

# Panorama à l'international des approches performantielles de la durabilité des bétons

## Avant-propos

Ce rapport est articulé en deux parties :

- la première partie est destinée au lecteur qui souhaite apprécier très rapidement si l'étude évoquée le concerne, et donc si les méthodes proposées ou si les résultats indiqués sont directement utilisables pour son entreprise ;
- la deuxième partie de ce document est plus technique ; on y trouvera donc tout ce qui intéresse directement les techniciens de notre industrie.

© 2016 CERIB – CS 10010 – 28233 Éperon Cedex

ISSN 0249-6224– EAN 9782857552673

319.E – déc 2016

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction  
par tous procédés réservés pour tous pays.

*Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de son article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (article L. 122-4).*

*Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon exposant son auteur à des poursuites en dommages et intérêts ainsi qu'aux sanctions pénales prévues à l'article L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle.*

# Sommaire

---

<b>1. Synthèse générale de l'étude</b>	<b>5</b>
1.1. Domaine concerné	5
1.2. Problématique	5
1.3. Intérêts et conséquences	5
<b>2. Dossier de l'étude</b>	<b>7</b>
2.1. Contexte normatif et approche prescriptive de la durabilité pour les produits préfabriqués	7
2.2. Les enjeux de l'approche performantielle de la durabilité	10
2.3. L'approche performantielle en France	10
2.4. Méthodes d'essais normalisées en France [5]	12
2.4.1. Porosité accessible à l'eau	13
2.4.2. Perméabilité aux gaz	13
2.4.3. Gel interne	14
2.4.4. Écaillage	14
2.4.5. Carbonatation	14
2.4.6. Migration des ions chlorure	15
2.4.7. Attaque chimique externe	17
2.4.8. Résistivité électrique	17
2.5. Les différentes approches de type performantiel en Europe [4] [5]	17
2.5.1. Allemagne	18
2.5.2. Italie	23
2.5.3. Pays-Bas	24
2.5.4. Norvège	27
2.5.5. Portugal	27
2.5.6. Royaume-Uni	29
2.5.7. Espagne	30
2.5.8. Travaux normatifs en cours au niveau européen : les classes de durabilité	31
2.6. Les différentes approches de type performantiel à l'internationale (hors Europe)	32
2.6.1. Australie [5]	32
2.6.2. Canada [5]	36
2.6.3. États-Unis [5]	36
2.6.4. Chine [6]	38
2.6.5. Japon [7]	47
2.6.6. Afrique du Sud [8]	54
2.7. Conclusions	58
2.8. Références	59



# 1. Synthèse générale de l'étude

---

## 1.1. Domaine concerné

La durabilité des ouvrages en béton armé est une préoccupation majeure pour l'ensemble de la filière. La présente étude concerne les éléments de structure en béton utilisés pour le bâtiment ou le génie civil, pour lesquels l'approche performantielle de la durabilité constitue une solution alternative intéressante pour valider un béton du point de vue technique, économique et environnemental. D'autre part, elle est utilisée également pour quantifier les seuils (dosage en liant, rapport  $E_{eff}/C...$ ) définis dans l'approche prescriptive de la durabilité qui s'appuie elle, sur des obligations de moyens.

## 1.2. Problématique

L'approche performantielle consiste à appréhender la durabilité des bétons en considérant non pas les seules données liées à la formulation mais certaines caractéristiques ou propriétés du matériau dont on sait qu'elles présentent un intérêt pour prévoir l'évolution de celui-ci lorsqu'il est exposé à des conditions environnementales données. En France, différents concepts sont aujourd'hui développés afin de pouvoir mettre en œuvre une approche performantielle de la durabilité. D'importants travaux ont été réalisés ou initiés en France concernant la normalisation des essais relatifs à la durabilité des bétons. En complément, le développement de modèles prédictifs associés aux principaux mécanismes conditionnant la durabilité des ouvrages en béton permet aujourd'hui de disposer des outils de base indispensables au développement de l'approche performantielle.

Cependant, l'approche performantielle ne fait pas aujourd'hui l'objet de règles intégrées dans les normes, ni au niveau français, ni au niveau européen. La norme NF EN 206/CN ne traite cette thématique que de manière informative à ce jour. L'objectif de cette étude est de faire le point sur les avancées techniques et normatives en matière d'approche performantielle de la durabilité à l'international.

## 1.3. Intérêts et conséquences

Les enjeux associés à l'approche performantielle de la durabilité sont considérables, en termes d'optimisation technico-économique des ouvrages en béton, de maîtrise des coûts de construction incluant ceux relatifs à la maintenance et de développement durable. C'est également un outil utile pour le déploiement de l'économie circulaire. Cette étude de veille a permis de faire le point sur l'existant et les avancées en Europe et au niveau international concernant le développement et l'utilisation d'approches performantielles de la durabilité pour la formulation des bétons. De nombreux pays s'attachent :

- à développer encore davantage ces concepts pour la réalisation des bétons ;
- à asseoir de plus en plus les spécifications normatives sur des approches basées sur les performances des matériaux vis-à-vis de leurs environnements.

Des points forts ont été identifiés dans les approches performantielles développées à l'étranger :

- en Espagne, le code EHE<sup>1</sup> 08 fait explicitement référence à des modes opératoires pour les essais de durabilité ;

---

<sup>1</sup> EHE : Code du béton structurel, réglementation pour la production de béton et le calcul des structures.

- au Portugal, le concept de performances équivalentes est décrit à travers la norme nationale E 464 en accord avec les spécifications de la norme EN 206 ;
- aux Pays-Bas et en Belgique, la démarche d'approche performantielle est également intégrée dans le contexte normatif ;
- en Afrique du Sud, la méthodologie développée prend en compte la variabilité du matériau et des propriétés de durabilité ;
- au Japon, la méthodologie développée dans le guide JSCE-SSCS<sup>2</sup> décrit explicitement toutes les étapes pour la réalisation de structure en béton en utilisant une approche performantielle basée sur des méthodes de vérification d'états limites robustes.

Différentes actions sont menées en France sur l'approche performantielle dont le Projet National Perfdub actuellement en cours.

L'intérêt de l'approche performantielle pour les utilisateurs de béton se situe à plusieurs niveaux :

- disposer d'un plus grand degré de liberté sur les compositions de béton avec les mêmes garanties sur leur durabilité ; c'est un aspect important du point de vue économique mais aussi environnemental (diminution des émissions de CO<sub>2</sub>) ; l'utilisation d'essais performantiels et d'indicateurs de durabilité facilitera la validation des bétons innovants ;
- utiliser une approche prescriptive pour laquelle les seuils définis correspondent davantage aux propriétés réelles des bétons ; l'approche performantielle permet de quantifier ces seuils ; elle est nécessaire par exemple lorsqu'il s'agit de mieux valoriser la contribution des additions à la durabilité des bétons ;
- valoriser le fait que les bétons plus compacts sont aussi plus durables.

---

<sup>2</sup> JSCE-SSCS : guide « standard specifications for concrete structures (SSCS) – Design » (2007), mis au point par la Japan Society of Civil Engineers (JSCE).

## 2. Dossier de l'étude

---

### 2.1. Contexte normatif et approche prescriptive de la durabilité pour les produits préfabriqués

La durabilité des ouvrages en béton a toujours été une préoccupation majeure pour la filière, elle l'est encore plus aujourd'hui dans le contexte d'économie circulaire. La prise en compte de la durabilité dès la formulation et la mise en œuvre du béton est aujourd'hui largement couverte par le contexte normatif.

La norme NF EN 206/CN « Béton – Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité », décrit notamment toutes les exigences applicables aux constituants du béton et aux compositions. Cette norme s'applique aux bétons destinés aux structures coulées en place, aux structures préfabriqués, aux produits de structure préfabriqués pour bâtiments et structures de génie civil.

La prise en compte de l'environnement dans lequel va être situé l'ouvrage et des risques d'agressions et d'attaques auxquels il va être exposé tout au long de sa durée de vie, permet d'optimiser les performances du béton et sa durabilité. En ce sens, la norme NF EN 206/CN prévoit la classification des parties d'un ouvrage selon 18 classes d'exposition, réparties en 6 grandes catégories :

- Classe XO : Aucun risque de corrosion ou d'attaque ;
- Classe XC : Corrosion induite par carbonatation ;
- Classe XD : Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine ;
- Classe XS : Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer ;
- Classe XF : Attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage ;
- Classe XA : Attaques chimiques.

Les structures en béton peuvent être soumises simultanément à plusieurs types d'action environnementale pendant leur durée de service. Dans ce cas, il est nécessaire de combiner les exigences de plusieurs classes d'exposition. Le choix de la classe d'exposition relève du prescripteur et fait l'objet de recommandations professionnelles « Les classes d'exposition - Aide à la prescription » (document FIB/CERIB) réalisé par le Groupe Planchers Ossatures de la FIB en liaison avec le groupe de travail Classes d'exposition de l'EFB.

L'annexe F de la norme NF EN 206/CN, « Recommandations pour les limites de composition du béton », contient une annexe nationale normative : NA.F « Valeurs limites applicables en France à la composition et aux propriétés des bétons ». Les exigences liées aux classes d'exposition pour la composition du béton sont précisées dans les tableaux NA.F.1, NA.F.2, NA.F.3 et NA.F.4. Sauf exigence spécifique du marché, les préfabricants ont la possibilité d'utiliser, au choix, les exigences du tableau NA.F.1 (NA.F.3) ou celles du tableau NA.F.2 (NA.F.4). À chacune des classes correspondent des spécifications sur la composition du béton et la classe de résistance, sous forme de valeurs limites et d'exigences minimales. Le béton doit donc respecter toutes les exigences prévues pour chaque classe d'exposition. La définition et le choix des classes d'exposition est donc fondamentale pour chaque projet et est de la responsabilité du prescripteur.

Les spécifications relatives à la composition et aux performances du béton dans un environnement donné (décrit sous le forme de classes d'exposition) sont définies dans les tableaux NA.F.1, NA.F.2, NA.F.3 ou NA.F.4 de la norme NF EN 206/CN.

Ces tableaux précisent en fonction de chaque classe d'exposition :

- le rapport « Eau efficace/Liant équivalent » ( $E_{\text{eff}}/L_{\text{éq}}$ ) maximal ;
- la classe de résistance minimale du béton ;
- la teneur minimale en air (le cas échéant).

Ils comportent d'autres exigences, en particulier sur les additions et la nature des ciments à utiliser. Enfin, la principale différence entre ces tableaux repose sur les deux critères suivants :

- les tableaux NA.F.1 et NA.F.3, utilisables pour les bétons prêts à l'emploi, réalisés sur chantier et pour les produits préfabriqués, précisent entre autres quel doit être le dosage minimal en liant équivalent ;
- les tableaux NA.F.2 et NA.F.4, dont l'utilisation est limitée aux produits préfabriqués en béton en usine, introduisent l'absorption d'eau maximale du béton en tant qu'indicateur de la compacité ; ces tableaux ne comportent pas de critère sur le dosage minimal en liant équivalent.

En France, le concept de coefficient  $k$  et de liant équivalent  $L_{\text{éq}}$  autorise la prise en compte de certaines additions (A) de type II (cendres volantes, fumées de silice, laitiers vitrifiés moulus de haut fourneau et les métakaolins) et de certaines additions de type I (additions calcaires, additions siliceuses de type A) en remplaçant le terme  $E_{\text{eff}}/C$  par  $E_{\text{eff}}/(C + kA)$ , où  $C$  est un ciment de type CEM I 42,5 N, CEM I 42,5 R, CEM I 52,5 N, CEM I 52,5 R ou CEM II/A 42,5 N, CEM II/A 42,5 R, CEM II/A 52,5 N, CEM II/A 52,5 R dont la quantité est exprimée en  $\text{kg}/\text{m}^3$  ;  $k$  est le coefficient de prise en compte de l'addition considérée. Le paramètre  $A$  est la masse d'addition par  $\text{m}^3$  prise en compte dans le liant équivalent et dont la valeur maximale est définie par le rapport  $A/(A + C)$  précisé pour les différentes classes d'exposition. Le terme  $C + kA$  est le liant équivalent, noté  $L_{\text{antéq}}$ , ou  $L_{\text{éq}}$ . Les exigences concernant le dosage minimal en ciment dans le béton sont également remplacées par les mêmes exigences concernant le liant équivalent. Une plus grande quantité d'addition peut être utilisée, mais elle ne doit pas être prise en compte dans le calcul du liant équivalent. À noter que le dosage en liant équivalent dépend donc de la classe d'exposition considérée (via le rapport  $A/(A + C)$ ).

La norme NF EN 13369 « Règles communes pour les produits préfabriqués en béton » est la norme de base pour toutes les normes de produits préfabriqués structuraux en béton, autres que les blocs. Cette norme couvre en particulier les exigences relatives aux constituants utilisés, à la production (traitement thermique et cure notamment), aux méthodes d'essais et à l'évaluation de la conformité des produits. Les différentes normes européennes harmonisées pour les produits de structure renvoient à cette norme qui peut servir aussi de texte de référence pour les produits non couverts par des normes ou des Agréments Techniques Européens (ATE). Par ailleurs, cette norme renvoie, lorsque cela est nécessaire, à la norme NF EN 206/CN dont elle précise et complète les conditions d'application aux produits en béton. Pour les autres produits préfabriqués, dont les blocs, il existe des normes européennes harmonisées qui contiennent en elles-mêmes toutes les spécifications nécessaires.

La norme NF EN 13369 indique des valeurs minimales d'enrobages des armatures en renvoyant à l'Eurocode 2 (NF EN 1992-1-1). L'Eurocode 2 traite de la partie relative à la durabilité avec une « section 4 : Durabilité et enrobage des armatures ». Cette section reprend les classes d'exposition de la norme NF EN 206/CN, en fonction des actions environnementales auxquelles sont soumis les ouvrages ou les parties d'ouvrages. Afin de satisfaire les exigences de durabilité pendant toute la durée d'utilisation de l'ouvrage, des dispositions constructives relatives à l'enrobage des armatures (distance entre la surface de l'armature la plus proche du béton et cette dernière) doivent être respectées. En cohérence avec la norme NF EN 206/CN et les normes de produits préfabriqués, elles visent à



optimiser la durabilité des ouvrages. La détermination de la valeur d'enrobage prend en compte :

- la classe d'exposition dans laquelle se trouve l'ouvrage ou la partie de l'ouvrage ;
- la durée de service attendue ;
- la classe de résistance du béton ;
- le type de systèmes de contrôle qualité mise en œuvre pour assurer la régularité des performances du béton ;
- la nature des armatures (acier au carbone ou acier inoxydable) ;
- le degré de maîtrise du positionnement des armatures.

L'Eurocode 2 définit ainsi des valeurs nominales d'enrobage ( $c_{nom}$ ) :

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \quad (\text{Équation 1})$$

où  $c_{min}$  représente l'enrobage minimal et  $\Delta c_{dev}$  une marge de calcul pour les tolérances d'exécution.

La valeur à utiliser pour  $c_{min}$  prend en compte à la fois l'adhérence et les conditions environnementales :

$$c_{min} = \max \{ c_{min,b} ; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,y} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add} ; 10 \text{ mm} \} \quad (\text{Équation 2})$$

où :

- $c_{min,b}$  représente l'enrobage minimal vis-à-vis des exigences d'adhérence (tableau 4.2 de l'Eurocode 2) ;
- $c_{min,dur}$  l'enrobage minimal vis-à-vis des conditions environnementales ;
- $\Delta c_{dur,y}$  la marge de sécurité (en France,  $\Delta c_{dur,y} = 0$ ) ;
- $\Delta c_{dur,st}$  la réduction d'enrobage minimal dans le cas d'utilisation d'acier inoxydable (en France la valeur recommandée par l'annexe nationale est 0) ;
- $\Delta c_{dur,add}$  la réduction de l'enrobage minimale dans le cas de protection complémentaire (en France la valeur recommandée par l'annexe nationale est 0).

Dans tous les cas, l'enrobage minimal ne peut pas être inférieur à 10 mm (Équation 2).

La valeur de  $\Delta c_{dev}$  pour un pays donné est fournie par l'Annexe Nationale (NA) de l'Eurocode 2. Dans le cas des éléments préfabriqués  $\Delta c_{dev}$  est compris entre 0 mm et 10 mm, l'annexe nationale française recommande d'adopter la valeur de 10 mm, sauf justification ou niveau de contrôle particulier.

L'enrobage minimal permet de garantir la bonne transmission des forces d'adhérence, la protection de l'acier contre la corrosion et une résistance au feu convenable.

Pour les armatures passives et précontraintes dans un béton de masse volumique normale, l'Eurocode 2 tient compte des classes d'exposition et utilise la notion de « classe structurale ». Plus la classe est élevée, plus l'enrobage minimal  $c_{min,dur}$  doit être important. Les valeurs à appliquer en France sont données par le tableau 4.4 N de l'Eurocode 2 pour les armatures de béton armé et par le tableau 4.5 NF pour les armatures de précontrainte. La classe structurale de référence, à utiliser pour les bâtiments et ouvrages de génie civil courant est S4, pour les bétons conformes aux tableaux NA.F.1 ou NA.F.2 et pour une durée de vie de 50 ans. Pour une durée de vie de 100 ans, on augmente de deux unités le numéro de la classe structurale ce qui correspond à une augmentation de l'enrobage minimale de 10 mm. Le tableau 4.3 NF de l'annexe nationale française de l'Eurocode 2 précise les modulations à appliquer sur la classe structurale selon les facteurs déterminants (durée d'utilisation de projet, classe de résistance, nature du liant, compacité de l'enrobage).

À la date de parution du présent rapport, des réflexions sont en cours au niveau européen pour introduire un nouveau concept : les classes de durabilité. Celles-ci permettraient d'utiliser une approche performantielle pour la validation des bétons.

## 2.2. Les enjeux de l'approche performantielle de la durabilité

Le contexte normatif et réglementaire relatif au béton et aux produits en béton ainsi que les recommandations constituent un ensemble cohérent et homogène permettant d'optimiser et d'adapter la composition et la formulation des bétons aux contraintes environnementales auxquelles ils seront soumis.

Bien que ces règles de dimensionnement, basées essentiellement sur des obligations de moyens, permettent la réalisation de structures très durables pour une durée d'utilisation de projet donnée, le potentiel réel des couples « matériau/process » pourrait être davantage pris en compte. L'approche basée sur des obligations de moyen est robuste mais peut constituer un frein à l'innovation. Un moyen d'améliorer cet aspect consiste à fournir aux concepteurs de matériaux non plus des obligations de moyens mais des spécifications sur les performances de durabilité à atteindre intégrant l'ensemble des caractéristiques ou propriétés du matériau dont on sait qu'elles présentent un intérêt pour prévoir l'évolution de celui-ci lorsqu'il est exposé à des conditions environnementales données. Les particularités des matériaux modernes et des process de fabrication conduisant à la réalisation de bétons plus performants que ceux décrits dans les textes applicables ne sont pas suffisamment pris en compte dans le contexte normatif actuel. D'une manière générale, il y a un intérêt majeur pour les couples « matériaux/process » à asseoir de plus en plus les spécifications normatives sur des approches basées sur les performances des matériaux vis-à-vis de leurs environnements.

