5	20	30

* Formulation non conforme au sens de la norme NF P 18-305.

** Classe exclue au sens de l'EN 206 et de l'EN 13369.

*** Classe exclue au sens de l'EN 13369 mais autorisée au sens de l'EN 206.

**** Classe exclue au sens du fascicule 65 et de l'EN 206.

***** Classe exclue au sens du fascicule 65, mais autorisée au sens de l'EN 206.

***** Formulation exclue au sens des « Recommandations Gel ».

♦ Constat de ségrégation.

L'exclusion des bétons de classe inférieure à C30/37 se trouve justifiée (EN 13369 et fascicule 65 révisé), les formules de résistance C25/30 correspondant au minimum autorisé par la NF EN 206-1 ne donnent pas satisfaction, notamment à cause de la forte hétérogénéité des profondeurs de carbonatation relevées. Cet effet pourrait être induit par la présence d'air entraîné dans les deux formules testées, et justifie en tous cas la suppression de la note 2 du tableau 4.3N recommandé au niveau européen. Le béton M30CV présente un caractère non conforme à la norme P18-305 (teneur excessive en cendres volantes). On note que vis-à-vis de la seule carbonatation il est limite (site de Melun) et en cas de gel (Maurienne) il ne donne pas satisfaction (cf. fascicule 65 révisé et Recommandations gel).

Pour les autres bétons C40/50 et au-delà, les enrobages proposés sont raisonnables, et assez confortables pour les BHP, avec deux cas qui montrent la nécessité de la prudence :

➤ cas du M50CV pour lequel la présence de cendres volantes, si elle n'est pas accompagnée d'une cure soignée, est assez risquée en cas de gel : forte dispersion des profondeurs de carbonatation,

➤ cas du M75FSEA, de formulation assez mal optimisée et donnant lieu à parements peu compacts et à ségrégation : forte dispersion des profondeurs de carbonatation, avec risque de dégradations locales - intérêt dans ce cas d'une démarche avec indicateurs de durabilité et formulation résistant au gel sans incorporation d'air entraîné.

■ **Essais de carbonatation accélérée en laboratoire**

⋮ Référence des données : rapport CERIB DDE 31, juillet 2003.

Figure 2.3 - Carbonatation dans des conditions équivalentes à XC3 :

C20+	30 mm à 50 ans	40 mm à 100 ans	classe exclue
C30+	12 mm à 50 ans	18 mm à 100 ans	requis EC2 : 20 mm (S4), 30 mm (S6).

L'exclusion de la classe de résistance C20/25 se trouve justifiée, les enrobages requis de 25 mm (S4) et 35 mm (S6) ne couvrant pas les profondeurs de carbonatation mesurées.

Figure 2.10 - avec les e/c maximum autorisés par l'EN 206 :

XC1	e/c = 0,65	35 mm à 50 ans en conditions XC3	
XC2	e/c = 0,65	35 mm à 50 ans en conditions XC3	
XC3	e/c = 0,6	28 mm à 50 ans en conditions XC3	requis EC2 : 25 mm (S4).

Les dispositions prévues sont à peine satisfaisantes en conditions XC3 si on est trop près des valeurs basses de résistance autorisées par la NF EN 206-1, à cause d'une forte porosité du béton (teneur en eau initiale, ou air entraîné, cf. ci-dessus). Elles risquent de le devenir uniquement par prise en compte de la tolérance d'exécution, ce qui n'est normalement pas fait pour couvrir les mêmes défauts. **L'attention des maîtres d'œuvre semble donc devoir être attirée sur la prudence à avoir vis-à-vis de la classification XC3 : si cette classe d'exposition est adoptée et sert de référence pour le calcul de l'enrobage, il est alors nécessaire de se situer sensiblement au-dessus des limites basses requises vis-à-vis de cette classe au titre de la norme NF EN 206-1 (par exemple avec un béton XC4).**

Situations de projet typiques ou sensibles

■ **Parties de ponts en béton armé en zone côtière (XS3)**

Avec le béton de résistance minimale (C35/45) l'enrobage $c_{\min, \text{dur}}$ est de 55 mm. On se ramène à 50 mm (valeur cible) en utilisant un C45/55, ce qui est admissible pour des ouvrages d'art si on recherche une durée d'utilisation de projet de 100 ans dans ces conditions d'exposition maximale. Un gain est encore possible avec un C70/85, ce qui est logique compte tenu de la nécessité d'une porosité réellement très fermée (assez bien corrélée à la résistance) pour s'opposer effectivement à la pénétration des ions chlore.

