

APPROCHE PERFORMANTIELLE ET PRÉDICTIVE DE LA DURABILITE DU BETON ARME SUR LA BASE D'INDICATEURS DE DURABILITÉ

V. Baroghel-Bouny

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris

Résumé

Cet article présente une approche performantielle de la durabilité fondée sur des indicateurs de durabilité. Le panel d'indicateurs généraux choisis est tout d'abord présenté. Un exemple de spécifications en fonction des conditions environnementales et de la durée de vie visée est ensuite donné, relativement au cas de la protection des ouvrages contre la corrosion des armatures induite par les chlorures. De plus, le principe de l'approche multi-niveaux adoptée dans le cadre de la prédiction de la durée de vie des structures en béton armé est brièvement expliqué.

Mots-clés

Béton armé - Corrosion - Durabilité - Indicateur - Prédiction - Spécifications

1. INTRODUCTION

De nos jours, dans différents pays, des travaux importants sont consacrés au développement de nouvelles approches de la durabilité, afin d'accroître la durée de vie des structures en béton armé sans surcoût. Avec l'utilisation croissante de formules de béton complexes, incorporant par exemple des additions hydrauliques ou pouzzolaniques, une *approche performantielle* semble particulièrement bien appropriée.

Une telle approche [1-3] a été développée dans le cadre d'un groupe de travail de l'Association Française de Génie Civil. Celle-ci est basée sur des propriétés fondamentales du matériau, les *indicateurs de durabilité* (ID) et sur la spécification de critères performantiels adéquats relativement à ces indicateurs. Elle fait également intervenir des modèles prédictifs. L'objectif est de concevoir des bétons susceptibles de protéger les ouvrages en béton armé contre une dégradation donnée (par exemple, corrosion des armatures ou alcali-réaction), pour une durée de vie fixée et dans des conditions environnementales données.

2. SELECTION DES INDICATEURS DE DURABILITÉ

Les ID ont été choisis sur la base, d'une part, de leur pertinence théorique dans la quantification et la prévision de la durabilité (par exemple, propriétés de transport impliquées dans les équations fondamentales), et d'autre part, de leur aptitude à être déterminés de façon fiable et facile, au moyen de méthodes de laboratoire bien définies et reproductibles.

Certains de ces paramètres peuvent être qualifiés d'*indicateurs de durabilité généraux*, étant donné qu'ils sont les plus pertinents vis-à-vis des différents processus de dégradation. Il s'agit de : porosité à l'eau, coefficient de diffusion des chlorures, perméabilité aux gaz et à l'eau liquide, et teneur en portlandite [2]. Ce panel d'indicateurs de durabilité généraux peut être complété par des indicateurs plus spécifiques à chaque processus de dégradation identifié ou envisagé en fonction notamment des conditions environnementales de la structure (par exemple, alcali-réaction ou action des cycles de gel-dégel, ...).

On notera que le nombre d'indicateurs de durabilité généraux choisis est très petit. De plus, ces paramètres sont complémentaires, mais tous ne sont pas systématiquement nécessaires dans chaque cas pratique, comme il sera illustré dans les sections suivantes.

3. CLASSES ASSOCIÉES AUX INDICATEURS DE DURABILITÉ : ÉVALUATION DE LA DURABILITÉ "POTENTIELLE" DU BETON ARMÉ

Un système de classes (du niveau "très faible" au niveau "très élevé") a été proposé [1,2] pour une évaluation qualitative ou quantitative de la durabilité "potentielle", du point de vue du matériau. Pour un béton armé donné, cette évaluation consistera à comparer les valeurs de chaque ID, obtenues au moyen d'essais de laboratoire selon des procédures bien définies (voir par exemple [2] ou [4]) ou extraites à partir d'une base de données, aux classes correspondantes proposées. Les performances de différentes formules de béton peuvent ainsi être comparées, et le classement alors obtenu peut être utilisé par l'ingénieur ou le concepteur pour sélectionner des bétons sur la base de critères prédéfinis, pour optimiser la formulation, ou encore pour contrôler la qualité du matériau.

Étant donné que les différents ID proposés sont complémentaires, quand plusieurs ID ont été déterminés, il peut être utile d'évaluer la durabilité "potentielle" sur la base d'une cotation globale. La pondération de chaque indicateur dépendra alors de son influence sur les propriétés relatives à la durabilité et les processus de dégradation considérés.