Les enjeux associés à l'approche performantielle de la durabilité sont considérables, en termes d'optimisation technico-économique des ouvrages et des produits en béton, de maîtrise des coûts de construction incluant ceux relatifs à la maintenance et ceux liés à l'économie circulaire. Comme tout matériau, le béton a un rôle important à jouer dans le domaine du développement durable à travers sa contribution aux économies d'énergie, à la réduction des impacts sur l'environnement (émission de CO<sub>2</sub> notamment) et à la durabilité des constructions. Dans cette optique, le contexte normatif évolue progressivement vers une utilisation croissante des approches performantielles.

L'approche performantielle permet également de valoriser encore davantage les performances élevées des bétons plus compacts et donc plus durables. L'utilisation croissante de modèles prédictifs de durée de vie des structures en béton associée à une démarche performantielle de la durabilité permet de valoriser le potentiel réel des couples « béton/enrobage » au regard des différentes sollicitations mécaniques et physico-chimiques et apporte une valeur ajoutée supplémentaire.

Enfin, il est important de prendre en compte le fait que les seuils de l'approche prescriptive (dosage en liant, rapport  $E_{eff}/C...$ ) sont définis par les commissions de normalisation sur la base des retours d'expérience, mais également sur la base d'études réalisées en laboratoire. Hors, ces dernières s'appuient toujours sur une approche performantielle. Maîtriser l'approche performantielle permet donc de s'assurer que les seuils définis dans l'approche prescriptive sont pertinents.

## 2.3. L'approche performantielle en France

L'approche performantielle consiste à appréhender la durabilité des bétons en considérant non pas les seules données liées à la formulation mais certaines caractéristiques ou

propriétés du matériau dont on sait qu'elles présentent un intérêt pour prévoir son évolution dans des conditions environnementales données. Cette méthodologie est intéressante pour :

- l'utilisation de nouveaux constituants, ainsi que la formulation de bétons innovants, tout en garantissant un niveau de sûreté et de qualité important pour les utilisateurs finaux ;
- la vérification des seuils utilisés dans l'approche prescriptive de la durabilité, en adéquation avec les propriétés réelles des bétons.

L'approche performantielle de la durabilité est citée par la norme NF EN 206/CN comme une méthode alternative ou complémentaire, mais n'est pas réellement déployée. Celle-ci peut prendre deux formes : la première est comparative et est intitulée « concept de performance équivalente du béton » ; la seconde est plus générale et décrite sous les termes « méthodes de conception performantielles ». Le concept de performance équivalente du béton est défini au paragraphe 5.2.5.3 de la norme NF EN 206/CN. Celle-ci précise qu'« il doit être prouvé que le béton a une équivalence de performance avec celle d'un béton de référence, en particulier pour ce qui concerne son comportement vis-à-vis des agressions de l'environnement et sa durabilité, conformément aux exigences pour la classe d'exposition concernée ». Pour démontrer l'équivalence de performance, il convient donc de disposer, d'une part, d'essais approuvés et cohérents avec les conditions réelles et, d'autre part, de justifier des choix pertinents pour les bétons de référence (des indications sont données dans l'annexe E de la norme). Cette approche est mentionnée en particulier pour l'incorporation d'additions en substitution du ciment dans des formulations non conformes aux prescriptions des tableaux NA.F. Elle pourrait également être utilisée pour justifier l'utilisation de nouveaux constituants, pas encore normalisés, ou permettre de déroger à des exigences prescriptives (par exemple la nature du ciment, obligatoire pour certaines classes d'exposition) en démontrant que le béton à qualifier conduit à un niveau de durabilité au moins aussi bon que le béton de référence.

Les méthodes de conception performantielles sont décrites au paragraphe 5.3.3 de la norme NF EN 206/CN : « Les exigences relatives aux classes d'exposition peuvent être établies en utilisant les méthodes de conception performantielles pour la durabilité et elles peuvent être établies en termes de paramètres performantiels, par exemple une mesure d'écaillage dans un essai de gel-dégel. L'annexe J (informative) de la norme donne des conseils relatifs à l'utilisation d'une autre méthode de conception en fonction des performances pour la durabilité ». Cette annexe J explicite deux voies de justification de la durabilité :

- des méthodes basées sur des essais approuvés et vérifiés représentatifs des conditions réelles, et contenant des critères de performance approuvés ;
- ou bien des méthodes basées sur des modèles analytiques étalonnés par rapport à des résultats d'essais représentatifs des conditions réelles rencontrées dans la pratique.

À ce jour, les deux types d'approche performantielle, complémentaires, sont principalement décrites dans les documents suivants :

- les recommandations professionnelles FNTP/FFB/CERIB/FIB de mars 2009 intitulées « Méthodologie d'application du concept de performance équivalente des bétons ». La méthodologie de qualification d'une composition de béton est fondée sur le concept de performance équivalente défini dans l'article 5.2.5.3 de la norme NF EN 206/CN. Le principe est de modifier les prescriptions de composition des bétons en montrant, à l'aide d'essais performantiels et d'indicateurs de durabilité, que le béton à qualifier possède des propriétés de durabilité au moins aussi bonnes que celles d'un béton de référence ;
- le guide du LCPC « Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton - Application de l'approche performantielle 2010 ». L'approche performantielle est déclinée pour son application aux ouvrages d'art. Il s'agit d'une démarche innovante, globale et prédictive de la durabilité des structures en béton armé, basée essentiellement sur la notion d'indicateurs de durabilité, qui permet d'aborder rationnellement et efficacement les exigences liées au matériau béton vis-à-vis de cet objectif de durabilité.

D'autres référentiels traitent de la durabilité des bétons dans des conditions particulières sous forme d'une approche performantielle que l'on peut qualifier comme mixte. Cette approche, basée sur une utilisation simultanée d'obligations de moyen et d'essais dits de performance, permet en particulier d'apporter une réponse pertinente dans les cas fréquents où l'approche prescriptive conduit à des exigences difficiles à concilier. On trouve des exemples d'approches mixtes dans les recommandations de l'IFSTTAR vis-à-vis du gel et de la réaction sulfatique interne.

L'utilisation d'approches de type performantiel ou impliquant l'utilisation de modèles prédictifs nécessite la mise en place d'une base de donnée constituée d'un nombre conséquent de bétons de compositions variées. Cette base permettrait de vérifier la pertinence des valeurs seuils associées aux indicateurs de durabilité ou aux essais de performance et d'apprécier la variabilité des performances des bétons à rapport  $E_{eff}/L_{eq}$  et dosage en liant équivalent constants. Dans une certaine mesure, cette base de données aiderait à l'optimisation technico-économique des compositions de béton. C'est dans ce contexte que le CERIB a participé aux travaux du groupe AFGC (Association Française de Génie Civil) portant sur la mise en place d'une base de données opérationnelle des indicateurs de durabilité en fonction des paramètres de formulation. L'objectif de cette base de données est triple :

- établir des liens entre les paramètres de formulation et les propriétés de durabilité ;
- construire, dans une démarche performantielle et prédictive, des lois de distribution statiques permettant d'alimenter les outils probabilistes couplés aux modèles physico-chimique ;
- synthétiser les résultats obtenus afin d'identifier des seuils robustes pour chaque classe d'exposition.

Le Projet National PERDFUB vise également à constituer une base de données. Quarante et un bétons représentatifs des pratiques et enjeux en France seront ainsi caractérisés.

En complément de la base de données, les modèles de durabilité peuvent également être utilisés pour vérifier la pertinence des valeurs limites des indicateurs de durabilité. Plus particulièrement, les approches probabilistes permettent de prendre en compte la variabilité des paramètres d'entrées liés au matériau, au process et à l'environnement.

L'approche performantielle de la durabilité peut également être utilisée dans le cas de la validation de produits ou de systèmes innovants pour le bâtiment qui se placent parfois en dehors du domaine d'application des normes en vigueur. Cette approche est notamment utilisée dans le récent document publié par le CSTB « Méthodologie d'évaluation de la durabilité des matériaux cimentaires hors normes pour le bâtiment » [1]. Cet article porte sur l'évaluation technique de nouveaux produits ou systèmes dans le domaine du bâtiment, avant leur mise sur le marché. Il traite en particulier de l'aspect durabilité de l'évaluation, et ce pour des produits ou systèmes innovants à base de matériaux cimentaires. Ce document contient des fiches thématiques présentant les différents types d'altérations connues pour les matériaux cimentaires. Les moyens d'évaluation de la performance associée y sont également présentés.

## 2.4. Méthodes d'essais normalisées en France [5]

L'approche performantielle de la durabilité s'appuie sur des essais de vieillissement accéléré et sur des indicateurs de durabilité. Une grande majorité des essais relatifs aux processus de carbonatation, de pénétration des chlorures, de gel interne et d'écaillage sont normalisés, en cours de normalisation ou au stade de la pré-normalisation (national, européen, international). Le contexte n'est pas le même pour ce qui concerne les attaques chimiques (attaques acides, sulfatiques et bio-altérations) pour lesquelles les phénomènes mis en jeu sont plus complexes à appréhender par des essais performantiels.

D'une manière générale, les essais reposent sur la caractérisation de l'aptitude du béton à résister à un processus donné en lien, le plus souvent, avec un environnement particulier (classes d'exposition de la norme NF EN 206/CN). La suite de ce paragraphe a pour objectif de rappeler les principales méthodes d'essais normalisées.

### 2.4.1. Porosité accessible à l'eau

La porosité est définie comme le rapport du volume de vides et du volume apparent du matériau. La porosité des bétons se mesure classiquement par imbibition d'eau sous vide : on parle de porosité accessible à l'eau. La porosité est un paramètre global dont dépendent toutes les propriétés de transfert, comme le coefficient de diffusion du CO<sub>2</sub>. C'est donc un indicateur de première importance vis-à-vis des agressions extérieures. C'est aussi une donnée d'entrée de la plupart des modèles de prédiction de la carbonatation. En France, un premier protocole de mesure a été recommandé par l'AFPC-AFREM (AFPC-AFREM, 1997). Depuis 2010, il existe une norme pour la détermination de la porosité accessible à l'eau (NF P 18-459). L'essai consiste à saturer sous vide des échantillons de béton pendant une durée de 48 heures. Notons que le premier protocole recommandait une durée de saturation de 24 heures. Les échantillons sont séchés ensuite en étuve à 105 °C jusqu'à stabilisation de la masse. Le rapport du volume d'eau ayant saturé la porosité et du volume de l'échantillon (mesuré par pesée hydrostatique) donne la porosité accessible à l'eau. Vis-à-vis de l'approche performantielle, la porosité peut servir d'élément de comparaison. On l'utilise aussi dans l'approche absolue. Cette propriété trouve néanmoins des limites en tant qu'indicateur de durabilité, par exemple lorsque les granulats sont très poreux ou lorsque le volume de pâte du béton est particulièrement important. Le volume total des pores ne détermine pas à lui seul les propriétés de transfert ; la taille des pores et leur connectivité sont également des facteurs prépondérants.

Cet indicateur général ne permet donc pas à lui seul de statuer sur les performances physico-chimiques des bétons dans les environnements agressifs.

### 2.4.2. Perméabilité aux gaz

La perméabilité au gaz et au liquide sont des paramètres fondamentaux pour caractériser les mécanismes de la carbonatation et de la pénétration des chlorures (transport de l'eau, du dioxyde de carbone, des ions chlorure). Ils dépendent notamment des caractéristiques du réseau poreux et de l'état hydrique du béton. Ils constituent des données d'entrée de certains modèles prédictifs vis-à-vis de la carbonatation et de la pénétration des chlorures. La détermination de la perméabilité au gaz fait l'objet d'une norme expérimentale nationale parue en 2011 (XP P 18-463) s'appuyant sur une mesure au perméamètre à charge constante. La réalisation de mesures sous différentes pressions permet d'accéder à la perméabilité intrinsèque du béton (indépendante de la pression).

On notera que la phase d'étuvage introduit des gradients d'humidité dans l'éprouvette qui peuvent provoquer un biais dans le résultat d'essai notamment dans le cas des BHP. La température d'étuvage à 105 °C peut également introduire un biais sur la valeur du résultat en fonction de la nature du béton (type de ciment, d'additions). La mesure de perméabilité est effectuée à trois niveaux de saturation en eau. On ne retient en général que la perméabilité à l'état sec. Les perméabilités obtenues aux deux états de saturation intermédiaire ne sont donc pas exploitées alors qu'elles permettraient de mieux caractériser les bétons (notamment les BHP). D'autre part, la connaissance de la perméabilité dans des gammes de saturation proches des conditions hydriques in situ pourraient enrichir les données d'entrée des modèles prédictifs. Enfin, les données de fidélité de la norme expérimentale, affichées à titre indicatif, sont issues de travaux datant de 1989 portant sur un béton à hautes performances (E/C = 0,3).

### 2.4.3. Gel interne

Pour la prévention des dégradations dues au gel, les caractéristiques du réseau de bulles d'air (en particulier le facteur d'espacement) constituent un indicateur de durabilité pertinent (AFGC, 2004). Au niveau national, la détermination du facteur d'espacement est régie par la norme ASTM C457-98 Partie 2.

En outre, la résistance d'un béton au gel peut être évaluée par l'application d'un essai de performance (NF P 18-424<sup>3</sup>, NF P 18-425<sup>4</sup>).

Dans les recommandations professionnelles provisoires relatives à l'approche « comparative », l'indicateur retenue pour les zones de gel faible ou modéré sans sels de déverglaçage est la porosité accessible à l'eau (ou l'absorption d'eau) ramenée à la fraction volumique de pâte du béton. Pour les zones de gel faible ou modéré avec sels de déverglaçage, les recommandations indiquent qu'il n'existe pas d'essai performantiel reconnu représentatif. Pour les zones de gel sévère, le document fait référence entre autres aux essais de performance (NF P 18-424, NF P 18-425) via les recommandations du LCPC.

### 2.4.4. Écaillage

Au niveau européen, l'essai proposé dans la CEN/TS 12390-9 est considéré comme dispersé (ce qui justifie la classification en TS – Technical Specification – et non pas en norme expérimentale française) et de plus semble trop sévère par rapport au comportement sur site des bétons. La norme CEN/TS 12390-9 a été révisée récemment avec la définition d'un essai « sensu stricto » dont les étapes sont redéfinies pour être moins sujettes à interprétation et donc fournir un essai moins dispersé. La norme CEN/TS 12390-9 est donc reconduite avec ces modifications de forme pour une période de 3 ans, période qui devrait être mise à profit pour notamment mieux définir les conditions de conservation des échantillons (conditions de cure, carbonatation), améliorer la représentativité de l'essai vis-à-vis des conditions réelles, évaluer les biais possibles.

Au niveau national, c'est la norme expérimentale XP P18-420 qui s'applique. Il s'agit d'un essai de vieillissement en conditions de gel sévère et dont la différence principale avec l'approche européenne porte sur la nature de la face exposée (face fond de moule pour l'approche française et face sciée pour l'approche européenne). En outre, il est reconnu que l'essai d'écaillage est trop sévère pour ce qui concerne l'exposition aux sels de déverglaçage en zone de gel faible ou modéré. Une réflexion sera menée dans le cadre du projet national Perfdub pour aboutir à un essai plus représentatif.

### 2.4.5. Carbonatation

La carbonatation d'un béton soumis à une concentration « naturelle » de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) est relativement lente. Pour connaître les performances du béton dans des délais compatibles avec le projet, on peut utiliser un essai de vieillissement dit « accéléré ». Trois principes sont à la base de l'accélération du phénomène. Le premier est le pré-conditionnement. Au préalable de la phase de carbonatation, les échantillons peuvent subir, dans certains protocoles, un séchage, en étuve ou non, dans le but de diminuer le degré de saturation en eau moyen. Le coefficient de diffusion du CO<sub>2</sub> est en effet fortement dépendant du degré de saturation. Il s'agit donc d'accélérer la diffusion du gaz. Le deuxième principe d'accélération est l'utilisation d'une forte concentration en CO<sub>2</sub>. L'essai de carbonatation est réalisé dans une enceinte dans laquelle la concentration en CO<sub>2</sub> est maintenue à une valeur élevée par comparaison à la concentration atmosphérique. Là aussi, le but est d'agir sur le moteur de la carbonatation, la diffusion gazeuse, en augmentant le

---

<sup>3</sup> NF P 18-424 « Essai de gel sur béton durci : gel dans l'eau – dégel dans l'eau ».

<sup>4</sup> NF P 18-425 « Essai de gel sur béton durci : gel dans l'air – dégel dans l'eau ».



gradient de concentration dans le matériau et l'ambiance. Enfin, le troisième principe d'accélération est l'humidité relative « optimale ». Dans l'enceinte, l'humidité relative est maintenue constante à une valeur supposée « optimale » pour la carbonatation. En général, on considère que le phénomène de carbonatation est plus rapide dans une plage d'humidité relative (HR) entre 50 et 70 %.

L'essai de carbonatation accélérée fait l'objet d'une norme expérimentale française suivant ces trois principes (XP P 18-458) : pré-conditionnement en étuve à 45 °C pendant 14 jours, concentration de CO<sub>2</sub> dans l'enceinte égale à 50 %, ambiance dans l'enceinte : 20 °C et 65 % HR. Cette norme est disponible depuis 2008. Elle a remplacé le protocole proposé suite au projet GranDuBé qui préconisait une durée de pré-conditionnement limitée à 2 jours à 40 °C. L'augmentation de cette durée a été voulue pour accélérer la carbonatation des bétons peu poreux comme les BHP pour lesquels la durée initiale de 2 jours était trop courte pour assécher significativement les échantillons. À l'échelle internationale, il n'y a pas de consensus sur le protocole à utiliser. Le pré-conditionnement en étuve n'est pas toujours utilisé ; certains laboratoires placent les échantillons dans l'enceinte de carbonatation dès la fin de la cure. Dans la littérature, on trouve aussi une grande diversité dans les concentrations en CO<sub>2</sub> : de 1 à 80 %. Les normes européennes sur la carbonatation, en cours d'écriture, préconisent une concentration en CO<sub>2</sub> plus faible que celle de la norme française : de 1 % (prCEN/TS 12390-10, 2007) à 4 % (FprCEN/TS 12390-12, 2010), puis 3 % (FprCEN/TS 12390-12, 2016).

#### 2.4.6. Migration des ions chlorure

Les ions chlorure, présents notamment dans l'eau de mer et les sels de déverglaçage, peuvent entraîner la corrosion des armatures lorsque leur concentration au voisinage de celles-ci atteint une valeur critique. Le béton d'enrobage doit donc assurer la durabilité des structures en s'opposant à la pénétration des ions chlorure. La pénétration des chlorures dans un environnement naturel a lieu sous l'effet de deux mécanismes : l'absorption capillaire et la diffusion. L'absorption capillaire se produit lorsque le béton sec ou partiellement saturé est imbibé par la solution saline. Dans ce cas, les ions migrent ensuite par convection avec la phase liquide. La diffusion résulte d'un gradient de concentration en chlorures de la solution porale entre la surface exposée et le cœur sain, elle se produit en milieu saturé. Dans le cas de cycles d'humidification et séchage, les deux mécanismes peuvent coexister. Cela concerne par exemple les zones de marnage des ouvrages partiellement immergés.

Dans le cadre de méthodes de conception performantielles, il est donc important de connaître au moins ces deux propriétés du matériau : absorption et diffusion. La mesure de l'absorption d'eau par capillarité et le coefficient de diffusion font l'objet de modes opératoires normalisés. La diffusion naturelle dans le béton étant généralement trop lente pour la qualification des compositions, de nombreux modes opératoires ont pour but de l'accélérer, notamment en imposant un champ électrique – on parle alors de migration.