■ **Parties de ponts en béton précontraint exposées à des chlorures (XS3, XD3)**

Avec le béton de résistance minimale (C35/45) l'enrobage $c_{\min, \text{dur}}$ est de 65 mm. Pour se ramener à 50 mm (valeur cible) il faut envisager absolument, sauf étude particulière, une résistance supérieure à C70/85 et des conditions permettant d'assurer un enrobage compact (coffrage industriel). Ces conditions apparaissent assez strictes mais sont cohérentes avec le fait que les réductions effectives de diffusion des ions chlorures sont obtenues avant tout pour les BHP avec fumée de silice. On note que c'est ce type de choix qui a été retenu pour des ouvrages concédés où une approche performancielle de la durabilité a été mise en œuvre, avec des calculs de durée de vie : pont de la Confédération par exemple. On peut aussi noter que des épaisseurs d'enrobage plus réduites pour des ouvrages en béton C35/45 précontraint dans des zones exposées, ne permettent effectivement pas (au vu du retour d'expérience et des corrosions observées) de garantir une durée de vie de projet de 100 ans.

■ Murs extérieurs des bâtiments en béton armé en front de mer (XS3)

Avec le béton de résistance minimale (C35/45) l'enrobage $c_{\min, \text{dur}}$ est de 45 mm. Pour des bâtiments courants, on tiendra probablement compte d'une tolérance d'exécution induisant un Δc_{dev} de 5 à 10 mm. On est donc proche des dispositions actuelles du BAEL (50 mm).

■ Dalle de plancher dans un bâtiment d'habitation (XC1)

Avec le béton de résistance minimale (C25/30) - le plus couramment employé - l'enrobage $c_{\min, \text{dur}}$ est de 10 mm en tenant compte d'une mise en œuvre qui assure un enrobage compact. On est donc identique aux dispositions actuelles du BAEL. La prise en compte de la tolérance d'exécution peut induire un Δc_{dev} de 0 à 10 mm. La recherche d'absence d'incidence économique sur le projet incite donc à mieux garantir le positionnement du ferrailage.

■ Parois en béton armé des façades et pignons de bâtiment (XC4)

Avec le béton de résistance minimale (C25/30) - le plus couramment employé - l'enrobage $c_{\min, \text{dur}}$ est de 30 mm. On est donc identique aux dispositions actuelles du BAEL. La prise en compte de la tolérance d'exécution peut induire un Δc_{dev} de 5 à 10 mm, l'incidence économique sur le projet semble faible car dans la majorité des parois les aciers sont choisis pour des raisons constructives (acier de peau des murs, ferrailage type des linteaux, bandeaux et autres pièces en saillie).

■ Dalle et poutrelles du plancher courant d'un parking aérien de véhicules légers (XC1)

Les locaux sont couverts, non clos (façades habituellement sans fenêtre), à l'abri de la pluie et on pourra en général admettre l'absence de condensation (l'air extérieur est rarement saturé d'humidité, il n'y a que peu d'écart de température entre cet air ambiant et le béton du fait de l'absence de chauffage, et il y a une bonne ventilation). C'est donc la classe d'exposition XC1. Avec le béton de résistance minimale (C25/30) - le plus couramment employé - l'enrobage en sous-face des hourdis $c_{\min, \text{dur}}$ est de 10 mm en tenant compte du fait que l'enrobage est compact (coulage sur coffrage industriel). Cette valeur est identique à celle du BAEL. Moyennant des conditions strictes d'exécution et de contrôle, la valeur de Δc_{dev} peut être ramenée à 0 mm.