4. SPECIFICATIONS PERFORMANTIELLES RELATIVES A LA DURABILITÉ : QUALIFICATION DE FORMULES DE BETON POUR UN OUVRAGE DONNÉ

Depuis plusieurs années déjà se manifeste le besoin d'inclure des spécifications performantielles scientifiquement fondées, relativement à la durabilité du béton armé, dans les documents normatifs, les règlements de conception, ainsi que dans les cahiers des charges des projets d'ouvrage. Afin d'aider les concepteurs, les maîtres d'ouvrage, ..., pour la rédaction de ces textes, des spécifications performantielles ont été proposées [1,2], fondées sur les ID généraux et les classes précédemment

définis. Ces spécifications ont été élaborées sur la base de données expérimentales obtenues sur une large gamme de bétons allant des B20 aux B(T)HP, et ont été vérifiées par des simulations numériques impliquant plusieurs types de modèles. Les différents types d'environnement pris en compte ont été définis à partir des classes d'exposition figurant dans la norme européenne EN 206-1 relative au béton.

Pour chaque durée de vie (niveau d'exigence) et pour chaque type d'environnement considérés, un ensemble d'indicateurs doit être quantifié et différents critères de conformité doivent être vérifiés (se reporter par exemple au Tableau 1 relatif aux environnements contenant des chlorures). Comme illustré dans le Tableau 1, dans le cas de structures en environnement modérément agressif, avec un faible niveau d'exigence, les spécifications relatives à la durabilité se réduisent à la vérification d'une simple valeur de porosité accessible à l'eau, paramètre quantifiable à partir d'un essai très facile à réaliser (mode opératoire AFPC-AFREM [4]). Ceci est particulièrement intéressant du point de vue économique. Par ailleurs, ceci montre que cette nouvelle approche de la durabilité est utile, non seulement dans le cadre de grands projets, mais également pour des bâtiments classiques et des ponts-types.

Tableau 1. Exemple de spécifications proposées pour la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures induite par les chlorures, en fonction du type d'environnement et de la durée de vie exigée, et dans le cas où l'enrobage est égal à 50 mm. Les valeurs indiquées correspondent à des éprouvettes conservées dans l'eau pendant 3 mois au plus après le coulage

Type d'environnement → Durée de vie exigée / Catégorie d'ouvrage / Niveau d'exigence ↓	5 Exposition aux sels marins ou de déverglaçage		6 Immersion dans l'eau contenant des chlorures	7 Zone de marnage
	5.1 [Cl ⁻] faible	5.2 [Cl ⁻] forte		
< 30 ans Niveau 1	•P _{eau} < 16	•P _{eau} < 14	•P _{eau} < 15	•P _{eau} < 14
de 30 à 50 ans Bâtiment Niveau 2	•P _{eau} < 15	•P _{eau} < 11	•P _{eau} < 13	•P _{eau} < 11
de 50 à 100 ans Bâtiment et Ouvrages de génie civil Niveau 3	•P _{eau} < 14	•P _{eau} < 11 •D _{app(mig)} < 2 •K _{liq} < 0,1	•P _{eau} < 13 •D _{app(mig)} < 7	•P _{eau} < 11 •D _{app(mig)} < 3 •K _{liq} < 0,1
de 100 à 120 ans Grands ouvrages Niveau 4	•P _{eau} < 12 •D _{app(mig)} < 20 •K _{liq} < 0,1	•P _{eau} < 9 •D _{app(mig)} < 1 •K _{app(gaz)} < 30 •K _{liq} < 0,01	•P _{eau} < 12 •D _{app(mig)} < 5	•P _{eau} < 10 •D _{app(mig)} < 2 •K _{app(gaz)} < 100 •K _{liq} < 0,05
> 120 ans Ouvrages dits exceptionnels Niveau 5	•P _{eau} < 9 •D _{app(mig)} < 10 •K _{app(gaz)} < 30 •K _{liq} < 0,01	•P _{eau} < 9 •D _{app(mig)} < 1 •K _{app(gaz)} < 30 •K _{liq} < 0,01	•P _{eau} < 9 •D _{app(mig)} < 1	•P _{eau} < 9 •D _{app(mig)} < 1 •K _{app(gaz)} < 30 •K _{liq} < 0,01

P_{eau} : porosité accessible à l'eau (en %)

D_{app(mig)} : coefficient de diffusion apparent des chlorures mesuré par essai de migration (en 10⁻¹² m².s⁻¹)

K_{app(gaz)} : perméabilité apparente aux gaz mesurée avec un perméamètre à charge constante à P_{entrée} = 0,2 MPa et après étuvage à T = 105 °C (s = 0) (en 10⁻¹⁸ m²)

K_{liq} : perméabilité à l'eau liquide (à P_{max}, par mesure directe du flux, après saturation) (en 10⁻¹⁸ m²)

Quand le niveau d'exigence et l'agressivité du milieu environnant augmentent, le nombre d'ID à contrôler croît également (jusqu'à quatre), et les critères (valeurs-seuil) deviennent plus sévères (cf. Tableau 1). Par exemple, dans le cas de

l'immersion en eau de mer, les spécifications concernent la porosité et le coefficient de diffusion des chlorures, alors que dans le cas de l'exposition aux sels ou en zone de marnage, la perméabilité est également considérée dans le cas d'un niveau d'exigence élevé (cf. Tableau 1).