Dans les recommandations professionnelles provisoires FNTP/FFB/CERIB/FIB (2009), la démonstration de l'équivalence de performances s'appuie sur un indicateur déterminé sur béton à partir d'un essai de diffusion des ions chlorure. On peut utiliser l'essai de migration décrit par la norme NT Build 492 (Nordtest Build 492 – Chloride migration coefficient from non steady state migration experiments) ou des modes opératoires alternatifs conformes aux recommandations du projet GranDuBé. Le résultat de l'essai est le coefficient de diffusion des chlorures en régime transitoire (ou « non-stationnaire »). Dans les recommandations provisoires du LCPC, la détermination du coefficient de diffusion des ions chlorure s'appuie également sur un essai de migration sous champ électrique en régime non-stationnaire fondé sur la méthode de Tang et Nilsson (NT Build 492), pour lequel il existe désormais une norme expérimentale française (XP P 18-462).

Plusieurs grandeurs permettent de détecter et de quantifier la pénétration des chlorures : la mesure de concentrations en chlorures (dans le béton ou en solution) et la mesure de

quantités d'électricité ou de l'intensité du courant. Dans le cadre de l'approche performantielle, la difficulté réside dans la nécessité d'obtenir des grandeurs fiables, facilement mesurables et dans des délais assez brefs. Les essais de diffusion simple sont généralement les plus longs et les plus complexes à mettre en œuvre. Mais ils sont également considérés comme les plus représentatifs et ils sont donc utilisés comme essai de référence pour valider des essais accélérés. Le moyen le plus couramment utilisé pour accélérer la pénétration des chlorures est la migration sous champ électrique. Il existe de nombreux modes opératoires, dont le but est de fournir des indicateurs pour comparer les performances de matériaux différents ou d'étudier la variation des propriétés de diffusion en fonction du temps.

Les méthodes en régime permanent ou stationnaire donnent généralement accès à un coefficient de diffusion effectif  $D_{\text{eff}}$  et les méthodes en régime transitoire à une mesure de coefficient de diffusion dit apparent  $D_{\text{app}}$ .

#### 2.4.6.1. Essai de diffusion

Au niveau européen, une campagne d'essais croisés a été organisée en 2011 dans le cadre de la validation du CEN/TS 12390-11. Les premiers résultats statistiques (moyennes, répétabilité, reproductibilité) ont montré que la méthode d'essai semblait robuste. Depuis octobre 2015, ce mode opératoire fait l'objet de la norme NF EN 12390-11. La méthode consiste à déterminer le coefficient de diffusion unidirectionnelle des chlorures en régime non stationnaire et la concentration de surface des éprouvettes conditionnées de béton durci. Cette méthode d'essai permet de déterminer la pénétration des chlorures à un âge spécifié, par exemple pour classer la qualité du béton par des essais comparatifs.

#### 2.4.6.2. Essai de migration en régime permanent

Un coefficient de diffusion effectif  $D_{\text{eff}}$  peut être obtenu par un essai de migration sous l'effet d'une différence de potentiel électrique. Il existe de nombreux modes opératoires, certains étant toutefois plus couramment cités (Andrade, 1993, Tang, 1996, Truc et al., 2000). Cependant le principe et la justification théorique restent identiques.

Ces essais de migration sous champ électrique peuvent rester relativement longs (plusieurs semaines pour des bétons compacts). En outre la dispersion des résultats reste grande par rapport aux écarts de performance à mesurer.

La valeur de concentration en amont donnée est 0,5 mol/L, ce qui se rapproche de la concentration en ions chlorure de l'eau de mer (environ 0,57 mol/L). La norme expérimentale française XP P 18-461 définit un essai permettant de déterminer le coefficient de diffusion effectif des ions chlorure en régime permanent. Ce coefficient ne prend pas en compte les interactions physico-chimiques entre les ions chlorure et la matrice cimentaire (chlorures liés).

#### 2.4.6.3. Essai de migration en régime transitoire

Les inconvénients de l'essai de diffusion en régime permanent, dans le cadre d'une approche performantielle, peuvent conduire à utiliser un essai en régime transitoire pour qualifier un béton. En outre, les essais en régime transitoire sont considérés comme plus représentatifs par rapport aux conditions réelles de pénétration des chlorures. Un compromis entre la rapidité de l'essai et sa représentativité semble pouvoir être atteint par le mode opératoire défini dans NT BUILD 492. Cette méthode a également fait l'objet de recommandations dans la synthèse des travaux du projet GranDuBé et d'une norme expérimentale française XP P 18-462. Il permet de déterminer un coefficient de diffusion apparent en régime transitoire. La seule différence avec le mode opératoire NT BUILD 492 réside dans la concentration en chlorures du compartiment amont (0,5 ou 1 M au lieu de 2 M). Le coefficient de diffusion apparent est un coefficient global, qui prend en compte les interactions physico-chimiques entre les ions chlorure (chlorures liés) et la matrice



cimentaire. Il est déterminé par la mesure de la profondeur atteinte par les chlorures après un essai de migration sous champ électrique.

### 2.4.7. Attaque chimique externe

Au niveau national, il n'existe actuellement pas de méthode normalisée vis-à-vis des risques d'attaques chimiques. La prévention actuelle s'appuie sur les classes d'exposition XA de la norme NF EN 206/CN et le FD P 18-011 qui conduisent principalement à des exigences en termes de moyens. Il n'existe pas d'essais d'évaluation spécifique de la résistance des bétons pour toutes les attaques chimiques. Ces attaques sont abordées dans les recommandations professionnelles FNTP/FFB/CERIB/FIB, avec notamment la description d'un mode opératoire relatif aux attaques acides. Cet essai de lixiviation fait actuellement l'objet de travaux normatifs ayant pour but de rédiger une norme expérimentale.

L'essai consiste à dégrader, de façon accélérée, un échantillon de béton durci, en l'immergeant dans une solution d'eau déminéralisée et en réglant le pH à 4 par ajout d'une solution d'acide nitrique. La dégradation découle principalement de la dissolution des hydrates du béton (notamment de la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ce qui se traduit par la diffusion des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $2 \text{OH}^-$  depuis le cœur du béton vers la solution d'attaque.

En fin d'essai, il est possible de déterminer la quantité totale d'ions d'hydroxyle lixiviés et la quantité totale de calcium lixivié. Il est également possible de déterminer l'épaisseur dégradée en pulvérisant une solution de phénolphtaléine sur une fracture fraîche longitudinale de l'échantillon.

### 2.4.8. Résistivité électrique

La résistivité électrique constitue un moyen simple de caractérisation de la connectivité du réseau poreux d'un béton. Elle est inversement proportionnelle au coefficient de diffusion effectif des chlorures et constitue donc un moyen simple pour évaluer la résistance à la pénétration des chlorures. La résistivité peut également être utilisée pour évaluer la résistance à la carbonatation. En outre, certains modèles prédictifs de durée de vie utilisent la résistivité comme donnée d'entrée. La résistivité est utilisée comme indicateur de substitution pour la validation des épreuves de convenance et de contrôles (à 28 jours) et fait l'objet d'un mode opératoire décrit dans les recommandations provisoires de l'IFSTTAR. Sa détermination est basée sur la loi d'ohm (mesure du courant induit par l'application d'une différence de potentiel entre les deux extrémités de l'échantillon de béton). L'essai est généralement pratiqué par les laboratoires en association avec les essais de migration de chlorures sous champ électrique. Différents modes opératoires sont rencontrés à l'international. Cet indicateur ne dispose pas de données de fidélité et ne fait pas l'objet d'un mode opératoire consolidé au niveau national. L'intérêt de cet essai réside dans sa simplicité. Il pourrait être réalisé en contrôle de production sur les éprouvettes confectionnées pour les essais de compression.

## 2.5. Les différentes approches de type performantiel en Europe [4] [5]

Ce chapitre permet de faire le point sur les avancées techniques et normatives en matière d'approche performantielle en Europe. Il est intéressant de noter qu'on ne retrouve ni le concept de liant équivalent ni les rapports  $\left(\frac{A}{A+C}\right)_{\max}$  dans les annexes nationales des normes EN 206 des pays étrangers.

## 2.5.1. Allemagne

En Allemagne, la mise en œuvre de l'approche performantielle relève du mandat des agréments techniques nationaux (abZ) délivré par le *Deutsches Institut für Bautechnik* (DIBt). L'approche performantielle peut s'appliquer dans les cas suivants :

- utilisation d'un ciment non autorisé par la norme par manque d'expérience pratique ;
- autorisation de nouvelles additions, telles que le laitier granulé de haut-fourneau moulu ;
- béton dont la composition est dérivée de la norme DIN 1045-2 (annexe nationale allemande de l'EN 206).

L'évaluation des résultats d'essai relève du mandat des comités d'expertise du DIBt. L'évaluation (en particulier les résultats des essais de durabilité) comprend :

- l'évaluation par rapport à des valeurs limites ;
- l'évaluation par rapport à la base de données du DIBt ;
- la comparaison au béton de référence.

Les agréments techniques couvrent également le contrôle de la production et l'inspection par un tiers. Le mode opératoire d'évaluation d'un béton formulé avec un liant qui déroge aux exigences prescriptives (ci-après désigné « produit ») est donné ci-après comme exemple pour :

- la carbonatation du béton ;
- la résistance à la pénétration des chlorures ;
- la résistance au gel-dégel sans sels de déverglaçage ;
- la résistance au gel-dégel avec sels de déverglaçage.<sup>5</sup>

### 2.5.1.1. La carbonatation

La profondeur de carbonatation du béton fabriqué avec le « produit » est mesurée conformément au mode opératoire RILEM CPC 18. La résistance à la carbonatation est mesurée sur des prismes (40 x 40 x 160) mm avec des granulats conformes à l'EN 12620. Le béton I est soumis à l'essai de résistance à la carbonatation (tableau 1).

Composition de béton pour les trois échantillons	
Béton I	<p>C = 450 g de « produit » (par ex. combinaison : x % CEM I/y % filler calcaire qui déroge aux exigences prescriptives)</p> <p>G = 1 350 g de granulats <sup>a</sup></p> <p>E = 225 g d'eau</p> <p>E/C = 0,5</p>

<sup>a</sup> Des granulats conformes à l'EN 12620, avec la granulométrie du tableau 2, sont utilisés.

Tableau 1 : Composition du béton pour la détermination de la profondeur de carbonatation

Dimensions (mm)	0,25	0,5	1	2	4	8
Traversant (% de masse)	8	21,5	36	46,5	67,5	100

Tableau 2 : Granulométrie des granulats utilisés pour le béton I

Les échantillons sont préparés conformément à l'EN 196-1. Après démoulage, la moitié des échantillons est conservée immergée dans de l'eau à (20 ± 2) °C jusqu'à un âge de 7 jours

<sup>5</sup> Recommandation provisoire 2010 « Maitrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton – Application de l'approche performantielle »

et l'autre moitié jusqu'à un âge de 28 jours. Les échantillons sont ensuite conservés dans un environnement à 20 °C et 65 % d'humidité relative.

Les mesures de profondeur de carbonatation sont effectuées après 14, 28, 56, 98 et 140 jours ainsi qu'après 1, 2 et 5 ans d'essais. La résistance à la compression est déterminée après 35 jours, dont 7 jours dans l'eau, suivis de 28 jours à 20 °C et 65 % d'humidité relative ou après 28 jours dans l'eau suivis de 7 jours dans un environnement à 20 °C et 65 % d'humidité relative et après 140 jours dans un environnement à 20 °C et 65 % d'humidité relative [à un âge de 147 jours (7 + 140) ou 168 jours (28 + 140)].

La profondeur de carbonatation et la vitesse de carbonatation du béton à qualifier sont comparées à une base de données. Cette base de données est la base de l'évaluation pour la délivrance d'un agrément technique national ou d'un agrément technique européen. La profondeur de carbonatation et la vitesse de carbonatation du béton à qualifier doivent être inférieures à la courbe limite.

La vitesse de carbonatation est calculée par régression linéaire avec :

$$d_c = d_0 + v_c \sqrt{t_c} \quad (\text{exprimé en mm})$$

où  $d_c$  est la profondeur de carbonatation,  $t_c$  est la durée de carbonatation,  $v_c$  est la vitesse de carbonatation et  $d_0$  représente un paramètre spécifique qui dépend de la conservation du béton avant essai et dont la valeur sera inférieure dans le cas d'un démarrage plus tardif de l'essai de carbonatation.

### 2.5.1.2. La résistance à la pénétration des chlorures

La résistance à la pénétration des chlorures du béton à qualifier et du béton de référence avec du ciment Portland CEM I conforme à l'EN 197-1 est déterminée conformément à la NT BUILD 492. L'essai de résistance à la pénétration des chlorures est effectué sur les bétons IIa et IIb (tableau 3).

Compositions par mètre cube de béton frais	
Béton IIa	C = 320 kg de « produit » (par ex. combinaison : x % CEM I/y % filler calcaire) G = .... kg de granulats <sup>a</sup> E/C = 0,5
Béton IIb	C = 320 kg de ciment CEM I conforme à l'EN 197-1 G = .... kg de granulats E/C = 0,5

<sup>a</sup> Des granulats conformes à l'EN 12620, avec la courbe de dimensions du tableau 4, sont utilisés.

Tableau 3 : Compositions du béton pour la détermination de la résistance à la pénétration des chlorures

Dimensions (mm)	0,25	0,5	1	2	4	8	16
Traversant (% de masse)	6	14	22	32	46	68	100

Tableau 4 : Granulométrie des granulats utilisés pour le béton IIa

Le coefficient de migration des chlorures du béton ( $D_{\text{mig}}$ ) avec le « produit » est comparé au coefficient de migration des chlorures du béton de référence aux âges de 35 et 97 jours. Le coefficient de migration des chlorures du béton ( $D_{\text{mig}}$ ) avec le « produit » à un âge de 97 jours

est déclaré conformément à la catégorie pertinente spécifiée ci-dessous selon l'application ou l'utilisation finale particulière.

- $D_{mig,5}$  :  $D_{mig} \leq 5.10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
- $D_{mig,10}$  :  $5.10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{mig} \leq 10.10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
- $D_{mig,25}$  :  $10.10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{mig} \leq 25.10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
- $D_{decl}$  :  $D_{mig} \geq 25.10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

Les classes mentionnées ci-dessus ont été fixées par le comité d'experts du DIBt pour l'évaluation du (des) constituant(s) (un nouveau ciment ou d'une nouvelle addition) pour un agrément technique national ou un agrément technique européen. En Allemagne,  $D_{mig,25}$  est le minimum à atteindre.

### 2.5.1.3. La résistance au gel – dégel sans sels de déverglaçage

#### 1<sup>re</sup> méthode

La résistance au gel-dégel du béton avec le(s) constituant(s) est déterminée conformément à la spécification technique CEN/TS 12390-9 (« mode opératoire sur cube ») sur 100 cycles de gel-dégel. L'essai de résistance au gel-dégel est appliqué sur le béton III (tableau 5).

Composition par mètre cube de béton frais	
Béton III	<p>C = 300 kg de « produit » (par ex. combinaison : x % CEM I/y % filler calcaire)</p> <p>G = ... kg de granulats <sup>a</sup></p> <p>E/C = 0,6</p>

<sup>a</sup> Des granulats conformes à l'EN 12620, avec la granulométrie du tableau 2, sont utilisés.

Tableau 5 : Composition du béton pour la détermination de la résistance au gel – dégel sans sels de déverglaçage

Dimensions (mm)	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Traversant (% de masse)	1,5*	5	23	35	45	56	70	85	100

\* Valeur recommandée

Tableau 6 : Granulométrie des granulats utilisés pour le béton III

La résistance à la compression du béton III est déterminée conformément à l'EN 12390-3 après 28 jours. Le béton III est immergé dans l'eau après démoulage jusqu'à l'âge de 7 jours. Les échantillons sont ensuite conservés dans un environnement à 20 °C et 65 % d'humidité relative.

#### 2<sup>e</sup> méthode

La résistance au gel-dégel du béton avec et sans « produit » est déterminée conformément à la norme CEN/TS 12390-9 (« mode opératoire CF »). L'endommagement structurel interne est déterminé conformément au rapport technique CEN/TR 15177. L'essai de résistance au gel-dégel (« mode opératoire CF ») est appliqué au béton IIa (tableau 3).

La résistance à la compression du béton III est déterminée conformément à l'EN 12390-3 après 28 jours. Les échantillons sont immergés dans l'eau après démoulage jusqu'à l'âge de 7 jours. Les échantillons sont ensuite conservés dans un environnement à 20 °C et 65 % d'humidité relative. Le module d'élasticité dynamique relatif (Ed) et l'écaillage sont mesurés après 0, 4, 10, 16, 22 et 28 cycles de gel-dégel.

Pour l'essai CF conforme à la CEN/TS 12390-9, le module d'élasticité dynamique relatif doit être supérieur à 0,75 (75 %) après 28 cycles de gel-dégel (et l'écaillage doit être inférieur à 1 000 g/m<sup>2</sup> après 28 cycles de gel/dégel).

#### 2.5.1.4. La résistance au gel – dégel avec sels de déverglaçage

La résistance au gel-dégel et aux sels de déverglaçage du béton à qualifier est déterminée conformément à la CEN/TS 12390-9 (« mode opératoire CDF »). De plus, l'endommagement structurel interne est également déterminé conformément au CEN/TR 15177. L'essai de résistance au gel-dégel avec sels de déverglaçage est appliqué au béton IV (tableau 7).

Composition par mètre cube de béton frais	
Béton IV	<p>C = 320 kg de « produit » (par ex. combinaison : x % CEM I/y % filler calcaire)</p> <p>G = ... kg de granulats <sup>a</sup></p> <p>Béton avec entraîneur d'air (le dosage d'air du béton frais doit être de 4,5 ± 0,5 %)</p> <p>E/C = 0,5</p>

<sup>a</sup> Des granulats conformes à l'EN 12620, avec la granulométrie du tableau 8, sont utilisés.

Tableau 7 : Composition du béton pour la détermination de la résistance au gel – dégel avec agent de déverglaçage

Dimensions (mm)	0,25	0,5	1	2	4	8	16
Traversant (% de masse)	6	14	22	32	46	68	100

Tableau 8 : Granulométrie des granulats utilisés pour le béton IV

En outre, la résistance à la compression du béton IV est déterminée conformément à l'EN 12390-3 après 28 jours. Les échantillons sont immergés dans l'eau après démoulage jusqu'à l'âge de 7 jours. Les échantillons sont ensuite conservés dans un environnement à 20 °C et 65 % d'humidité relative. Le paramètre de teneur en air est déterminé conformément à l'EN 480-11 sur le béton IV. Le module d'élasticité dynamique relatif (Ed) et l'écaillage sont mesurés après 0, 4, 6, 14 et 28 cycles de gel-dégel.

Pour l'essai CDF conforme à la CEN/TS 12390-9, l'écaillage doit être inférieur à 1 500 g/m<sup>2</sup> après 28 cycles de gel-dégel.

#### 2.5.1.5. Évaluation, attestation de conformité et marquage CE

Les agréments techniques nationaux ainsi que les Agréments Techniques Européens (ATE) contiennent les lignes directrices à l'évaluation et l'attestation de conformité et au marquage CE. Les aspects suivants sont couverts :

- le système d'attestation de conformité ;
- les tâches et responsabilités du fabricant et des organismes notifiés ;
- le marquage CE et les informations connexes.