Il y a lieu d'attirer l'attention du maître d'œuvre sur ce classement XC1 qui correspond à une garantie implicite de l'absence de condensation. Si on classe en XC2 (risques d'humidité persistante) ou en XC3 (humidité modérée - qui correspondrait à une sévérité accrue pour prise en compte implicite d'un taux de gaz carbonique plutôt élevé, favorable à la carbonatation), même en tenant compte de la réduction pour enrobage compact, on passe à 20 mm au lieu de 10 mm. Compte tenu de l'incidence économique de l'enrobage vis-à-vis des joues latérales du soffite (élargir les poutrelles d'environ 2 cm revient à augmenter l'épaisseur moyenne du plancher d'environ 1 cm, soit une augmentation du poids mort de ce plancher de l'ordre de 5 à 7 %), il y a donc une incitation forte à contrôler effectivement le positionnement du ferrailage et à assurer une ventilation importante et l'absence de condensations.

■ Parois en béton armé d'aéroréfrigérants de centrales de production électrique (XC4)

Compte tenu de la durée de vie de projet qui serait actuellement prise à 60 ans (soit supérieure à 50 ans) il y aurait lieu de se référer à une classe structurale S5, d'où un enrobage $c_{\min, \text{dur}}$ de 35 mm. Si on recherche la cohérence avec les dispositions actuelles, justifiées par rapport à une durée de vie de projet initialement fixée à 40 ans (enrobage nominal de 30 mm, béton C30/37), et pour lesquelles il a été constaté des profondeurs de carbonatation de 10 à 12 mm à 15 ans, soit une extrapolation à 20 à 24 mm à 60 ans (données qui confortent les données du retour d'expérience sur les ponts d'A21, et qui pourraient légitimer un enrobage de 30 mm), il y aurait lieu d'admettre :

- que les conditions de bétonnage ont permis d'assurer un enrobage compact,
- et/ou que (sous réserve de vérification) la formulation du béton permet d'assurer une résistance vis-à-vis de la carbonatation identique à celle qu'aurait procurée un C35/45 ;
- que les conditions de calage du ferrailage et de contrôle des conditions d'exécution permettent de réduire à 5 mm, voire à 0 mm la valeur de Δc_{dev} .

On note que les dispositions récentes pour ces ouvrages (aéroréfrigérants de la centrale de Civaux, 1991) contribuent à expliquer le bon retour d'expérience même avec un enrobage apparemment faible :

- ciment « spécial coque » (mélange clinker-laitier permettant la maîtrise de la chaleur d'hydratation et de la fissuration d'origine thermique),
- rapport e/c inférieur à 0,5,
- porosité inférieure à 13 %,
- perméabilité à l'eau de 10^{-18} cm/s,
- absorption capillaire inférieure à 0,8 g/cm²,
- résistance au gel/dégel (selon mode opératoire EDF),
- sans compter les exigences de cure et de traitement des reprises de bétonnage.

Ces spécifications ont en fait conduit à un béton de plus de 50 MPa. Elles seraient probablement reconduites dans leur esprit pour un ouvrage neuf ; on est donc tout à fait dans le cas d'application de la note 2 du tableau 4.3NF.

■ **Ponts en béton armé soumis au gel et salage fréquent (XF2, XF4)**

On compare les prescriptions issues du guide technique de la collection Techniques et Méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées « Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel » (décembre 2003), aux dispositions issues de l'Eurocode. Il est à noter que ces recommandations s'appliquent explicitement aux ouvrages relevant du fascicule 65 (plutôt des ponts que des bâtiments, correspondant à la classe structurale S6...) et ne sont pas focalisées sur les dispositions d'enrobage, mais plutôt sur le béton, d'où parfois une marge d'interprétation difficile à préciser dans le cas général.