Dans la pratique, les spécifications proposées [1,2] peuvent être adaptées ou complétées pour tenir compte des spécificités du projet, de différents enrobages des armatures, de critères économiques, Elles sont également susceptibles d'évoluer dans l'avenir, en fonction du retour d'expérience, de l'évolution des techniques/modèles, des progrès technologiques, etc.

5. PRÉDICTION DE LA DURÉE DE VIE ET SUIVI DES STRUCTURES EN BETON ARME

Avec l'objectif de prédire la durée de vie (limitée dans le cadre de l'approche proposée à la *période d'incubation*) des structures en béton armé, un panel de modèles prédictifs a été sélectionné pour chaque processus de dégradation envisageable (corrosion des armatures induite par les chlorures ou par la carbonatation [2,3] et alcali-réaction [2]). Chaque modèle, dans lequel les ID sont introduits en temps que données d'entrée, a un niveau de sophistication différent et est donc destiné à résoudre un problème différent.

Les modèles les plus sophistiqués sont basés sur des mécanismes physico-chimiques bien identifiés. Ils incluent notamment le transport de l'humidité et prennent en compte les modifications microstructurales induites par les processus de dégradation. Des modèles plus simples pour l'ingénieur sont également proposés dans ce panel.

Cette approche prédictive multi-niveaux peut être appliquée, d'une part en phase de conception des ouvrages, phase capitale car c'est à ce stade que l'on peut agir au maximum sur le niveau de durabilité, et d'autre part pendant le suivi de structures existantes (dégradées ou non).

6. REMARQUES FINALES

Cette nouvelle approche offre à l'ingénieur et au concepteur une "*boîte à outils*", c'est-à-dire une méthodologie complète, pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité des ouvrages en béton armé. Elle leur offre en particulier une plus grande liberté et permet de tirer profit de tous les avantages techniques et économiques des nouveaux concepts de formulation (par exemple bétons environnementaux) et des matériaux à la pointe de la technologie (BTHP et BFUHP) à partir desquels une durée de vie prolongée peut être escomptée pour les structures, comme le confirment les données obtenues *in situ* déjà disponibles [5,6].

En outre, ce type d'approche sert à l'heure actuelle de référence pour la révision des textes français et européens (méthodes d'essai, normes relatives au ciment et au béton, règlements de conception, ...).

7. REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier les membres du groupe de travail de l'Association Française de Génie Civil (AFGC) : "*Conception des bétons en vue d'une durée de vie donnée des ouvrages - Indicateurs de durabilité*", et tous ceux qui ont contribué au développement de cette approche.

L'auteur remercie également l'AFGC pour fournir l'opportunité de telles instances.

8. REFERENCES

- [1] Baroghel-Bouny, V., Evaluation and prediction of reinforced concrete durability by means of durability indicators. Part I: New performance-based approach, in *Proceedings of Int. RILEM-JCI Seminar on Concrete durability and service life planning "ConcreteLife'06"*, march 14-16, 2006, Ein-Bokek, Dead Sea, Israel (Ed. by K. Kovler, RILEM Publications, Bagneux, 2006), PRO 46, pp 259-269.
- [2] Baroghel-Bouny, V. et al., Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages - Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction - Etat de l'art et guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité, Documents scientifiques et techniques de l'Association Française de Génie Civil (AFGC, Bagneux, juillet 2004), 252 p.
- [3] Baroghel-Bouny, V., Nguyen, T.Q., Thiery, M., Dangla, P., Belin, P., Evaluation and prediction of reinforced concrete durability by means of durability indicators. Part II: Multi-level predictive modelling, in *Proceedings of Int. RILEM-JCI Seminar on Concrete durability and service life planning "ConcreteLife'06"*, march 14-16, 2006, Ein-Bokek, Dead Sea, Israel (Ed. by K. Kovler, RILEM Publications, Bagneux, 2006), PRO 46, pp 270-280.
- [4] Modes opératoires recommandés par l'AFPC-AFREM, Compte rendu des Journées Techniques AFPC-AFREM "Durabilité des bétons", 11-12 déc. 1997, Toulouse, France (LMDC, Toulouse, 1998), 283 p.
- [5] Baroghel-Bouny, V., Gawsewitch, J., Belin, P., Ounoughi, K., Arnaud, S., Olivier, G., Bissonnette B., Vieillissement des bétons en milieu naturel : une expérimentation pour le XXI^e siècle. IV - Résultats issus des prélèvements effectués sur les corps d'épreuve de différents sites aux premières échéances de mesure, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 249, mars-avril 2004, pp 49-100.
- [6] Baroghel-Bouny, V., Les spécificités des bétons à hautes performances - Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité évaluées en conditions de laboratoire ou en conditions naturelles, Etudes et Recherches des LPC, Série Ouvrages d'art, OA 44 (LCPC, Paris, sept. 2004), 76 p.