Les dispositions établies pour un filler calcaire en tant qu'addition sont données en exemple ci-après. Il est important de savoir que ces dispositions ne s'appliquent qu'à un filler calcaire unique en combinaison avec un seul ciment.

Un contrôle de production est établi et appliqué dans l'usine de fabrication. Le contrôle de production en usine doit être réalisé par le fabricant dans le cadre de la surveillance continue de la production, qui garantit que les produits de construction manufacturés sont conformes aux dispositions de l'Agrément Technique.

Le contrôle de production en usine doit comprendre à minima les mesures fournies dans l'EN 12620 et les mesures énumérées ci-dessous :

- description et vérification des matières premières et des composants ;
- au moins une fois par semaine :
  - la surface spécifique ;
- au moins une fois par mois :
  - la teneur en  $\text{CaCO}_3$  ;
  - la teneur en argile déterminée par l'essai au bleu de méthylène conforme à la DIN EN 933-9 ;
  - la teneur en carbone organique total (COT) ;
  - la teneur en  $\text{MgCO}_3$  ;
  - la teneur en chlorure soluble dans l'eau.

En usine, le contrôle de production doit faire l'objet d'un audit régulier par un organisme tiers, au moins deux fois par an, sauf spécification contraire.

Dans le cadre du contrôle par un tiers, un essai initial des produits de construction est effectué. Des échantillons doivent être prélevés et soumis à l'essai. L'organisme de contrôle est responsable de l'échantillonnage et des essais. Dans le cadre du contrôle par un tiers dans l'usine de production du filler calcaire, les propriétés suivantes du constituant doivent être soumises à l'essai au moins 4 fois par an :

- la teneur en  $\text{CaCO}_3$  ;
- la teneur en argile déterminée par l'essai au bleu de méthylène conforme à l'EN 933-9 ;
- la teneur en carbone organique total (COT) ;
- la distribution granulométrique ;
- la surface spécifique.

Dans le cadre du contrôle par un tiers à l'usine de béton, les propriétés suivantes du produit doivent être déterminées au moins une fois par mois :

- la teneur en  $\text{CaCO}_3$  ;
- la teneur en argile déterminée par l'essai au bleu de méthylène conforme à la DIN EN 933-9 ;
- la teneur en carbone organique total (COT) ;
- la teneur en  $\text{MgCO}_3$  ;
- la résistance à la compression après 2 jours et 28 jours (sur des bétons contenant 82 % de CEM I et 18 % de filler calcaire) ;
- l'étanchéité.

Les agréments techniques nationaux contiennent également des dispositions pour l'utilisation du couple « ciment/addition » dans le béton. Les dispositions établies pour un filler calcaire en tant qu'addition sont données à titre d'exemple ci-après. Il est important de noter que ces dispositions ne s'appliquent qu'à un filler calcaire unique en combinaison avec un seul ciment :

- pour le calcaire couvert par l'agrément technique, la preuve de la performance équivalente du béton conformément à l'EN 206-1, 5.2.5.3 est établie pour une combinaison contenant une fraction massique minimale de 82 % de ciment Portland CEM I d'une certaine origine conforme à l'EN 197-1, et de classe de résistance 42,5 N ou supérieure ;
- la combinaison d'une fraction massique de filler calcaire dans le liant pouvant aller jusqu'à 18 % et d'une fraction massique de ciment Portland CEM I d'au moins 82 % telle

que décrite précédemment peut être utilisée dans un béton conforme à l'EN 206-1/DIN 1045-2, comme avec les réglementations existantes du tableau F.3.1 pour le type de ciment CEM II/A-LL conforme à l'EN 197-1, mais pas dans les classes d'exposition XF2 et XF4 ;

- la quantité de ciment Portland et de filler calcaire conforme à l'agrément technique doit au moins satisfaire aux exigences de dosage minimal de ciment indiquées dans la DIN 1045-2 2008, tableaux F.2.1 et F.2.2, ligne 3 ;
- les constituants doivent subir les contrôles supplémentaires décrits dans le tableau 9 ci-après.

	Matériau initial du béton	Inspection/Essai	Objet	Fréquence minimale
10a	Addition	Filler calcaire conforme à l'EN 12620 : - teneur en $\text{CaCO}_3$ ; - teneur en argile déterminée par l'essai au bleu de méthylène conforme à l'EN 933-9 ; - teneur en carbone organique total (COT) ; - teneur en $\text{MgCO}_3$ .	Conformité aux exigences de l'agrément technique pour les teneurs en $\text{CaCO}_3$ , en argile et en COT	Mensuelle
16	Ciment/Addition	Résistance à la compression après 2 jours et 28 jours (82 % de CEM I + 18 % de filler calcaire)	Conformité aux exigences pour la classe de résistance 42,5 R conformément à l'EN 197-1	À la livraison ou au moins deux fois par semaine de production

Tableau 9 : Contrôle supplémentaire des constituants du béton

## 2.5.2. Italie

Le recours à une approche de la durabilité basée sur les performances des bétons est inclus dans le système normatif italien pour l'utilisation d'additions dans le béton. En particulier, les cendres volantes conformes à l'EN 450-1, la fumée de silice conforme à l'EN 13263-1 et le laitier granulé de haut-fourneau moulu conforme à l'EN 15167-1 sont autorisés sur la base de résultats d'essais de performance. Pour évaluer la perméabilité de ces bétons, les principaux essais utilisés concernent la résistance à la pénétration d'eau sous pression, conformément à l'EN 12390-8 et la résistivité électrique. Pour satisfaire aux exigences de durabilité, il est recommandé que le béton ait un coefficient de perméabilité à l'eau (K) inférieur ou égal à  $1.10^{-11}$  m/s ou une résistance à la pénétration de l'eau d'une valeur individuelle maximale de 50 mm et d'une valeur moyenne ne dépassant pas 20 mm conformément à l'EN 12390-8. Pour la résistivité, la valeur recommandée est supérieure ou égale à 100 000 Ohm.cm et il est fortement recommandé qu'elle ne soit pas inférieure à 10 000 Ohm.cm.



### 2.5.3. Pays-Bas

#### 2.5.3.1. Recommandations et essais pour déterminer l'aptitude à l'emploi d'une combinaison de ciments spécifiques ou de couples « ciment + addition spécifique »

Aux Pays-Bas, la norme NEN-EN 1992-1-1 (Eurocode 2) est la norme de conception pour les constructions en béton en vigueur dans le contexte normatif néerlandais (« Bouwbesluit »). Le concept de performance équivalente du béton est introduit dans la norme NEN-EN 206-1:2012, au paragraphe 5.2.5.3. Ce concept permet de déroger aux exigences liées à un dosage minimal en ciment et un rapport  $E_{eff}/C$  maximal lorsqu'une combinaison d'une addition spécifique et d'un ciment spécifique est utilisée. L'essai de performance doit permettre de démontrer que le béton à qualifier a une performance au moins équivalente à celle d'un béton de référence formulé selon les spécifications requises pour la classe d'exposition considérée.

La norme NEN-EN 206-1 doit être utilisée en combinaison avec la norme NEN 8005 qui définit le dosage minimal en ciment et le rapport  $E_{eff}/C$  maximal en fonction des classes d'exposition.

Aux Pays-Bas, le mode opératoire, les critères et les méthodes d'essai pour l'évaluation des performances du béton sont donnés dans les recommandations CUR 48 des directives nationales. Elles s'appliquent à l'évaluation de l'aptitude à l'emploi d'une combinaison addition(s)/ciment pour son application dans un béton. Pour démontrer les performances équivalentes du béton candidat, une ou plusieurs propriétés de durabilité doivent être testées selon la classe d'exposition considérée (carbonatation, pénétration des chlorures, résistance au gel-dégel avec sels de déverglaçage, résistance à l'eau de mer et agression par les sulfates). La résistance mécanique du béton candidat après 7 jours et 28 jours fait également partie de l'évaluation. Il n'est pas nécessaire de mesurer d'autres propriétés mécaniques telles que la résistance à la traction, la résistance à la flexion, le module d'élasticité, le retrait ou le fluage, ces propriétés étant liées à la résistance à la compression. Comme la composition des combinaisons « ciment/addition » est similaire à celle des ciments courants, la relation entre la résistance à la compression et d'autres propriétés mécaniques sera également similaire.

La composition du béton à qualifier doit se conformer aux exigences suivantes :

- a) la teneur minimale en clinker dans le liant doit correspondre à une fraction massique de 20 % dans le cas d'une combinaison de ciment Portland et de laitier, et à fraction massique de 25 % dans le cas des autres combinaisons ;
- b) le dosage maximal d'addition calcaire d'une combinaison « ciment/addition » doit correspondre à une fraction massique de 35 % ;
- c) le dosage en liant doit être supérieur ou égal au dosage minimal de ciment pour la classe d'exposition applicable, telle que définie par la norme NEN 8005 ;
- d) le rapport eau/liant doit être inférieur ou égal au rapport eau/ciment maximal pour la classe d'exposition applicable, telle que définie par la norme NEN 8005.

Le béton de référence doit être conforme aux exigences de la norme NEN 8005 avec un ciment de référence normalement utilisé dans la classe d'exposition applicable (définie dans les recommandations CUR 48).

L'évaluation de tous les aspects de la durabilité s'appuie sur une comparaison statistique d'un minimum de 3 échantillons du béton candidat et d'un minimum de 3 échantillons du béton de référence. Un test est appliqué à la moyenne et à l'écart-type des résultats de l'essai. La validation ou le refus dépend de la différence entre les résultats d'essai pour les bétons candidats et de référence, sur la base des principes suivants :

- le producteur de béton ou le fournisseur de l'addition a l'obligation de démontrer l'adéquation du béton proposé ;



- pour chaque aspect de durabilité, une différence maximale (d) considérée acceptable entre les valeurs moyennes [%] est fixée. Le choix de ces valeurs (d) s'appuie sur l'opinion d'un expert (définie dans CUR 48) ;
- le risque pour l'utilisateur final est fixé à 10 % pour cette différence.

Les méthodes d'essai (tableau 10) doivent être des normes européennes ou nationales telles que définies dans les recommandations CUR 48.

L'essai doit être réalisé par un laboratoire indépendant accrédité pour le mode opératoire de l'essai considéré.

L'évaluation (validation ou refus) est réalisée par un organisme notifié (par exemple l'institut de certification).

Problématique de durabilité	Norme d'essai	Essai accéléré ?	Âge du béton au début de l'essai (jours)	Durée de l'essai (jours)
Carbonatation	Rilem CPC 18	NON	3	91/182/364
	prCEN/TS 12390-12	OUI	42	56/63/70
Pénétration des ions chlorure	NT Build 443	NON	31	35
	NT Build 492	OUI	28/56/91/182/364	1 - 2
Gel-Dégel (avec sels de déverglaçage)	NPR-CEN/TS 12390-9	OUI	28	7
Résistance aux sulfates	Méthode néerlandaise	NON	28	364
Résistance à l'eau de mer	Méthode néerlandaise	NON	28	364

Tableau 10 : Méthodes d'essais de durabilité

### 2.5.3.2 Utilisation des laitiers de haut fourneau

Aux Pays-Bas, deux normes récentes définissent les conditions d'utilisation des laitiers. La norme BRL 9340 (2004) concerne l'utilisation des laitiers dans les bétons et concerne le béton fabriqué en centrale et le béton des éléments préfabriqués de structure. La norme BRL 9340 et la norme NBN B 15-100 (Norme Belge) reprennent la même démarche comparative, fondée sur la comparaison de résultats d'essai performantiel entre un béton à qualifier et un béton de référence :

$$D_{cl}(\text{béton à tester}) \leq 1,40 \cdot D_{cl}(\text{béton de référence}) \quad (\text{norme NBN B 15-100})$$

$$D_{cl}(\text{béton ciment + laitier}) \leq 1,40 \cdot D_{cl}(\text{béton de référence}) \quad (\text{norme BRL 9340})$$

Ce critère est donné par exemple pour la diffusion des chlorures dans le béton (équation ci-dessus), mais tous les critères de performance ou inversement de vitesse de dégradation ( $V_{dég.}$ ) sont donnés sous la même forme :

$$V_{dég}(\text{béton à tester}) \leq C \cdot V_{dég}(\text{béton de référence})$$

C est un coefficient supérieur à 1, la raison avancée étant la prise en compte de la précision de l'essai.

Cette approche a l'avantage de faire directement référence au concept d'équivalence de performances et de proposer un mode de comparaison intéressant entre le béton à tester et le béton de référence, à travers l'utilisation d'un coefficient C. Cependant, l'objectif de l'approche performantielle telle qu'elle est déclinée dans les documents cités ci-dessus n'est pas le même que celui des approches développées en France par exemple. La norme néerlandaise s'intitule « *Méthodologie pour l'évaluation et l'attestation de l'aptitude à l'emploi de liants hydrauliques (ciments) et d'additions de type II destinés au béton* » et ce document s'applique lorsqu'on souhaite étudier la possibilité d'utiliser des liants moins conventionnels.

### Extraits de la norme 9340 (traduit du néerlandais)

#### 3. Définitions

(...)

#### 3.9 Béton de référence

Béton, composé de ciment (ciments composés CEM II/A S, CEM II/B S, CEM III/A ou CEM III/B) conforme à la norme NEN-EN 197-1 et avec une teneur en laitier égale à la combinaison à qualifier, les granulats, éventuellement un excédent d'eau, ce qui correspond au chapitre 5.1.1 de la norme NEN 6720.

(...)

Composition	Béton à rapport E/L élevé	Béton à rapport E/L faible
Rapport E/L	0,65	0,45
Liant	280 kg/m <sup>3</sup>	340 kg/m <sup>3</sup>
Proportion de laitier	Représentatif de la proportion de laitier dans le ciment de référence	

Tableau 11 – Composition du béton laitier/ciment et du béton de référence pour la détermination de la résistance en compression

Composition	Classes d'exposition					
	1	2, 5a	3, 4		5b	5c, 5d
Rapport E/C ou E/L	0,65	0,55	Avec entraîneur d'air 0,55	Sans entraîneur d'air 0,45	0,50	0,45
Ciment/Liant (kg)	280	280	280	340	300	340
Eau (kg)	182	154	154	153	150	153

Tableau 12 – Composition du béton laitier/ciment et du béton de référence pour la détermination des propriétés de durabilité

- Classe 1 : aucun test requis pour la durabilité.
- Classe 2 : carbonatation.
- Classe 3 : gel/carbonatation/chlorures.
- Classe 4 : sulfate/eau de mer/chlorures/carbonatation/gel.
- Classe 5a : cf. classe 2.
- Classe 5b : cf. classe 2.
- Classe 5c : cf. classe 4.
- Classe 5d : cf. classe 4.

#### 2.5.4. Norvège

Des exigences prescriptives en termes de « valeurs limites » pour 8 types de ciment, utilisés seuls ou en combinaison avec de la fumée de silice, des cendres volantes ou du laitier de haut-fourneau moulu sont données dans l'annexe nationale norvégienne à l'EN 206, remplaçant le tableau F.1 de l'annexe F.

Quatre groupes peuvent être distingués :

- (1) CEM I, CEM II/A-D et CEM II/ A-V, des dispositions sont données pour une utilisation dans toutes les classes d'exposition ;
- (2) CEM II/A-S, des dispositions sont données pour toutes les classes d'exposition, sauf XF2, XF3 et XF4 ;
- (3) CEM II/B-S, CEM II/B-V et CEM III/A, des dispositions sont données pour toutes les classes d'exposition, sauf XC et XF ;
- (4) CEM II/A-L, des dispositions sont données pour toutes les classes d'exposition, sauf XD, XS, XF et XA.

Pour permettre une certaine flexibilité au niveau de l'importation et de l'utilisation de ciments, des dispositions supplémentaires sont établies.

Le paragraphe NA.5.3.2 de l'annexe nationale permet à l'utilisateur de démontrer des performances minimales pour les bétons constitués de ciments des groupes (2), (3) et (4) en matière de résistance au gel-dégel. L'exigence est donnée sous forme d'écaillage maximal obtenu après l'essai de la CEN/TS 12390-9 avec une solution saline après 56 ou 112 cycles. Pour les ciments contenant plus de 35 % de laitier de haut-fourneau moulu, l'échantillon d'essai doit être carbonaté sur au moins 2 mm avant l'essai.

Cette annexe nationale permet également à l'utilisateur de démontrer, pour le groupe (3), des performances supérieures ou égales à l'un des ciments du groupe (1), en ce qui concerne la résistance à la carbonatation par un essai de performance réalisé conformément à l'EN 13295, mais avec une période d'exposition prolongée à 16 semaines, ou conformément à la norme CEN/TS 12390-10 (2 ans).

Pour le groupe (4), le paragraphe NA.5.3.2 permet à l'utilisateur de démontrer des performances supérieures ou égales à celles d'un ciment du groupe (1) en ce qui concerne la résistance aux chlorures par un essai de performance (en prenant en compte soit une concentration augmentée à 6 % soit une période d'exposition augmentée à 2 ans).

Des exigences moins strictes que celles en vigueur dans le pays où le ciment a été produit ne sont en aucun cas autorisées.

La démonstration de l'équivalence doit être certifiée par l'organisme en charge de la certification du producteur de béton.

Les ciments n'appartenant pas aux 8 types ci-dessus doivent être traités au cas par cas par l'organisme de certification.

#### 2.5.5. Portugal

En conformité avec la norme EN 206 et son paragraphe 5.2.5.3, la norme E 464-2005 « Béton – Méthodologie prescriptive pour une durée de vie requise de 50 et 100 ans pour les classes d'exposition environnementales XC, XD et XS », parue au Portugal en mars 2005, présente à la fois l'approche prescriptive et une méthode de démonstration de l'équivalence de performance. Les méthodes proposées concernent uniquement le risque de corrosion due à la carbonatation et aux chlorures (classes d'exposition XC et XD/XS). Le concept permet l'utilisation d'exigences en matière de valeurs limites (dosage minimal de ciment et

rapport  $E_{eff}/C$  maximal) différentes de celle établies dans les spécifications de la norme EN 206. Les essais retenus figurent dans le tableau 13.

La norme E 464-2005 reprend le principe d'équivalence de performance en comparant les propriétés de durabilité d'un béton d'étude avec celles d'un béton de référence. Celui-ci doit être conforme aux exigences de l'approche prescriptive définie dans la norme EN 206. La méthode portugaise ne prend pas en compte les effets du vieillissement (ageing effect), mais reste conservative, jusqu'à l'identification des ciments de référence avec de meilleures performances, reconnus pour résister aux différents environnements :

- classes XC : CEM I ;
- classes XS/XD : CEM IV/A.

Le choix des autres constituants relève de la responsabilité du producteur de béton. Ils doivent être utilisés dans les bétons de référence et candidat.

Les formulations des bétons de référence et candidat relèvent de la responsabilité du producteur de béton, le laboratoire d'essai ayant la responsabilité de vérifier si la composition de référence satisfait aux exigences concernant le rapport  $E_{eff}/C$  maximal, le dosage minimal de ciment et la classe minimale de résistance du béton, conformément à la classe d'exposition environnementale considérée. La résistance à la compression cible est  $f_{ck} + 8$  MPa. La comparaison se fait à mélange granulaire identique pour les bétons d'étude et de référence.