CHOIX DU BÉTON : BÉTON « G + S » - CLASSE INDICATIVE SUPÉRIEURE OU ÉGALE À C30/37

	Gel modéré ou sévère, parties peu exposées (XD1)				Gel modéré, sévère ou très sévère Éléments très exposés (XD3)			
	Recommandations Gel		EC2		Recommandations Gel		EC2	
	Général	Préfabriqué	Général	Enrobage compact	Général	Préfabriqué	Général	Enrobage compact
C30/37, C35/45	40 à 60	35	45	40	40 à 60	35*	55	50
C40/50	40 à 60	35	40	35	40 à 60	35*	55	50
C45/55	40 à 60	35	40	35	40 à 60	35*	50	45
C50/60, C55/67	35	30	40	35	35*	30*	50	45
C60/75	30	25	35	30	30*	25*	50	45
C70/85 et plus	30	25	35	30	30*	25*	45	40

* Noter que ces valeurs dérogent apparemment aux prescriptions du BAEL : 50 mm pour les ouvrages exposés à des atmosphères très agressives (ce qui paraît au minimum le cas pour XD3), même si on peut supposer admissible une réduction pour les bétons de résistance supérieure à 40 MPa.

Les dispositions de l'Eurocode conduisent en moyenne à un enrobage supérieur de 5 mm dans les parties peu exposées, et de 15 mm dans les parties les plus exposées où les Recommandations Gel semblent insuffisantes (et dérogent au BAEL avec lequel l'EN 1992 est plus cohérent, conduisant à des enrobages de l'ordre de 50 mm). Le classement en XD2 des surfaces modérément exposées permet de retrouver le niveau de prescription admis actuellement, avec un enrobage typique de 50 mm pour les bétons courants C30/37 à C35/45, où il n'y a pas lieu de relaxer le niveau de protection.

Pour limiter l'enrobage à 50 mm pour les éléments très exposés, les dispositions visant à assurer un « enrobage compact », les dispositions de contrôle du positionnement du ferrailage, ou le choix d'un béton de résistance élevée (au-dessus de C45/55), voire le choix d'armatures protégées de la corrosion sont clairement favorisés, ce qui va dans le sens d'une durabilité améliorée pour des parties d'ouvrage dont l'entretien ou la réparation sont effectivement onéreux. On peut également penser que pour certaines parties très exposées dont on cherche à limiter le poids et qui ne requièrent généralement pas un béton de haute qualité (trottoirs, corniches), des évolutions de conception pourront intervenir (si on ne veut pas passer à un béton à très hautes performances : protection par dispositif d'étanchéité, armatures auto-protégées, etc.), selon les modalités qui apparaîtront les plus judicieuses et économiques.

■ Structures courantes en béton armé soumises au gel et salage peu fréquent (XF1, XF3)

On compare les prescriptions issues du guide technique de la collection Techniques et Méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées « Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel » (décembre 2003), aux dispositions issues de l'Eurocode, pour des ouvrages de classe structurale de référence S4 (*a priori* les dispositions des recommandations Gel, visant les ouvrages de génie civil relevant du fascicule 65, visent une classe structurale supérieure). Pour des parties extérieures de bâtiments exposées au gel sévère (XF3) et même si le salage est peu fréquent, on considèrera suivant la note 6 au tableau 4.1 de la clause 4.2 (2) une classe d'exposition XD1 sauf pour un béton résistant au gel et formulé sans air entraîné (en pratique, un béton de classe C60/75 ou plus) où on considèrera la classe XC4.

CHOIX DU BÉTON : BÉTON « G » - CLASSE INDICATIVE SUPÉRIEURE OU ÉGALE À C25/30

	Gel modéré (XF1/XC4)				Gel sévère (XF3/XD1 ou XC4)			
	Recommandations Gel			EC2	Recommandations Gel		EC2	
	Général	Préfabriqué	Général	Enrobage compact	Général	Préfabriqué	Général	Enrobage compact
C25/30	40 à 60	35	30	25	40 à 60	35	-	-
C30/37	40 à 60	35	30	25	40 à 60	35	35	30
C35/45	40 à 60	35	25	20	40 à 60	35	35	30
C40/50, C45/55	40 à 60	35	25	20	40 à 60	35	30	25
C50/60, C55/67	35	30	25	20	35	30	30	25
C60/75 et plus	30	25	20	15	30	25	25/20*	20/15*

* Pour un béton « G » résistant au gel sans entraîneur d'air.

L'écart de prescription est alors en général de 10 mm, avec des enrobages de l'ordre de 30 mm pour les structures soumises au gel modéré, et de 40 mm pour les cas de gel sévère, tolérance comprise, sauf utilisation de bétons à hautes performances. Cet écart est compatible avec l'écart de durée de vie de projet entre les ouvrages relevant des Recommandations (100 ans) et la classe S4 visée par l'Eurocode. Moyennant l'interprétation ci-dessus, on peut considérer que l'Eurocode assorti de l'Annexe Nationale française, et les récentes « Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel » conduisent à des dispositions cohérentes en moyenne.

Partie 4

*L'incidence économique
en cas d'adoption
des valeurs recommandées
de l'EN 1992-1-1 : 2004*



Introduction

Cette partie du rapport a été rédigée par les membres du Groupe miroir qui ont considéré que l'incidence économique d'une clause technique devait être recherchée et qui ont été mandatés et se sont considérés comme compétents pour estimer cette incidence. Il s'agit, en particulier, des représentants des Entreprises, dont EGF-BTP.

Les autres membres du Groupe miroir, non mandatés pour cette approche économique, ne se sont pas prononcés mais ont cependant été tenus informés.

Légende photo page 51 :

- Mise en place de cales pour assurer la position du ferrailage d'un élément vertical.
(Remerciements : EGF-BTP).

◆ Dalle de plancher d'un bâtiment d'habitation

On est dans le cas de béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est moyen (entre 40 et 60 % HR). En centre ville, dans un immeuble à chauffage collectif, le taux d'humidité serait plutôt faible et correspondrait à la classe d'exposition XC1, par contre en immeuble collectif à chauffage individuel, en banlieue ou en maison individuelle le taux d'humidité serait moyen ou modéré et correspondrait à la classe d'exposition XC3.

Il est dommage que pour ce cas fréquent on tombe dès le départ sur une incertitude de positionnement. On fera donc le calcul pour les deux cas.

Pour la classe structurale S4, le tableau 4.4N donne $c_{\min, \text{dur}} = 15$ mm pour XC1 et 25 mm pour XC3.

La classe de résistance du béton est C25/30.

L'élément est assimilable à une dalle, au sens du tableau 4.3N. On peut donc diminuer de un point la classe structurale et considérer S3.

Le tableau 4.4N donne $c_{\min, \text{dur}} = 10$ mm pour XC1 et 20 mm pour XC3.

Cette valeur est identique à celle des règles françaises dans le cas XC1 et supérieure dans le cas XC3.

Regardant la clause 4.4.1.3 (3), on constate que, moyennant un système d'assurance qualité, avec des mesures des enrobages, la valeur de Δc_{dev} minimale est 5 mm.

Pour juger de l'incidence économique, les bâtiments de logements classiques, à murs porteurs, avec des dalles de portée 6 m, peuvent être caractérisés par les ratios suivants :

Éléments	Béton (cm/m ²)	Aciers (kg/m ³)	Aciers (kg/m ²)	Acier par élément (%)	Prix de vente du GO (%)
Dalles	18	40	7,2	51,1	9,61
Murs	14	12	1,7	12,1	2,27
Poutres	2	120	2,4	17	3,20
Poteaux	3	80	1,6	11,3	2,12
Fondations	2	40	1,2	8,5	1,60
Total	39	14,1/0,39 = 36,2	14,1	100	18,8

Le prix du m² est estimé à environ 180 euros du m² en vente soit 120 euros du m² en déboursé.

Les aciers sont achetés à environ 1,1 euros du kg et leur prix incluant leur mise en place est de 1,6 euros.

Le béton est acheté à environ 70 euros du m³ et son prix incluant sa mise en œuvre est de 140 euros du m³.

Ratios	aciers $14,1 \times 1,6 =$	22,6
	béton $0,39 \times 140 =$	54,6
	coffrage	42,8
	TOTAL	120

Donc les aciers représentent approximativement $22,6 / 120 = 18,8$ % du prix de vente du gros œuvre (GO).