Classes d'exposition	Propriétés à mesurer	Modes opératoires	Nombre et dimensions des corps d'épreuve (mm)
XC1 XC2 XC3 XC4	Carbonatation accélérée	LNEC E 391	1 150 x 150 x 600
	Perméabilité à l'oxygène	LNEC E 392	3 Ø 150 ; h = 50
	Résistance à la compression	NP EN 12390-3	3 150 x 150 x 150
XS1/XD1 XS2/XD2 XS3/XD3	Coefficient de diffusion des chlorures	LNEC E 463	2 Ø 100 ; h = 50
	Absorption capillaire	LNEC E 393	3 Ø 150 ; h = 50
	Résistance à la compression	NP EN 12390-3	3 150 x 150 x 150

Tableau 13 : Norme E464-2005 : Propriétés, modes opératoires et corps d'épreuve

La carbonatation accélérée est mesurée dans une enceinte climatique avec une concentration de  $CO_2$  de 5 % et une humidité relative (HR) =  $(60 \pm 5)$  %. L'essai de perméabilité à l'oxygène (LNEC E 392) est basée sur les recommandations de Kollek [2]. Le coefficient de diffusion des chlorures (LNEC E 463) est déterminé à partir d'un essai de migration basé sur le mode opératoire décrit dans le NT BUILD 492. L'absorption d'eau par capillarité (LNEC E 393) est déterminée à partir d'un essai dont le mode opératoire est basé sur les recommandations RILEM CPC 11.1 [3].

Les étapes de fabrication et de conservation avant essai (incluant les 28 jours de cure et le préconditionnement des éprouvettes avant essai) doivent être identiques pour le béton candidat et le béton référence et doivent être réalisées selon les spécifications données

dans les normes EN 12350-1 et EN 12390-2, excepté dans le cas d'échantillons prévus pour les essais de carbonatation accélérée, de perméabilité à l'oxygène et d'absorption d'eau par capillarité dont le préconditionnement est différent.

La norme introduit des compositions de béton dites secondaires (de référence ou d'étude), obtenues en faisant varier de  $\pm 5\%$  la teneur en liant, en maintenant le dosage des autres constituants, sauf pour le sable, dont le dosage variera pour maintenir la quantité produite. Les modifications potentielles des mélanges pour l'ajustement de l'eau de gâchage doivent être proposées par le producteur de béton. Les compositions de béton de référence et candidat ne doivent pas présenter une différence de consistance (affaissement) de plus de 10 mm, en moyenne, et les valeurs individuelles doivent respecter les limites de la même classe d'affaissement.

Pour chaque propriété mesurée, une moyenne est calculée sur les compositions de référence et sur les compositions d'étude (principales et secondaires). Les critères d'équivalence de performance suivants doivent être vérifiés simultanément :

- chaque propriété des compositions d'étude doit être en moyenne inférieure ou égale à la moyenne des compositions de référence, et inversement pour la résistance en compression ;
- entre chaque composition d'étude (principales et secondaires) et de référence, les inégalités suivantes doivent être vérifiées :
  - Profondeur de carbonatation accélérée, PCA :  $PCA_{\text{étude}} < 1,3.PCA_{\text{référence}}$
  - Absorption capillaire, AC :  $AC_{\text{étude}} < 1,3.AC_{\text{référence}}$
  - Perméabilité à l'oxygène, K :  $K_{\text{étude}} < 2,0.K_{\text{référence}}$
  - Coefficient de diffusion des chlorures, D :  $D_{\text{étude}} < 2,0.D_{\text{référence}}$
  - Résistance en compression, fc :  $f_{C_{\text{référence}}} < 1,1.f_{C_{\text{étude}}}$

Si les résultats permettent de conclure à une équivalence, le fabricant de béton est autorisé à utiliser la nouvelle valeur minimale de liant et la nouvelle valeur maximale du rapport  $E_{\text{eff}}/C$  comme limites de composition pour les classes d'exposition soumises à l'essai, dans la mesure où les constituants ne subissent aucune altération en ce qui concerne leur source et leurs caractéristiques.

Les essais doivent être réalisés au moins tous les trois ans et dès que des modifications du liant ou des autres composants du béton pouvant nuire aux performances du béton candidat se produisent.

Même si ces choix de méthodologie, de modes opératoires et de valeurs peuvent être discutés, cette norme a l'intérêt de tenir compte explicitement de deux problèmes : la robustesse de la composition de béton, c'est-à-dire sa sensibilité à des petites variations sur les proportions ou les caractéristiques des constituants, et la dispersion des résultats associée à chaque mode opératoire. Ici la qualification de formules secondaires vise à résoudre le premier problème, mais multiplie le nombre d'essais et peut conduire à des difficultés d'interprétation.

## 2.5.6. Royaume-Uni

Au Royaume-Uni, il existe une procédure normalisée établie dans la norme BS 8500-1 pour la combinaison de ciment CEM I avec :

- des cendres volantes conformes à la norme EN 450-1:2005 catégorie A ou B ;
- du laitier granulé de haut-fourneau moulu conforme à la norme EN 15167-1 ;
- ou des fines calcaires conformes à la norme BS 7979.

Cette approche n'est applicable que pour les combinaisons présentant les mêmes proportions nominales que les ciments CEM II/A-L ou LL, CEM II/A-S, CEM II/B-S, CEM II/A-V,

CEM II/B-V CEM III/A, CEM III/B et CEM IV/B(V) lorsqu'elles sont soumises à l'essai et qu'il est certifié qu'elles respectent la classe de résistance à la compression 22,5, 32,5, 42,5 ou 52,5 comme cela est établi dans les normes EN 14216 ou EN 197-1. Pour satisfaire à la classe de résistance certifiée, la proportion de cendres volantes, de laitier granulé de haut-fourneau moulu ou de calcaire peut être inférieure aux proportions maximales autorisées par les normes EN 14216 ou EN 197-1. Dans ces conditions strictes, la combinaison est considérée équivalente au ciment conforme à la norme EN 197-1 de mêmes proportions nominales (en constituants), et la durabilité des bétons est supposée équivalente. Cette méthode évite la réalisation d'un essai de durabilité.

### 2.5.7. Espagne

En Espagne, il existe une réglementation pour la production de béton et le calcul des structures : le « Code du béton structural » EHE-08. Il a le même domaine d'application que celui des normes l'EN 206, l'EN 13670 et l'EN 1992-1-1 combinées.

L'EHE-08 contient les exigences et spécifications traditionnelles pour prendre en compte la durabilité du béton dans les chapitres généraux et dispose d'une annexe 9, à travers laquelle il est possible de définir la composition/le type d'un béton en fonction de ses performances. L'EHE-08 fournit ensuite explicitement une procédure pour appliquer le concept de performance équivalente vis-à-vis des problématiques liées à la durabilité des armatures (carbonatation et pénétration des chlorures).

Deux méthodes différentes pour estimer les durées de vie sont fournies :

- par des règles de présomption de satisfaction (deemed-to-satisfy) (conformément aux exigences de l'EHE-08) ;
- par les performances (conformément au mode opératoire de l'EHE-08, annexe 9).

Dans les deux cas, la responsabilité du concepteur est définie dans l'EHE-08.

La procédure de vérification de la durée de vie doit permettre de vérifier chacune des étapes suivantes :

- a) définir la durée de vie pour la structure et ses éléments (l'EHE-08 fournit dans un tableau indicatif une durée de vie selon l'importance de la structure) ;
- b) identifier la ou les classes d'exposition et la durée de vie choisie : définir l'épaisseur d'enrobage pour les éléments structurels éventuellement soumis au risque de corrosion des armatures ;
- c) sélectionner dans un tableau les spécifications en matière de dosage minimal de ciment, de rapport maximal eau/ciment et la résistance nominale à la compression recommandée pour le béton. En complément, les limitations relatives aux espèces agressives, par exemple les ions chlorure, sont identifiées et spécifiées.

Si une modification de l'épaisseur d'enrobage est souhaitée, l'EHE-08, à travers son annexe 9, permet d'autres combinaisons de constituants pour la fabrication du béton, sous réserve de l'acceptation de ces modifications par le responsable du projet. L'annexe 9 fait référence à des modèles de durabilité pour certaines agressions telles que la carbonatation et la pénétration des ions chlorure. Aucune exigence n'est formulée dans l'annexe 9 concernant le type d'essais à utiliser pour se conformer aux paramètres des modèles.

Le vieillissement du béton est implicitement pris en compte dans l'EHE-08 en autorisant des épaisseurs d'enrobage de béton inférieures pour certains types de ciments et certaines additions. Dans le cas spécifique du modèle de durabilité qui traite des ions chlorure, l'annexe 9 de l'EHE-08 autorise l'utilisation d'un facteur de vieillissement du coefficient de diffusion des chlorures en fonction du type de ciment.

L'AENOR (Association Espagnole de Normalisation et de Certification) propose également, pour la conception de la durabilité relative à la corrosion des armatures, une méthode basée sur la mesure de la résistivité électrique d'échantillons de béton durcis ayant subi une cure

identique à celle que l'on appliquerait pour des corps d'épreuve destinés à des mesures de résistance mécanique à la compression. La méthode, d'application volontaire, comprend :

- la mesure de la résistivité après 3, 7, 14 et 28 jours afin d'obtenir le facteur de vieillissement  $q$  et la résistivité nominale après 28 jours ;
- l'obtention d'un facteur de résistance à la carbonatation ou à la pénétration des ions chlorure  $r_{Cl,CO_2}$ , par la mesure de la porosité et :
  - d'un essai de diffusion naturelle des chlorures durant 90 jours, après 28 jours de cure ;
  - ou d'un essai de carbonatation en conditions naturelles pendant une période de 3 à 12 mois sur un échantillon (abrité ou non de la pluie), après 28 jours de cure.

L'équivalence de performance est déclarée si la résistivité apparente  $\rho_{ap}$ , calculée après 28 jours (ou à tout autre échéance convenue) est statistiquement la même.

$$\rho_{ap}(t) = r_{Cl,CO_2} \cdot \rho_{ef} \cdot \left( \frac{t_0}{t_n} \right)^q$$

$\rho_{ef}$  est la résistivité mesurée pour un échantillon de béton durci dans des conditions humides pendant 28 jours (c'est-à-dire les mêmes conditions que pour la résistance mécanique).

## 2.5.8. Travaux normatifs en cours au niveau européen : les classes de durabilité

Le CEN/TC 104, le CEN/TC 250 et le CEN/TC 229 mènent une réflexion de fond sur la manière d'appréhender la durabilité des structures en béton dans les prochaines années. Les réflexions portent sur l'élaboration d'un nouveau système dans lequel des classes de durabilité pourraient être utilisées pour préciser les spécifications à la fois sur les bétons et les enrobages. Ces travaux concernent des évolutions importantes sur le plan normatif : Eurocode 2, NF EN 206/CN et NF EN 13369.

La notion de classe de durabilité correspond à un niveau de performance du béton envisagé. Les bétons pourraient donc être classés dans différentes classes de durabilité en fonction :

- du respect des exigences prescriptives des tableaux NA.F de la norme NF EN 206/CN ;
- ou de la performance des bétons vis-à-vis de l'environnement considéré ; cette performance serait évaluée par des essais accélérés de performance et par des modèles prédictifs de durabilité.

Ce nouveau concept permet d'ouvrir la porte vers une approche performantielle de la durabilité pour la définition des couples « béton/enrobage ».

Les différentes commissions de normalisation concernées sont :

- au niveau européen :
  - JCG CEN TC 104/250 Durability Classes ;
  - CEN TC 104 SC1 WG1 ;
  - CEN TC 250 SC2 WG1 TG10 ;
  - CEN TC 229 WG4 AHG Performance Durability Requirements.
- au niveau français, une commission mixte entre celle des Eurocodes et celle de la norme NF EN 206/CN a été mise en place pour suivre ces travaux.

À la date de parution du présent rapport, les concepts de cette approche et les évolutions concernant les spécifications sur les bétons et sur les enrobages font l'objet de nombreuses discussions.



## 2.6. Les différentes approches de type performantiel à l'internationale (hors Europe)

Les approches performantielles à l'internationale sont relativement peu nombreuses. La plupart des pays ayant recours à une telle approche de la durabilité se contente d'ajouter des critères performantiels aux spécifications prescriptives déjà citées dans les normes en vigueur.

Les principales approches prescriptives et performantielles sont présentées dans les paragraphes suivants.

### 2.6.1. Australie [5]

Au début des années 2000, l'Australie est l'un des premiers pays à avoir développé et mis en place une approche performantielle de la durabilité. La norme AS 3600 définit plusieurs classes d'exposition pour, d'une part les bétons situés à l'extérieur (7 sous-classes en fonction de la distance par rapport à la côte par exemple ou encore environnement tropical, zone tempérée...) et d'autre part les bétons au contact de l'eau (dont l'eau douce, l'eau de mer et l'eau de ruissellement).

La norme Australienne distingue deux grandes familles de béton :

- les bétons « courants » dits *normal grade*. Ils sont définis essentiellement par la résistance à la compression mais aussi par d'autres critères tels que la teneur maximale en ions chlorure et en sulfate dans le béton durci, le retrait, la masse volumique, la résistance en compression à 7 jours et éventuellement l'affaissement, la dimension maximale des granulats, la mise en place et la teneur en air ;
- les bétons « de catégorie particulière » dits *special grade*. Ils correspondent à des bétons pour lesquels des caractéristiques non disponibles pour les bétons courants doivent être spécifiées.

Ainsi les classes d'exposition A1, A2, B1, B2, C1 et C2 correspondent à des degrés d'agressivité croissants.

Les tableaux 14, 15, 16 et 17 présentent respectivement les exigences à respecter pour la formulation de béton de chacune des catégories A, B et C, respectivement selon les normes AS 3600, AS 5100 et RTA B80 (dispositions A et B).

Le tableau 18 présente les épaisseurs minimales d'enrobage à respecter en fonction de la classe de résistance mécanique des différents bétons.



Spécifications requises	Classe normale A1	Classe normale A2	Classe normale B1	Classe particulière B2	Classe particulière C1	Classe particulière C2
Résistance caractéristique à la compression (MPa)	20	25	32	40	50	50
Quantité minimale de liant (kg/m <sup>3</sup> )	Non requis	Non requis	Non requis	350 (quantité suggérée)	400 (quantité suggérée)	400 (quantité suggérée)
Rapport $E_{eff}/L$ maximal	Non requis	Non requis	Non requis	À spécifier	À spécifier	À spécifier
Nature du liant	Non requis	Non requis	Non requis	À spécifier	À spécifier	À spécifier
Cure (jours)	3	3	7	7	7	7
Épaisseur d'enrobage (mm)	20	30	40	45	50	65
Durée de vie visée (années)	40 – 60	40 – 60	40 – 60	40 – 60	40 – 60	40 – 60

Tableau 14 : Exigences à respecter pour la formulation des bétons A, B et C selon les spécifications de la norme AS 3600 (Version 2007)

Spécifications requises	Classe Normale A	Classe Particulière B1	Classe Particulière B2	Classe Particulière C
Résistance caractéristique à la compression (MPa)	25	32	40	50
Quantité minimale de ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Non requis	Non requis	À spécifier	À spécifier
Rapport $E_{eff}/L$ maximal	Non requis	À spécifier	À spécifier	À spécifier
Nature du liant	Non requis	À spécifier	À spécifier	À spécifier
Cure (jours)	7	7	7 (14 en cas d'utilisation de laitier ou de cendres volantes)	7 (14 en cas d'utilisation de laitier ou de cendres volantes)
Épaisseur d'enrobage (mm)	35	45	55	70
Durée de vie visée (années)	100	100	100	100

Tableau 15 : Exigences à respecter pour la formulation des bétons A, B et C selon les spécifications de la norme AS 5100 (Ponts)

Spécifications requises	Classe Normale A	Classe Particulière B1	Classe Particulière B2	Classe Particulière C
Résistance caractéristique à la compression (MPa)	25	32	40	50
Quantité minimale de ciment (kg/m <sup>3</sup> )	320	320	370	420
Rapport $E_{eff}/L$ maximal	0,56	0,50	0,46	0,40
Nature du liant	SLC (Shrinkage Limited Cement) « Ciment à retrait limité »	SLC ou laitier/cendres volantes	Ciments composés ou laitier/cendres volantes	Ciments composés ou laitier/cendres volantes
Cure (jours)	7	7	7 (14 en cas d'utilisation de laitier ou de cendres volantes)	7 (14 en cas d'utilisation de laitier ou de cendres volantes)
Sorption (mm)	35	25	17 pour les ciments ordinaires 20 pour les ciments composés	8 (Seulement pour les ciments composés)
Épaisseur d'enrobage (mm)	35	45	55	70
Durée de vie visée (années)	100			

Tableau 16 : Exigences à respecter pour la formulation des bétons A, B et C selon les spécifications de la norme RTA B80 (Ponts). Disposition A : performance

Spécifications requises	Classe Normale A	Classe Particulière B1	Classe Particulière B2	Classe Particulière C
Résistance caractéristique à la compression (MPa)	32	40	50	50
Quantité minimale de ciment (kg/m <sup>3</sup> )	320	370	420	420
Rapport E <sub>eff</sub> /L maximal	0,50	0,46	0,40	0,40
Nature du liant	SLC	SLC	SLC	Ciments composés ou laitier/cendres volantes
Cure (jours)	7	7	7 (14 en cas d'utilisation de laitier ou de cendres volantes)	7 (14 en cas d'utilisation de laitier ou de cendres volantes)
Épaisseur d'enrobage (mm)	35	45	55	70
Durée de vie visée (années)	100			

Tableau 17 : Exigences à respecter pour la formulation des bétons A, B et C selon les spécifications de la norme RTA B80 (Ponts). Dispositions B : « deemed-to-comply »

Classes d'exposition	Résistances mécaniques caractéristiques (MPa)				
	20	25	32	40	50 et +
A1	20	20	20	20	20
A2	-	30	25	20	20
B1	-	-	40	30	25
B2	-	-	-	45	35
C1	-	-	-	-	50
C2	-	-	-	-	65

Tableau 18 : Épaisseurs minimales d'enrobage à respecter en fonction de la résistance mécanique à la compression, selon les exigences de la norme AS 3600

### 2.6.2. Canada [5]

Au Canada, l'approche prescriptive de la durabilité reste l'approche privilégiée pour la formulation des bétons. Néanmoins la dernière version de la norme canadienne CSA (Canadian Standard Association, Concrete materials and methods of concrete construction, 2004) propose une approche performantielle dans le cadre des bétons prêts à l'emploi. L'esprit global de la norme canadienne est identique à celui de l'EN 206 et des classes d'exposition sont définies de manière similaire : classe C (chlorures), classe A (agressions chimiques), F (gel/dégel), N (ni chlorures, ni gel/dégel) et S (sulfates).

Des critères de performance portant sur l'état plastique et l'état durci du matériau apparaissent dans la norme canadienne. Pour valider ces critères, des exigences doivent être respectées en fonction des classes d'exposition : rapport E/L maximal, résistance en compression minimale, plage de teneur en air à respecter en fonction de la dimension maximale du plus gros granulat, type de cure admissible et perméabilité aux ions chlorure maximale.

### 2.6.3. États-Unis [5]

Des propositions ont été formulées pour faire évoluer la norme ACI 318 basée sur une approche prescriptive. Un système de classes d'exposition a été proposé sur le même principe que la norme canadienne.