Envisageons une dalle classique de 18 cm.

Le bras de levier classique, avec les règles françaises, en admettant des aciers de diamètre 6 mm est de :
 $0,9 (18 - 1 - 0,3) = 15,03$ cm.

Ce bras de levier devient :

➤ dans le cas XC1

$0,9 (18-1 -0,5 -0,3) = 14,58$ cm, soit $14,58/15,03 = 0,97$ et donc une majoration de 3 % des aciers,

➤ dans le cas XC3

$0,9 (18 -2 -0,5 - 0,3) = 13,68$ cm, soit $13,68/15,03 = 0,91$ et donc une majoration de 9 % des aciers.

Les aciers des dalles représentent 9,61 % du prix de vente du GO, d'où l'incidence économique :

➤ dans le cas XC1

$0,03 \times 0,096 = 0,0029$ soit 0,29 % du prix de vente du GO,

➤ dans le cas XC3

$0,09 \times 0,096 = 0,0086$ soit 0,86 % du prix de vente du GO.

L'incidence économique de ces clauses d'enrobage se situe entre 0,3 et 0,9 % du prix de vente du GO.

◆ Dalle et poutrelles sur coffrage industriel du plancher courant d'un parking aérien de véhicules légers

Les locaux sont couverts, non clos (les façades sont habituellement sans fenêtre), à l'abri de la pluie. La classe d'exposition est XC3.

Pour la classe structurale S4, le tableau 4.4N donne $c_{\min, \text{dur}} = 25$ mm.

La classe de résistance du béton est C25/30.

On peut, selon le tableau 4.3N, diminuer de un point la classe structurale de la dalle et donc considérer S3. Le tableau 4.4N donne $c_{\min, \text{dur}} = 20$ mm pour la dalle et $c_{\min, \text{dur}} = 25$ mm pour les poutrelles.

Ces valeurs sont supérieures à celles des règles françaises, soit 1 cm.

Regardant la clause 4.4.1.3 (3), on constate que, moyennant un système d'assurance qualité, avec des mesures de l'enrobage, la valeur de Δc_{dev} minimale est 5 mm.

Pour juger de l'incidence économique, le plancher de parking est supposé un plancher à dalles, poutrelles et poutres à la trame de 8×8 m², avec un entraxe de 2 m et une retombée de 45 cm et des dalles d'épaisseur 8 cm. Les bâtiments à usage de parking peuvent ainsi être caractérisés par les ratios suivants :

Éléments	Béton (cm/m ²)	Aciers (kg/m ³)	Aciers (kg/m ²)	Acier par élément (%)	Prix de vente du GO (%)
Dalles	8	40	3,2	21,6	4,28
Poutrelles	5	80	4	27	5,35
Poutres	5	80	4	27	5,35
Poteaux	3	80	2,4	16,2	3,21
Fondations	3	40	1,2	8,1	1,60
Total	24	14,8/0,24 = 61,7	14,8	≈ 100	≈ 19,8

Le prix du m² est estimé à environ 180 euros du m² en vente soit 120 euros du m² en déboursé.

Les aciers sont achetés à environ 1,1 euros du kg et leur prix incluant leur mise en place est de 1,6 euros.

Le béton est acheté à environ 70 euros du m³ et son prix incluant sa mise en œuvre est de 140 euros du m³.

Donc les aciers représentent approximativement $23,7 / 120 = 19,8 \%$ du prix de vente du GO.

Envisageons la dalle de 8 cm.