Les travaux du groupe de travail ACI Innovation Task Group 8 ont conduit à la mise en place d'un rapport ITG-8R-10 « Report on Performance-Based Requirements for Concrete » dont les objectifs sont de :

- introduire des exigences de performances et les comparer aux exigences prescriptives actuelles ;
- discuter des caractéristiques essentielles des critères de performance ;
- discuter des conditions d'utilisation des critères de performances comme alternative aux spécifications prescriptives.

Aux États-Unis, les comités ACI (American Concrete Institute) ont mis au point les principaux documents normalisés qui sont les « ACI Codes », tels que la norme ACI 318, et les « ACI reference specifications ». La norme ACI 318-08 « Building Code Requirements for Structural Concrete » de 2008, et la norme ACI 301-10 « Specifications for Structural Concrete » de 2008 mentionnent toutes les deux des exigences à la fois prescriptives et performantielles pour le matériau béton. Le chapitre 4 de la norme ACI 318-08 contient des exigences vis-à-vis de la durabilité du matériau pour différentes conditions d'exposition, notamment concernant le rapport  $E_{eff}/L$ , la résistance minimale à la compression, la quantité d'air occlus, la quantité initiale maximale d'ions chlorure et des exigences sur la nature du ciment utilisé. Ces exigences sont pour la plupart de nature prescriptive mais aucune exigence n'est spécifiée concernant la quantité de ciment, la quantité d'addition ou la quantité d'eau. Seule une limitation d'utilisation d'addition est mentionnée dans le cas des bétons exposés à des sels de déverglaçage.

La norme ACI 301-08 est principalement basée sur des exigences prescriptives généralement conservatives.

En 2008, de nouvelles dispositions ont été ajoutées à la norme ACI 318-08 sur la base d'exigences performantielles. Ces nouvelles dispositions permettent entre autres l'utilisation de combinaisons alternatives de matériaux cimentaires et d'additions pour améliorer la résistance aux sulfates en faisant référence à une méthode normalisée pour démontrer les performances et spécifier des limites d'acceptation.

Le chapitre 6 du rapport ITG-8R-10 détaille la nature des exigences prescriptives dans les normes ACI 318-08 et ACI 301-08 et discute des exigences de performance comme alternatives aux exigences prescriptives tels que le rapport  $E_{eff}/L$  et la résistance mécanique à la compression, en fonction des classes d'exposition. Ce rapport préconise l'utilisation d'une valeur limite de conductivité électrique du béton comme exigence alternative lorsqu'on étudie la résistance à la pénétration de fluides. Un des objectifs des comités ACI est d'aboutir à un consensus sur les critères d'acceptation exacts pour ces exigences performantielles. À l'image des critères d'acceptation utilisés pour les résistances mécaniques, les critères pour les propriétés de durabilité devraient inclure les éléments-clés suivant :

- les propriétés et les valeurs seuils à utiliser ;
- les éléments utilisés pour obtenir des échantillons représentatifs du lot à évaluer ;
- une procédure normalisée de préparation et de préconditionnement des corps d'épreuve ;
- une méthode d'essai normalisée ;
- des critères précisant si les résultats des essais indiquent un niveau de performance acceptable, incluant des méthodes statistiques ;
- les actions à entreprendre si les résultats d'essais des corps d'épreuve ne satisfont pas les critères performantiels.

Les critères d'acceptation devraient également prendre en compte la variabilité du matériau et la probabilité non nulle d'accepter un lot de béton qui ne serait pas acceptable en termes de propriétés de durabilité, et la probabilité de ne pas accepter un lot de béton dont les propriétés de durabilité satisferaient aux exigences performantielles. La première probabilité présente un risque pour le client, la seconde probabilité présente un risque pour le producteur.

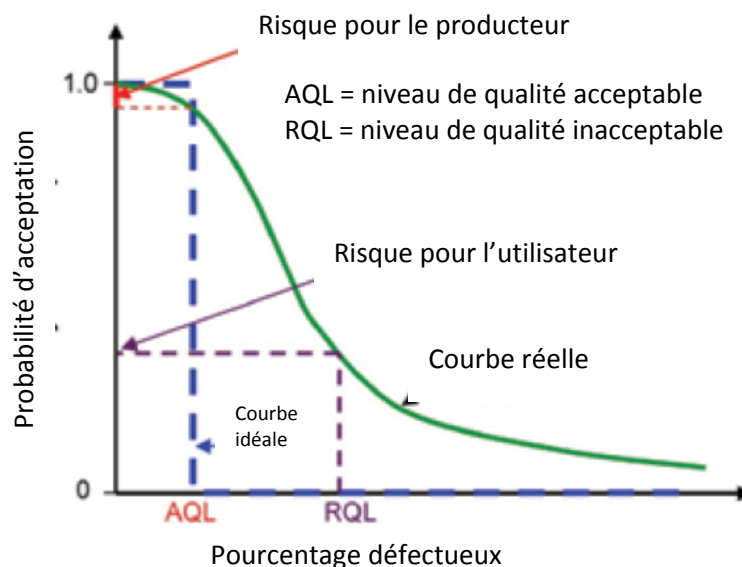


Figure 1 : Représentation schématique de la probabilité d'acceptation des bétons

L'évolution de la probabilité d'acceptation d'un lot de béton en fonction du pourcentage de bétons « défectueux » est représentée sur la figure 1. Les probabilités d'acceptation correspondant à un risque pour le producteur et pour l'utilisateur sont également indiquées sur la figure 1.

## 2.6.4. Chine [6]

Depuis les années 1980, la Chine a développé l'un des plus grands programmes de construction d'infrastructure en béton dans le monde. En 2010, la consommation de ciment en Chine s'élevait à 1,9 milliard de tonnes, avoisinant les 56 % de la production mondiale (3,3 milliards de tonnes).

Dans ce contexte, le développement de nouvelles approches de dimensionnement des structures en béton armé basées sur les performances des couples « béton/enrobage » revêt un réel intérêt tant sur le plan environnemental que sur le plan technico-économique. Le guide national CCES01-04, développé par la société d'ingénierie civile chinoise (Chinese Civil Engineering Society, CCES), pose les bases techniques et normatives pour le dimensionnement de structures en béton.

En Chine, on distingue deux principales approches : une approche prescriptive et une approche basée sur la modélisation. L'approche prescriptive impose des spécifications sur les constituants (quantité et composition), les pratiques de construction, la durée de vie visée et les conditions d'utilisation des structures en béton. Cette approche est principalement utilisée dans la norme EN 206, l'Eurocode 2, la norme américaine ACI 318 et la norme canadienne CSA. L'approche basée sur la modélisation de la durabilité est utilisée pour évaluer l'état de dégradations et vérifier les performances résiduelles de la structure en béton via la détermination des facteurs partiels de sécurité ou d'indice de fiabilité.

Le guide CCES01 définit la durabilité comme la capacité d'une structure en béton à conserver ses performances au regard de son utilisation dans un environnement donnée et pour une durée de service donnée.

### Les actions environnementales

Le guide CCES01 retient 5 environnements particuliers pour lesquels il est nécessaire de porter une attention particulière à la durabilité des structures en béton (tableau 19).

Classe	Environnement	Intensité	Mécanisme de dégradation
I	Atmosphère	A, B, C	Carbonatation du béton d'enrobage et corrosion des armatures
II	Gel - Dégel	C, D, E	Dégradation du béton par action des cycles de gel et de dégel
III	Marin	C, D, E, F	Pénétration des ions chlorure à travers le béton d'enrobage et corrosion des armatures
IV	Sels de déverglaçage et autres sels	C, D, E	Pénétration des ions chlorure à travers le béton d'enrobage et corrosion des armatures
V	Chimique	C, D, E	Dégradation du béton par des agents chimiquement agressifs contenus dans les sols, les eaux souterraines ou les environnements industriels pollués

Tableau 19 : Classification des environnements agressifs au sens du guide CCES01

### L'état limite de durabilité (ELD)

L'état limite de durabilité définit les critères de dégradations acceptables pour une structure en béton soumise à un environnement donné. Le guide CCES01 définit l'état limite de service comme étant la combinaison de l'ELD et d'altération des structures en béton (apparition de fissures, déformations...).

Le guide CCES01 préconise de baser le dimensionnement d'une structure en béton sur la base d'un indice de fiabilité égal à 1,5, correspondant à une probabilité de défaillance de l'ordre de 6 %.

Il définit trois ELD (tableau 20) :

- l'initiation de la corrosion : initiation du processus électrochimique de corrosion correspondant au front de carbonatation ou à une concentration critique en ions chlorure au voisinage de l'armature ;
- le développement de la corrosion jusqu'à un niveau acceptable : aucune fissure parallèle à l'armature n'est encore visible et la profondeur de corrosion des armatures est inférieure à 0,1 mm ;
- l'altération du béton jusqu'à un niveau acceptable : ni l'aspect esthétique, ni l'aspect mécanique structurel de la structure en béton ne doivent être impactés.

ELD	Environnement	Applications
Initiation de la corrosion	I, III, IV	Câbles de précontrainte, armatures de diamètre < 6 mm
Développement de la corrosion jusqu'à un niveau acceptable	I, III, IV	Armatures passives, autres constituants métalliques dans le béton
Altération du béton jusqu'à un niveau acceptable	II, V	Béton non armé, surface des bétons armés

Tableau 20 : ELD définies pour différentes classes d'environnement

### La durée de service

La durée de service est définie comme étant la durée pendant laquelle l'aptitude d'une construction à conserver les niveaux adéquats de stabilité et d'aptitude à l'emploi (à travers le respect des ELS) pendant sa durée d'utilisation prévue au projet et pour l'usage prévu.

Le guide CCES01 définit trois catégories de durée de service :

- 100 ans pour les constructions importantes (viaduc, ponts, grand building, ouvrages d'art en général...);
- 50 ans pour les bâtiments résidentiels, les petits bâtiments collectifs, les constructions industriels ;
- au moins 30 ans pour les constructions temporaires et les constructions industrielles.

### Les exigences de durabilité

Le guide CCES01 définit des exigences de durabilité pour le matériau et la structure. Vis-à-vis des constituants, le guide impose des exigences sur la nature du ciment, la quantité de liant (ciment + addition), la composition du liant, le rapport E/L et quelques paramètres environnementaux tels que la teneur initiale en ions chlorure dans le béton pour les environnements III et IV. Le guide prescrit également la durée de cure minimale permettant d'atteindre les résistances souhaitées à la fin de la cure et l'âge minimal du béton lorsqu'il est exposé à un environnement donné. Le tableau 21 résume les spécifications retenues pour chaque type d'environnement. Les différents types de ciment utilisés en Chine et leur composition sont résumés dans le tableau 22.

Les performances du béton sont estimées par les résistances mécaniques après une période de cure de 28 jours et par un indicateur de durabilité basé sur des essais de laboratoire qui dépendent du mécanisme de dégradation considéré (pour les environnements II, III et IV).

Exigences de durabilité		Type d'environnement				
		I	II	III	IV	V
Matériaux	Nature du ciment	X	X	X	X	X
	Quantité minimale de liant dans le béton	X	X	X	X	X
	Composition du liant	X	X	X	X	X
	Rapport E/L	X	X	X	X	X
	Paramètre spécifique à l'environnement		X	X	X	
	Conditions de cure	X	X	X	X	X
	Résistances mécaniques du béton à 28 jours	X	X	X	X	X
	Indicateur de durabilité		X	X	X	
Structure	Enrobage	X		X	X	
	Contrôle des fissures	X	X	X	X	X

Tableau 21 : Exigences de durabilité en fonction d'un environnement donné

Acronyme	Type de ciment	Composition	
		Clinker (%)	Autres
PO	Ciment portland ordinaire	85 - 94	6 - 15 % de constituants minéraux
PI	Ciment portland type I	100	-
PII	Ciment portland type II	95 - 100	0 - 5 % d'additions (gypse, laitier)
SP	Ciment portland - laitier de haut fourneau	30 - 80	20 - 70 % de laitier de haut fourneau
FP	Ciment portland - cendres volantes	60 - 80	20 - 40 % de cendres volantes
PP	Ciment portland - pouzzolanes	50 - 80	20 - 50 % de pouzzolanes
CP	Ciment portland composite	50 - 85	15 - 50 % de constituants minéraux
SR	Ciment portland résistant aux sulfates	95 - 100	C <sub>3</sub> S < 55 % C <sub>3</sub> A < 5 %
HSR	Ciment portland très résistant aux sulfates	95 - 100	C <sub>3</sub> S < 50 % C <sub>3</sub> A < 3 %

Tableau 22 : Ciments utilisés en Chine et leur composition

La suite de ce paragraphe détaille les exigences applicables en Chine pour la composition et les propriétés du béton en fonction de la classe d'environnement, pour une durée de service de 50 ans.



#### 2.6.4.1. Les bétons en contact avec l'air environnant (environnement I)

Le tableau 23 indique la classification des bétons soumis à des environnements de type I au sens du tableau 19, en fonction des conditions d'exposition. En comparaison, on retrouve les classes d'exposition correspondantes décrites dans l'Eurocode 2.

Le tableau 24 donne les exigences applicables en Chine pour la composition et les propriétés des bétons soumis à des environnements de type I au sens du tableau 19, pour une durée de service visée d'au moins 50 ans.

Classe	Conditions d'exposition	Applications	Eurocode 2
I - A	À l'intérieur, sec	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est inférieur à 60 %	XC0, XC1
	Immergé dans l'eau	Béton submergé en permanence dans de l'eau	XC1
I - B	Constamment humide	Surfaces de béton soumises au contact à long terme de l'eau et fondations	XC2
	À l'extérieur sans cycles d'humidification-séchage	Béton extérieur abrité de la pluie	-
	À l'intérieur, humide sans cycles d'humidification - séchage	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est supérieur à 60 %	XC3
I - C	Cycles d'humidification - séchage	Béton extérieur non abrité de la pluie	XC4

Tableau 23 : Classification des bétons soumis à des environnements de type I au sens du tableau 19, en fonction des conditions d'exposition

Le guide CCES01 donne également des recommandations pour contrôler l'apparition des fissures. Les ouvertures de fissures maximales tolérées sont de :

- 0,4 mm pour les classes d'environnement I - A ;
- 0,3 mm pour les classes d'environnement I - B ;
- 0,2 mm pour les classes d'environnement I - C.

Classe	Liant			E/L	Résistances mécaniques sur cubes (MPa)	Enrobage (mm)
	Quantité (kg/m <sup>3</sup> )	Nature du ciment (tableau 20)	Composition*			
I - A (sec)	260	PO, PI, PII	CV/0,2 + L/0,3 ≤ 1	0,60	C25	20
	280	PO, PI, PII, SP, FP, CP		0,55	C30	15
I - A (immersion)	260	PO, PI, PII	CV/0,2 + L/0,3 ≤ 1	0,60	C25	20
	280	PO, PI, PII, SP, FP, CP	CV/0,5 + L/0,7 ≤ 1	0,55	C30	15
I - B (constamment humide)	280	PO, PI, PII	CV/0,5 + L/0,7 ≤ 1	0,55	C30	20
	300	PO, PI, PII, SP, FP, CP		0,50	C35	15
I - B (humide à l'extérieur)	280	PO, PI, PII	CV/0,15 + L/0,25 ≤ 1	0,55	C30	20
	300		CV/0,2 + L/0,3 ≤ 1	0,50	C35	15
I - C	300	PO, PI, PII	CV/0,2 + L/0,3 ≤ 1	0,50	C35	30
	320		CV/0,25 + L/0,4 ≤ 1	0,45	C40	25
	340		CV/0,3 + L/0,5 ≤ 1	0,40	C45	20

\* CV = teneur en cendres volantes dans le liant ; L = teneur en fumée de silice dans le liant

Tableau 24 : Exigences applicables en Chine pour la composition et les propriétés des bétons soumis à des environnements de type I au sens du tableau 19

#### 2.6.4.2. Les bétons soumis à des cycles de gel et de dégel (environnement II)

Le tableau 25 indique la classification des bétons soumis à des environnements de type II au sens du tableau 19, en fonction des conditions d'exposition. En comparaison, on retrouve les classes d'exposition correspondantes décrites dans l'Eurocode 2.

Le tableau 26 donne les exigences applicables en Chine pour la composition et les propriétés des bétons soumis à des environnements de type II au sens du tableau 19, pour une durée de service visée d'au moins 50 ans.

Le guide CCES01 donne également des recommandations pour contrôler l'apparition des fissures. Les ouvertures de fissures maximales tolérées sont de :

- 0,2 mm pour les classes d'environnement II - C ;
- 0,2 mm pour les classes d'environnement II - D ;
- 0,15 mm pour les classes d'environnement II - E.

Classe	Conditions d'exposition	Applications	Eurocode 2
II - C	Gel modéré, saturation en eau importante du béton, pas de sels	Éléments exposés aux eaux souterraines	-
	Région froide, saturation en eau modérée du béton, pas de sels	Surfaces verticales de béton exposées à la pluie et au gel	XF1
II - D	Région froide, saturation en eau modérée du béton en présence de sels	Surfaces verticales de bétons des ouvrages routiers exposées au gel et à l'air véhiculant des agents de déverglaçage	XF2
	Région froide, saturation en eau importante du béton, pas de sels	Surfaces horizontales de bétons exposées fréquemment à la pluie et au gel et surfaces verticales de béton exposées aux eaux souterraines	XF3
	Gel modéré, saturation en eau importante du béton, présence de sels	Surfaces exposées aux zones de marnage	-
II - E	Région froide, saturation en eau importante du béton en présence de sels	Tabliers de pont exposés aux agents de déverglaçage	XF4

Tableau 25 : Classification des bétons soumis à des environnements de type II au sens du tableau 19, en fonction des conditions d'exposition

Classe	Liant			Teneur en air (%)	E/L	Résistances mécaniques sur cubes (MPa)	Indicateur de durabilité mesuré selon la norme C666/C666M-03 (%)
	Quantité (kg/m <sup>3</sup> )	Nature du ciment (tableau 20)	Composition*				
II - C	320	PO, PI, PII	CV/0,2 + L/0,2 ≤ 1	-	0,45	C40	50
	340			-	0,40	C45	50
	280		CV/0,3 + L/0,4 ≤ 1	4,5	0,55	C30	50
II - D (pas de sels)	300		CV/0,3 + L/0,4 ≤ 1	6	0,50	C35	70
II - D (sels)	300			6	0,50	C35	60
II - E	320			6	0,45	C40	80

\* CV = teneur en cendres volantes dans le liant ; L = teneur en fumée de silice dans le liant

Tableau 26 : Exigences applicables en Chine pour la composition et les propriétés des bétons soumis à des environnements de type II au sens du tableau 19

L'indicateur de durabilité est obtenu à partir des résultats d'un essai accéléré réalisé en laboratoire suivant le mode opératoire de la norme ASTM (2003) « Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing (C666/C666M-03) ».

#### 2.6.4.3. Les bétons situés dans un environnement marin ou en contact de sels de déverglaçage (environnement III et IV)

Les tableaux 27 et 28 indiquent respectivement la classification des bétons soumis à des environnements de type III et IV au sens du tableau 19, en fonction des conditions d'exposition. En comparaison, on retrouve les classes d'exposition correspondantes décrites dans l'Eurocode 2.

Le tableau 29 donne les exigences applicables en Chine pour la composition et les propriétés des bétons soumis à des environnements de type III et IV au sens du tableau 19, pour une durée de service visée d'au moins 50 ans.

Classe	Conditions d'exposition	Applications	Eurocode 2
III - C	Immergé en permanence	Piles de pont immergées en permanence, 1 – 1,5 m en-dessous du niveau de la mer	XS2
III - D	Légèrement exposé à l'air véhiculant du sel marin	Éléments situés à 100 – 300 m de la côte ou 15 m au-dessus du niveau de la mer	XS1
III - E	Très exposé à l'air véhiculant du sel marin	Éléments situés à moins de 100 m de la côte ou jusqu'à 15 m au-dessus du niveau de la mer	XS1
	Zones de marnage et zones soumises à des projections ou à des embruns dans des climats tempérés	Éléments exposés à des zones de marnage ou des zones soumises à des projections ou à des embruns ou dans un rayon de 1,5 m en-dessous du niveau de la mer dans un climat tempéré (température moyenne annuelle inférieure à 20 °C)	XS3
III - F	Zones de marnage et zones soumises à des projections ou à des embruns dans des climats chauds	Éléments exposés à des zones de marnage ou des zones soumises à des projections ou à des embruns ou dans un rayon de 1,5 m en-dessous du niveau de la mer dans un climat chaud (température moyenne annuelle supérieure à 20 °C)	XS3

Tableau 27 : Classification des bétons soumis à des environnements de type III au sens du tableau 19, en fonction des conditions d'exposition

On observe dans le tableau 25 que, contrairement à l'Eurocode 2 (et l'EN 206), le guide CCES01 attribut une classe plus élevée pour les bétons exposés à l'air véhiculant du sel marin (mais pas en contact direct avec l'eau de mer) que pour les bétons immergés en permanence. Ceci découle des retours d'expériences en Chine et de la rareté des cas de corrosion observés sur des structures en béton armé immergées en permanence.

Classe	Conditions d'exposition	Applications	Eurocode 2
IV - C	Chlorures transportés par voie aérienne	Éléments situés à plus de 100 m de la chaussée	XD1
	Immersion dans une eau chlorée	Fondations et éléments exposés en permanence à des eaux souterraines	XD2
	Eau contenant une faible quantité de chlorures + cycles hydriques	Éléments exposés à des eaux souterraines	-
IV - D	Projections de sels de déverglaçage	Viaduc, barrages	XD3
	Eau contenant une quantité moyenne de chlorures + cycles hydriques	Éléments exposés à des eaux souterraines avec une concentration en chlorures comprise entre 500 et 5 000 mg/l Piscines	-
IV - E	En contact direct avec des sels de déverglaçage	Tabliers de ponts	XD3
	Projections fréquentes de sels de déverglaçage	Éléments de ponts, viaduc, éléments situés dans un rayon de 10 m de la chaussée	XD3
	Eau contenant une quantité importante de chlorures + cycles hydriques	Éléments exposés à des eaux souterraines avec une concentration en chlorures supérieure à 5 000 mg/l	XD3

Tableau 28 : Classification des bétons soumis à des environnements de type IV au sens du tableau 19, en fonction des conditions d'exposition

Le guide CCES01 impose une durée minimale de cure de 7 jours et impose d'atteindre une résistance mécanique d'au moins 70 % de la résistance mesurée à 28 jours de manière conventionnelle. Vis-à-vis des performances du béton, le guide CCES01 se base sur les résistances mécaniques mesurées sur cube à 28 jours et sur le coefficient de diffusion des ions chlorure mesuré à partir d'un essai accéléré réalisé en laboratoire suivant le mode opératoire de la norme NT build 355 (1997) « Concrete, mortar and cement based materials – chloride diffusion coefficient from migration cell experiments ».

Le guide CCES01 donne également des recommandations pour contrôler l'apparition des fissures. Les ouvertures de fissures maximales tolérées sont de :

- 0,2 mm pour les classes d'environnement III, IV - C ;
- 0,2 mm pour les classes d'environnement III, IV - D ;
- 0,15 mm pour les classes d'environnement III, IV - E ;
- 0,10 mm pour les classes d'environnement III - F.

Classe	Liant			Teneur initial en ions chlorure (%)	E/L	Résistances mécaniques sur cubes (MPa)	Indicateur de durabilité ( $10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	Enrobage (mm)
	Quantité (kg/m <sup>3</sup> )	Nature du ciment (tableau 20)	Composition*					
III, IV - C	300	PO, PI, PII	$\geq CV + L/0,8 \leq 1$	0,1 pour les armatures passives	0,50	C35	-	35
III, IV - D	320				0,45	C40	$\leq 10$	45
III, IV - E	340				0,40	C45	$\leq 6$	50
	360			0,36	C50	45		
III - F	360					55		
	380			50				

\* CV = teneur en cendres volantes dans le liant ; L = teneur en fumée de silice dans le liant

Tableau 29 : Exigences applicables en Chine pour la composition et les propriétés des bétons soumis à des environnements de type III et IV au sens du tableau 19

#### 2.6.4.4. Les bétons en contact avec un environnement contenant des sulfates (environnement V)

Pour prévenir les risques de dégradations liés aux sulfates, le guide CCES01 préconise une concentration maximale en ions SO<sub>3</sub> de 4 % dans le liant.

Le tableau 30 indique la classification des bétons soumis à des environnements de type V au sens du tableau 19, en fonction des conditions d'exposition.

Classe	Concentration en sulfates		Conditions d'exposition
	Dans l'eau (mg/l)	Dans les sols (mg/kg)	
V - C	200 - 1 000	300 - 1 500	Contact direct, immergé dans l'eau des sols
	200 - 500	300 - 750	Exposés à l'eau des sols et à l'atmosphère dans les régions sèches
V - D	1 000 - 4 000	1 500 - 6 000	Contact direct, immergé dans l'eau des sols
	500 - 2 000	750 - 3 000	Exposés à l'eau des sols et à l'atmosphère dans les régions sèches
V - E	4 000 - 10 000	6 000 - 15 000	Contact direct, immergé dans l'eau des sols
	2 000 - 5 000	3 000 - 7 500	Exposés à l'eau des sols et à l'atmosphère dans les régions sèches

Tableau 30 : Classification des bétons soumis à des environnements de type V au sens du tableau 19, en fonction des conditions d'exposition

Le tableau 31 donne les exigences applicables en Chine pour la composition et les propriétés des bétons soumis à des environnements de type V au sens du tableau 19, pour une durée de service visée d'au moins 50 ans.

Classe	Liant			E/L	Résistances mécaniques sur cubes (MPa)
	Quantité (kg/m <sup>3</sup> )	Nature du ciment (tableau 20)	Composition*		
V - C	320	PO, PI, PII, SR, HSR	$1 \leq CV/0,25 + L/0,4$	0,45	C40
V - D	340		$CV/3 + L/0,5 \leq 1$	0,40	C45
	360		$0,5 \leq CV/0,5 + L/0,8 \leq 1$	0,36	C50
V - E	360			0,36	C50

\* CV = teneur en cendres volantes dans le liant ; L = teneur en fumée de silice dans le liant

Tableau 31 : Exigences applicables en Chine pour la composition et les propriétés des bétons soumis à des environnements de type V au sens du tableau 19

## 2.6.5. Japon [7]

Au Japon, il existe un référentiel mis au point par la Japan Society of Civil Engineers (JSCE), leader de l'organisation des investigations, de la recherche, de la promotion technologique et de l'enseignement du béton au Japon : le JSCE Guidelines for Concrete n° 15 « Standard specifications for concrete structures (SSCS) - Design » (2007).

Dans ce document de plus de 500 pages, toutes les spécifications concernant la vérification de performances structurelles, la vérification des performances vis-à-vis des séismes, les matériaux, la construction, la maintenance, les barrages et le béton de voirie ont été transposées d'une approche prescriptive vers une approche de type performantiel. L'approche performantielle ainsi définie apparaissait déjà dès le début des années 2000. La révision du SSCS - Design en 2007 permet d'aboutir à un document qui détaille non seulement toutes les étapes du concept de l'approche performantielle mais qui fournit également toutes les conditions pour la rendre réellement applicable.

Le dimensionnement des structures vis-à-vis de la durabilité est traité dans la première partie du document, dans le chapitre 8 « Vérification of Durability ». Il est stipulé que toute structure doit être conçue de manière à maintenir les performances requises tout au long de la durée de service prévue initialement. Ce chapitre 8 fournit toutes les méthodologies nécessaires pour s'assurer du maintien des performances de la structure dans les différents environnements (carbonatation, chlorures, gel-dégel, environnements chimiquement agressifs).

Le dimensionnement des structures vis-à-vis de la durabilité est résumé ci-après pour chaque environnement considéré comme agressif vis-à-vis du matériau ou de la corrosion des armatures.

### 2.6.5.1. Corrosion des armatures

La vérification du maintien des performances d'une structure en béton armé dans des environnements agressifs vis-à-vis des armatures passe par la vérification de :

- l'épaisseur des fissures à la surface du béton qui ne doit pas être supérieure à une valeur seuil critique durant la vie de l'ouvrage ;
- la concentration des ions au voisinage de l'armature ne doit pas atteindre une valeur seuil critique durant la vie de l'ouvrage ;
- la profondeur de carbonatation ne doit pas atteindre une profondeur seuil critique durant la vie de l'ouvrage.



### 2.6.5.1.1. Fissuration

Des largeurs limites de fissures à la surface des bétons sont déterminées en fonction du niveau de sévérité de l'environnement dans lequel est situé l'ouvrage :

- environnement « normal » : environnement ne présentant pas de risques important vis-à-vis de la durabilité de la structure (non soumis à des attaques chimiques ou à des concentrations en ions chlorure importante, peu d'alternance d'humidité...);
- environnement « corrosif » : environnement présentant des cycles d'humidification et de séchage, environnement souterrains aux contacts d'espèces agressives, structures marines immergées dans l'eau en permanence, structures en bord de mer mais non exposées à des conditions sévères vis-à-vis de la corrosion des armatures ;
- environnement « très corrosif » : béton soumis à des espèces particulièrement agressives, structures marines soumises à des zones de marnage, aux embruns marins, ou exposées à des vents océaniques.

En fonction de l'environnement considéré, les largeurs des fissures vue à la surface du béton sont limitées aux valeurs du tableau 32.

Type d'armatures	Conditions environnementales vis-à-vis de la corrosion des armatures		
	Normal	Corrosif	Très corrosif
Armatures crantées ou lisses	0,005c	0,004c	0,0035c
Armatures précontraintes	0,004c	-	-

où c représente l'épaisseur d'enrobage.

Tableau 32 : Largeurs limites des fissures  $w_a$  sur la surface des bétons en fonction des conditions environnementales

### 2.6.5.1.2. Carbonatation

La vérification du maintien des performances d'une structure en béton armé soumise à un phénomène de carbonatation passe par la vérification de l' suivante :

$$\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim}} \leq 1$$

où

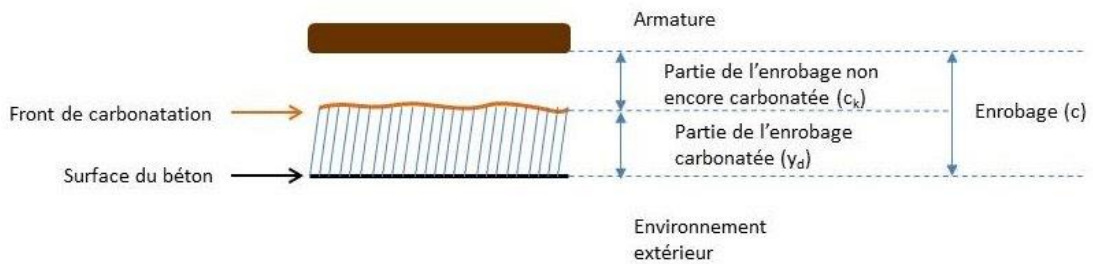
$\gamma_i$  : facteur représentant l'importance de la structure. En général, sa valeur est égale à 1 mais peut être augmentée jusqu'à 1,1 pour des structures importantes.

$y_{lim}$  : profondeur de carbonatation critique susceptible de conduire à l'initiation de la corrosion de l'armature. En général, cette valeur est obtenue par l'équation suivante :

$$y_{lim} = c_d - c_k$$

où

$c_k$  : partie de l'enrobage non encore carbonatée (mm). Cette valeur peut être considérée égale à 10 mm pour les structures situées dans des conditions environnementales « normales », et comprise entre 10 mm et 25 mm pour des structures situées dans des environnements riches en chlorures.



$c_d$  : valeur de dimensionnement de l'enrobage utilisée pour la vérification de la durabilité (mm). En général, cette valeur est obtenue par l'équation suivante :

$$c_d = c - \Delta c_e$$

où

$c$  : épaisseur d'enrobage (mm).

$\Delta c_e$  : facteur d'erreur de construction (mm).

$y_d$  : valeur de la profondeur de carbonatation estimée à la fin de la durée de service. En général, cette valeur est obtenue par l'équation suivante :

$$y_d = \gamma_{cb} \cdot \alpha_d \sqrt{t}$$

où

$\gamma_{cb}$  : facteur de sécurité prenant en compte la variation de la valeur de la profondeur de carbonatation. En général, ce facteur est égal à 1,15 mais dans le cas d'un béton très fluide, ce facteur peut être égal à 1,1.

$t$  : durée de service prévue de la structure en année ( $t \leq 100$  ans dans le cadre de cette méthodologie).

$\alpha_d$  : valeur de la vitesse de carbonatation ( $\text{mm}/\text{an}^{1/2}$ ), donnée par l'équation suivante :

$$\alpha_d = \alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c$$

où

$\beta_e$  : facteur prenant en compte les conditions environnementales. En général, ce facteur est égal à 1,6 pour les environnements relativement secs et 1 pour les environnements humides.

$\gamma_c$  : facteur prenant en compte les propriétés matériaux du béton. En général, ce facteur est égal à 1 mais peut être égal à 1,3 pour les parties supérieures de l'ouvrage. Si aucune différence de comportement n'est observée entre le béton in situ et les éprouvettes testées en laboratoire, ce facteur est égal à 1.

$\alpha_k$  : valeur caractéristique de la vitesse de carbonatation ( $\text{mm}/\sqrt{\text{an}}$ ). Cette valeur est généralement déterminée par des essais expérimentaux ou par des retours d'expérience. Une estimation de cette valeur est donnée dans le chapitre 5.2.1 du JSCE-SSCS :

$$\alpha = -3,57 + 0,9 \frac{E_{eff}}{C + kA}$$

( $C$  représentant la quantité de ciment,  $A$  la quantité d'addition et  $k$  représentant un facteur de prise en compte de l'addition.  $k = 0$  dans le cas de cendres volantes et 0,7 pour le cas des laitiers de haut fourneau).

Notons que dans cette méthodologie, le facteur  $c_k$  prend en compte la probabilité de dépassement de l'armature avant même que le front de carbonatation atteigne l'interface béton/armature. Cette probabilité est considérée comme étant plus importante en présence d'ions chlorure.

Le dimensionnement des structures vis-à-vis de la durabilité est traité dans la partie 3 du document. Dans le chapitre 2 de la partie 3, il est stipulé que, pour une structure en béton traditionnel située dans un environnement « normal » (considéré comme non soumis aux risques de corrosion par les ions chlorure et non exposés aux risques de dégradation du matériau liés aux gel-dégel et aux environnements chimiquement agressifs), si les exigences concernant l'épaisseur d'enrobage et le rapport  $E_{eff}/C$  sont respectées (tableau 33), les exigences basées sur une approche de type performantiel citées plus haut ne s'appliquent pas.

Enfin le guide JSCE-SSCS fournit dans le chapitre 2 de la partie 3 un exemple de dimensionnement de l'enrobage en fonction du rapport  $E_{eff}/C$ . Cet exemple est illustré sur la figure 2.

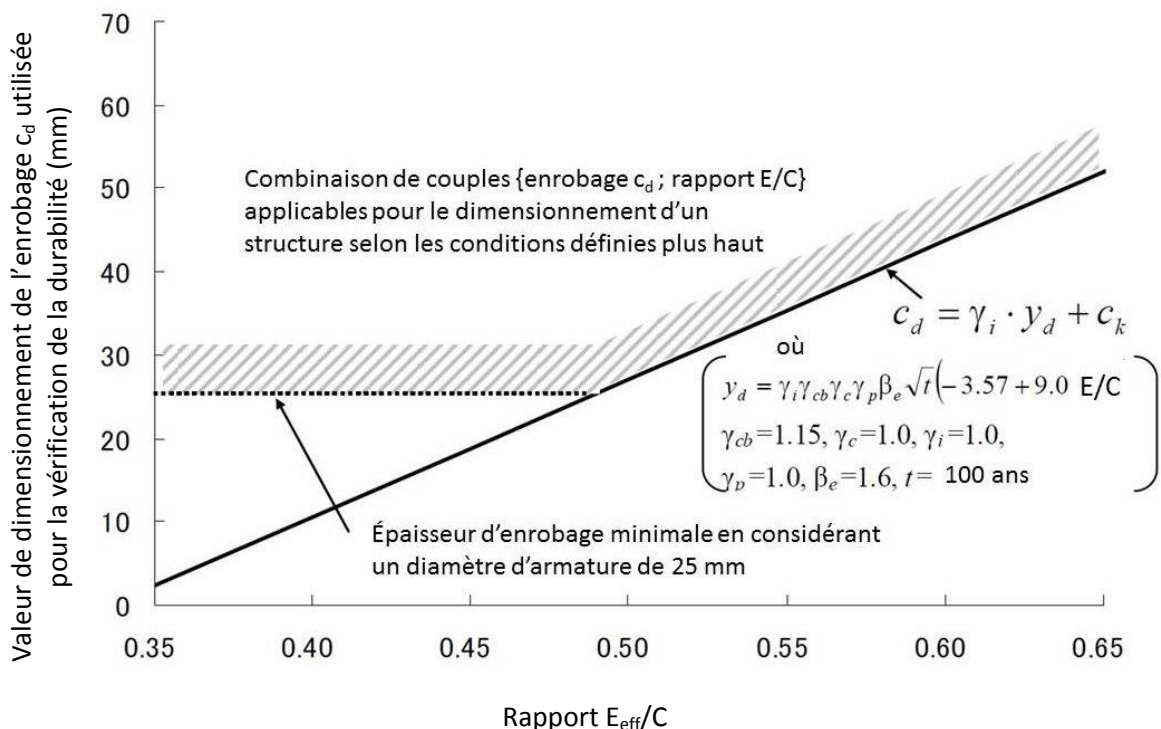


Figure 2 : Relation entre l'épaisseur de béton carbonaté et le rapport  $E_{eff}/C$

	Rapport $E_{eff}/C$ maximal	Épaisseur d'enrobage minimal à respecter (mm)	Facteur d'erreur $\Delta c_e$ (mm)
Poteau de structure	0,50	45	$\pm 15$
Poutre	0,50	40	$\pm 10$
Dalle	0,50	35	$\pm 5$
Pile de pont	0,50	55	$\pm 15$

\* utilisation d'un ciment traditionnel de type CEM I

Tableau 33 : Épaisseur minimal d'enrobage et rapport  $E_{eff}/C$  maximal permettant de s'affranchir de la méthodologie de vérification des performances de structures en béton soumis à des risques de carbonatation (durée de vie visée : 100 ans)

### 2.6.5.1.3. Chlorures

La vérification du maintien des performances d'une structure en béton armé soumise à un environnement contenant des ions chlorure susceptibles de conduire à un risque de corrosion des armatures passe par la vérification de l'équation suivante :

$$\gamma_i \frac{C_d}{C_{lim}} \leq 1$$

où

$\gamma_i$  : facteur représentant l'importance de la structure. En général, sa valeur est égale à 1 mais peut être augmentée jusqu'à 1,1 pour des structures importantes.