Le bras de levier classique, avec les règles françaises, en admettant des aciers de diamètre 6 mm est de :

$$0,95 (8 - 1 - 0,3) = 6,37 \text{ cm.}$$

Ce bras de levier devient :

$$0,95 (8 - 2 - 0,5 - 0,3) = 4,94 \text{ cm, soit } 4,94 / 6,37 = 0,78 \text{ et donc une majoration de } 28 \% \text{ des aciers.}$$

Les aciers des dalles représentent 4,28 % du prix de vente du GO, d'où l'incidence économique :

$$0,28 \times 0,0428 = 0,012 \text{ soit } 1,2 \% \text{ du prix de vente du GO.}$$

Les poutrelles devront être élargies pour respecter l'enrobage latéral sur joues. Admettons des aciers longitudinaux de 16 mm, l'enrobage latéral des aciers est de 1,6 cm selon les règles françaises. Le respect de $c_{\min, \text{dur}} = 25 \text{ mm}$ et de $\Delta c_{\text{dev}} = 5 \text{ mm}$ conduit à augmenter l'enrobage latéral de $25 + 5 - 16 = 14 \text{ mm}$.

On a donc une surépaisseur de béton de $1,4 \times 0,45 \times 2 / 2\text{m} = 0,63 \text{ cm}$.

Ce béton représente un surcoût de $33,6 \times 0,63 / 24 / 120 = 0,0075$ du prix de vente du GO.

Ce béton a également une incidence en armatures sur les éléments porteurs estimée, par défaut, par le surpoids de $0,63 \times 24 = 15 \text{ kg/m}^2$ sur un chargement moyen de 800 kg/m^2 ,

$$\text{soit } 1,25 \% (19,8 - 4,28) = 0,19 \% \text{ du prix de vente du GO.}$$

L'incidence économique de ces clauses d'enrobage est donc de $1,2 + 0,75 + 0,19$, soit 2,14 % du prix de vente du GO.

! On pourrait décider d'augmenter l'épaisseur des dalles de 1,5 cm plutôt que de jouer sur leur ferrailage, ce qui reviendrait sensiblement au même surcoût.

! On pourrait penser que les petites majorations estimées rentrent dans la tolérance des choix des gammes de produits disponibles. Ce serait une erreur car le basculement, de ce fait, peut se produire dans un sens ou dans un autre. Les aléas de ces choix n'ont donc pas lieu d'intervenir dans le raisonnement.

Document publié par le LCPC sous le numéro J1050416
Conception et réalisation LCPC-DISTC, Marie-Christine Pautré
Impression Jouve - N°
Dépôt légal 4e trimestre 2005



La norme européenne EN 1992-1-1, adoptée par le CEN (comité européen de normalisation) le 16 avril 2004, constitue la référence prochaine pour le calcul des structures en béton. La norme française qui la transposera comportera, outre le texte adopté au niveau européen, une Annexe Nationale, précisant notamment les choix nationaux de paramètres ou dispositions, destinés à s'appliquer pour les ouvrages et bâtiments à construire en France. Lors de la préparation de cette Annexe Nationale, d'importants travaux de justification et calibrage ont été menés, en particulier sur les dispositions relatives à l'enrobage, qui correspondent à l'ensemble des choix nationaux de la section 4 de l'Eurocode " Durabilité et enrobage des armatures ". Le dossier technique issu de ces travaux est proposé ici dans son intégralité, dans un but pédagogique vis-à-vis de l'application raisonnée de l'Eurocode 2, dans la mesure où se trouve prolongé et complété le nouveau cadre de description de l'environnement des ouvrages issu de l'EN 206 (norme sur la prescription des bétons), et que son application est étendue ici à la protection des armatures.

The EN 1992-1-1 European standard, adopted by the CEN (European Committee for standardization) on April 16, 2004, will shortly constitute the reference document for the design of concrete structures. The French standard which will transpose it, will include, after the text adopted at the European level, a National Annex, mainly précising the national choices of parameters and provisions which shall apply for structures and buildings to be constructed in France. By preparing this National Annex, significant work has been done in terms of justifying and calibrating the provisions, especially with respect to concrete cover, that is, all national choices mentioned in the 4th section of the Eurocode " Durability and cover to reinforcement ". The technical background collected from this work is proposed herein in full details, with an educational view for a rational application of Eurocode 2. Namely, the new frame for describing the environment to which structures are exposed, already known by EN 206 (the standard for concrete prescription), is here préciséd and complemented, and its application is extended for the protection of reinforcement.