$C_{lim}$  : valeur critique de concentration des ions chlorure à la surface de l'armature. Cette valeur doit être déterminée par l'expérimentation ou par des retours d'expériences sur des structures similaires. En cas d'absence de données, la valeur de 1,2 kg/m<sup>3</sup> peut être utilisée. Dans le cas des structures soumises à des cycles de gel-dégel, une valeur inférieure à 1,2 kg/m<sup>3</sup> doit être retenue.

$C_d$  : valeur de dimensionnement de la concentration en ions chlorure au voisinage de l'armature. Cette valeur peut être déterminée par l'équation suivante :

$$C_d = \gamma_{cl} C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{0,1 \cdot c'_d}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right\}$$

où

$C_0$  : concentration en ions chlorure à la surface du béton (kg/m<sup>3</sup>). En général, cette valeur peut être déterminée dans le tableau 34.

		Zone au contact potentiel de l'eau de mer	Distance par rapport à la côte (km)				
			Près de littoral	0,1	0,25	0,5	1
Région présentant une concentration importante d'ions chlorure via les sels marins véhiculés par l'air	Hokkaido, Tohoku, Hokiruki, Okinawa	13	9	4,5	3	2	1,5
Région présentant une concentration faible d'ions chlorure via les sels marins véhiculés par l'air	Kanto, Tokai, Kinki, Chugoku, Shikoku, Kyushu		4,5	2,5	2	1,5	1

Tableau 34 : Concentration en ions chlorure  $C_0$  en fonction de la région considérée (kg/m<sup>3</sup>)

$\gamma_{cl}$  : coefficient de sécurité prenant en compte la variabilité de la concentration en ions chlorure au voisinage de l'armature  $C_d$ . En général, ce coefficient est égal à 1,3.

$c'_d$  : valeur de dimensionnement de l'enrobage utilisée pour la vérification de la durabilité (mm). En général, cette valeur est obtenue par l'équation suivante :

$$c_d = c - \Delta c_e$$

où

$c$  : épaisseur d'enrobage (mm).

$\Delta c_e$  : facteur d'erreur de construction (mm).

$t$  : durée de service prévue de la structure en année (pour estimer la concentration en ions chlorure à la surface de l'armature, il est nécessaire de considérer une valeur de  $t$  supérieure à 100 ans).

$D_d$  : valeur de dimensionnement du coefficient de diffusion des ions chlorure ( $\text{cm}^2/\text{an}$ ) dans le béton. En général, cette valeur peut être estimée par l'équation suivante :

$$D_d = \gamma_c D_k + \left( \frac{w}{l} \right) \left( \frac{w}{w_a} \right)^2 D_0$$

où

$\gamma_c$  : facteur prenant en compte les propriétés matériaux du béton. En général, ce facteur est égal à 1 mais peut être égal à 1,3 pour les parties supérieures de l'ouvrage. Si aucune différence de comportement n'est observée entre le béton in situ et les éprouvettes testées en laboratoire, ce facteur est égal à 1.

$D_k$  : valeur caractéristique du coefficient de diffusion des ions chlorure dans le béton ( $\text{cm}^2/\text{an}$ ).

$D_0$  : facteur prenant en compte l'influence des fissures sur le transport des ions chlorure dans le béton ( $\text{cm}^2/\text{an}$ ). Ce facteur ne doit être considéré que dans le cas où des fissures dues à la flexion longitudinale sont permises. En général, ce facteur est égal à  $200 \text{ cm}^2/\text{an}$ .

$w$  : largeur de fissure (mm).

$w_a$  : largeur limite de fissure (mm) (tableau 32).

$$\frac{w}{l}$$

: rapport entre la largeur de fissure et l'espacement de fissure. Ce rapport peut être calculé par l'équation suivante :

$$\frac{w}{l} = 3 \left( \frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right)$$

où

$E_s$  : module d'élasticité du béton.

$\varepsilon'_{csd}$  : facteur représentant l'effet du fluage et des déformations différées sur les largeurs de fissures. En général, ce facteur est égal à  $150 \cdot 10^{-6}$  et peut être égal à  $150 \cdot 10^{-6}$  pour le cas de bétons à hautes performances.

Si les exigences décrites ci-dessus ne peuvent être respectées, des armatures protégées contre la corrosion doivent être utilisées ou des systèmes de protections peuvent être appliqués à la surface du béton pour agir comme barrières de protection.

Le dimensionnement des structures vis-à-vis de la durabilité est traité dans la partie 3 du document. Dans le chapitre 2 de la partie 3, des valeurs limites de coefficient de diffusion des ions chlorure sont données en fonction des différents paramètres influents :

- largeur de fissures ;
- distance par rapport à la côte ;
- épaisseurs d'enrobage ;
- rapport  $E_{\text{eff}}/C$ .

## 2.6.5.2. Dégradation du matériau

### 2.6.5.2.1. Action du gel-dégel

La vérification du maintien des performances d'une structure en béton armé soumise à un phénomène de gel-dégel passe par la vérification de l'équation suivante :

$$\gamma_i \frac{E_{\text{min}}}{E_d} \leq 1$$

où

$\gamma_i$  : facteur représentant l'importance de la structure. En général, sa valeur est égale à 1 mais peut être augmentée jusqu'à 1,1 pour des structures importantes.

$E_{min}$  : valeur critique du module d'élasticité dynamique relatif nécessaire pour assurer la bonne tenue de la structure vis-à-vis des risques de gel et de dégel. En général, cette valeur critique peut être donnée dans le tableau 35.

	Climats			
	Conditions environnementales sévères ou risques de gel et de dégel importants		Conditions environnementales moins sévères, température rarement inférieure à 0 °C	
	Éléments fins	Autres	Éléments fins	Autres
Structures immergées dans l'eau ou souvent au contact de l'eau	85	70	85	60
Autres	70	60	70	60

Tableau 35 : Valeur minimale du module d'élasticité dynamique relatif (%) permettant de respecter les exigences de durabilité vis-à-vis du risque de gel-dégel

$E_d$  : valeur relative de dimensionnement du module d'élasticité dynamique dans l'essai de gel-dégel. En général, cette valeur est obtenue par l'équation suivante :

$$E_d = \frac{E_k}{\gamma_c}$$

où

$\gamma_c$  : facteur prenant en compte les propriétés matériaux du béton. En général, ce facteur est égal à 1 mais peut être égal à 1,3 pour les parties supérieures de l'ouvrage. Si aucune différence de comportement n'est observée entre le béton in situ et les éprouvettes testées en laboratoire, ce facteur est égal à 1.

$E_k$  : valeur caractéristique du module d'élasticité dans l'essai de gel-dégel. Cette valeur correspond au rapport des mesures de fréquences de résonance unidirectionnelles mesurées après et avant un essai de gel-dégel.

Notons que la valeur relative du module d'élasticité dynamique  $E_d$  peut également être estimée par rapport au rapport  $E_{eff}/C$  (tableau 36).

	Rapport $E_{eff}/C$			
	65	60	55	45
Valeur relative du module d'élasticité dynamique (%)	60	70	85	90

Tableau 36 : Rapports  $E_{eff}/C$  permettant le respect des exigences du module d'élasticité vis-à-vis des risques de gel-dégel

### 2.6.5.2.2. Environnement chimiquement agressif

La vérification du maintien des performances d'une structure en béton armé soumise à un environnement chimiquement agressif passe par la vérification de l'équation suivante :

$$\gamma_i \frac{y_{ced}}{c_d} \leq 1$$

où

- $\gamma_i$  : facteur représentant l'importance de la structure. En général, sa valeur est égale à 1 mais peut être augmentée jusqu'à 1,1 pour des structures importantes.
- $y_{ced}$  : profondeur de pénétration critique de l'espèce chimiquement agressive susceptible de conduire à une dégradation du matériau. En général, cette valeur est obtenue par l'équation suivante :

$$y_{ced} = \gamma_c y_{ce}$$

où

- $\gamma_c$  : facteur prenant en compte les propriétés matériaux du béton. En général, ce facteur est égal à 1 mais peut être égal à 1,3 pour les parties supérieures de l'ouvrage. Si aucune différence de comportement n'est observée entre le béton in situ et les éprouvettes testées en laboratoire, ce facteur est égal à 1.
- $y_{ce}$  : valeur caractéristique de pénétration de l'espèce chimiquement agressive.
- $c_d$  : valeur de dimensionnement de l'enrobage utilisée pour la vérification de la durabilité (mm). En général, cette valeur est obtenue par l'équation suivante :

$$c_d = c - \Delta c_e$$

où

- $c$  : épaisseur d'enrobage (mm).
- $\Delta c_e$  : facteur d'erreur de construction (mm).

Si l'attaque chimique est qualifiée de « sévère », la méthodologie développée ci-dessus ne s'applique pas et il est recommandé de procéder à des mesures sur site pour contrôler le maintien des performances de la structure.

### 2.6.6. Afrique du Sud [8]

La Durability Index Approach (Approche basée sur des indicateurs de durabilité notés ID) est une approche développée sous le pilotage de C&CI Technical Committee. Le développement de cette approche repose sur 7 étapes :

- Étape 1 : définition des classes d'exposition liées aux mécanismes de dégradation.  
Les classes d'exposition sont celles qui relèvent de la norme EN 206.
- Étape 2 : déclinaison d'une méthodologie de conception des bétons incluant la définition de la durée de vie visée.  
Cette étape nécessite l'utilisation de modèles prédictifs de durabilité.
- Étape 3 : développement de méthodes d'essais reliées aux paramètres d'entrée de la méthode de dimensionnement retenue.  
Essais de caractérisation des indicateurs de durabilité (ID), paramètres d'entrée des modèles prédictifs.
- Étape 4 : confrontation des valeurs aux critères de conformité.  
Valeurs déterministes faisant l'objet d'un consensus pour satisfaire les exigences de durabilité dans un environnement donné.



- Étape 5 : définition des limites d'application des essais.  
Les essais utilisés dans le cadre de cette approche sont adaptés pour des bétons traditionnels et des BHP, mais pas pour des bétons spéciaux.
- Étape 6 : contrôle de production.  
Il existe deux types d'exigences : une exigence sur le matériau au moment de sa formulation (qui relève de la responsabilité du producteur de béton) et une exigence sur la performance de la structure (qui relève de la responsabilité du constructeur). Les deux niveaux d'exigences sont basés sur deux valeurs seuils différentes d'indicateurs de durabilité.
- Étape 7 : réalisation d'essais in situ, en conditions naturelles et vérification des exigences de conformité.  
Cette étape doit permettre de conforter l'approche développée et de calibrer les résultats des essais de durabilité pour des constituants traditionnels. La constitution d'une base de données permettrait d'améliorer encore davantage la méthodologie et le choix des valeurs seuils à atteindre pour garantir la performance d'une structure en béton pendant une durée de service donnée.

En Afrique du Sud, deux indicateurs de durabilité sont retenus : un indicateur lié à la perméabilité à l'oxygène ( $OPI = -\log_{10}(K)$ ,  $K$  représentant la perméabilité à l'oxygène) utilisé pour évaluer la résistance du béton au phénomène de carbonatation et un indicateur lié à la migration des ions chlorure sous champs électrique (CCI). Ces essais sont réalisés en laboratoire sur des bétons d'ouvrage et sur des éprouvettes de contrôle. La démarche développée utilise principalement les classes d'exposition de la norme européenne EN 206 à quelques exceptions près (on note par exemple l'existence des classes d'exposition XS2B et XS3B qui concernent les bétons soumis à l'abrasion et respectivement immergés en permanence ou exposés à des embruns ou à des cycles d'humidification/séchage). Une méthode de formulation basée sur des exigences performantielles imposera donc une valeur minimum d'OPI pour les bétons soumis à la carbonatation, et une valeur maximale de CCI pour les bétons soumis à des environnements contenant des ions chlorure. Ces valeurs seuils dépendent du niveau d'agressivité de l'environnement, de l'humidité relative environnante, de la nature du liant et de l'épaisseur d'enrobage choisi. L'approche performantielle ID impose également une gamme de résistance à la compression et un rapport  $E_{eff}/C+A$  maximal pour certaines classes d'exposition (tableau 37).

		Valeurs seuils maximales de CCI (mS/cm) en fonction de la nature du liant		
Classes d'exposition (basées sur la norme EN 206)	Épaisseur d'enrobage	100 % CEM I	30 % de cendres volantes	50 % de laitier Corex
XS3b : zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns, + abrasion	40	0,45	0,75	1,05
	60	0,95	1,35	1,95
	80	1,30	1,80	2,60
XS0b : exposé à l'air véhiculant du sel marin mais pas en contact direct avec l'eau de mer	40	1,00	1,85	2,50
	60	1,85	2,95	3,90
	80	2,50	3,75	4,80

<b>Légende</b>		Résistance du béton > 60 MPa
		Non recommandé : < 30 MPa, et/ou E/C > 0,55
		Acceptable : gamme de résistances comprise entre 30 et 60 MPa

Tableau 37 : Exemples de valeurs seuils de CCI dans le cas de structure marine, pour une durée de service de 50 ans

Dans la norme EN 206, la variabilité de la résistance mécanique à la compression est prise en compte en raisonnant sur les valeurs caractéristiques. De la même manière, la méthodologie développée en Afrique du Sud prend en compte la variabilité du matériau et des propriétés de durabilité en raisonnant sur les valeurs caractéristiques et permet d'atteindre un même niveau de sécurité pour les utilisateurs finaux. Les valeurs seuils spécifiées correspondent aux exigences de durabilité à respecter sur la structure.

Le retour d'expérience et des études réalisées sur des éprouvettes de béton confectionnées en laboratoire et sur des éprouvettes prélevées in situ mettent en évidence une plus grande variabilité des propriétés de durabilité lorsqu'elles sont mesurées sur des éprouvettes prélevées sur des ouvrages existants (tableau 38).

	Coefficient de variation (%)	
	Indicateur lié à la migration des ions chlorure sous champs électrique (CCI)	Indicateur lié à la perméabilité à l'oxygène (OPI)
Laboratoire	5	1
In situ	14	2

Tableau 38 : Coefficient de variation des propriétés de durabilité

Les relations suivantes permettent de passer de la valeur caractéristique spécifiée sur site à la valeur caractéristique :

$$OPI_{\text{caractéristique du matériau}} \geq OPI_{\text{caractéristique spécifiée}} + 0,10$$

$$CCI_{\text{caractéristiques du matériau}} \leq 0,9.CCI_{\text{caractéristique spécifiée}}$$

L'approche performantielle développée en Afrique du Sud prend également en compte la variabilité des propriétés de durabilité et fournit des règles de passage entre la valeur cible à atteindre pour respecter les exigences de performance sur le matériau et la valeur caractéristique :

$$OPI_{\text{cible du matériau}} = OPI_{\text{caractéristique du matériau}} + 0,22$$

$$CCI_{\text{cible du matériau}} = 0,90.CCI_{\text{caractéristique du matériau}}$$

ou

$$CCI_{\text{cible du matériau}} = 0,82.CCI_{\text{caractéristique du matériau}} + 0,20$$

Le tableau 39 donne un exemple d'application de l'approche performantielle développée en Afrique du Sud.

		Composition du liant		
		70 % de CEM I et 30 % de cendres volantes	50 % de CEM I et 50 % de laitier de haut fourneau	50 % de CEM I et 50 % de laitier Corex
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block; margin-bottom: 10px;">x 0,90</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block; margin-bottom: 10px;">x 0,90 ou x 0,82 + 0,20</div>	XS3b (valeur seuil caractéristique in situ)	1,35	1,60	1,95
	Valeur seuil caractéristique pour le matériau	1,22	1,44	1,76
	Valeur seuil cible à respecter lors de l'étape de formulation	1,09	1,30	1,58

Tableau 39 : Exemple d'application de l'approche performantielle en prenant en compte la variabilité du matériau et l'indicateur de durabilité CCI (unités : mS/cm)

## 2.7. Conclusions

Cette étude concerne les éléments de structure en béton utilisés pour le bâtiment et le génie civil, pour lesquels l'approche performantielle de la durabilité constitue une solution alternative intéressante pour valider un béton d'un point de vue technique, économique et environnemental. Cette étude de veille a permis de faire le point sur l'existant et les avancées au niveau international concernant le développement et l'utilisation d'approches performantielles de la durabilité. De nombreux pays s'attachent :

- à développer encore davantage ces concepts pour la réalisation des bétons ;
- à asseoir de plus en plus les spécifications normatives sur des approches basées sur les performances des matériaux vis-à-vis de leurs environnements.

Quelques points forts ont été identifiés dans les approches performantielles étrangères :

- en Espagne, l'EHE 08 fait explicitement référence à des modes opératoires pour les essais de durabilité ;
- au Portugal, le concept de performances équivalentes est décrit à travers la norme E 464 en accord avec les spécifications de la norme EN 206 ;
- aux Pays-Bas et en Belgique, la démarche d'approche performantielle est intégrée dans le contexte normatif ;
- en Afrique du Sud, la méthodologie développée prend en compte la variabilité du matériau et des propriétés de durabilité ;
- au Japon, la méthodologie développée dans le guide JSCE-SSCS décrit explicitement toutes les étapes pour la réalisation de structure en béton en utilisant une approche performantielle basée sur des méthodes de vérification d'états limites robustes.

Les enjeux associés à l'approche performantielle de la durabilité sont considérables, en termes d'optimisation technico-économique des ouvrages et des produits en béton, d'impacts environnementaux, de maîtrise des coûts de construction incluant ceux relatifs à la maintenance.

L'intérêt de l'approche performantielle se situe à plusieurs niveaux :

- disposer à termes d'un plus grand degré de liberté sur les compositions de béton avec un moindre impact environnemental et les mêmes garanties sur leur durabilité ; l'utilisation d'essais performantiels et d'indicateurs de durabilité facilitera la validation des bétons innovants ;
- utiliser une approche prescriptive pour laquelle les seuils définis correspondent davantage aux propriétés réelles des bétons ; l'approche performantielle permet notamment de mieux valoriser les additions ;
- valoriser le fait que les bétons plus compacts sont généralement plus durables.

## 2.8. Références

- [1] Éditions CSTB  
Méthodologie d'évaluation de la durabilité des matériaux cimentaires hors normes pour le bâtiment.  
*Janvier 2017.*
- [2] Kollek, J.J.,  
The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau method – a recommendation.  
*Materials and Structures, 1989, 22, 225-230.*
- [3] RILEM  
Recommendation RILEM CPC 11.1 – Absorption of water by immersion.  
*1982.*
- [4] FD CEN/TR 16563  
Principes de la procédure de durabilité équivalente.  
*Octobre 2014.*
- [5] PERFDUB  
Approche performantielle de la durabilité des ouvrages en béton.  
*Étude de faisabilité 2012.*
- [6] Kefei Li, Zhaoyuan Chen, Huizhen Lian  
Concepts and requirements of durability design for concrete structures : an extensive review of CCES01.  
*Materials and Structures, 2008, 41, 717-731.*
- [7] JSCE Guidelines for Concrete n° 15  
Standard specifications for concrete structures.  
*2007 Design.*
- [8] Alexander Mark G.  
Performances-based durability design and specifications for concrete structures.  
*54<sup>th</sup> CBC – Brazilian Conference on Concrete Maceio, October 2017.*