
Approche performantielle probabilisée pour la durabilité des bétons d'ouvrages en environnement marin

Fabrice Deby — Myriam Carcasses — Alain Sellier

Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions
INSA/Université Paul Sabatier
135, avenue de Rangueil, F-31077 Toulouse cedex 4
{fabrice.deby, myriam.carcasses, alain.sellier}@insa-toulouse.fr

RÉSUMÉ. L'approche performantielle de la durabilité est utilisée pour l'étude d'un béton en immersion dans l'eau de mer. Les indicateurs de durabilité généraux et complémentaires retenus sont exposés. Pour prendre en compte la variabilité naturelle de ces paramètres, une approche probabiliste est proposée. A partir de la formulation du béton et de la composition chimique du ciment, les indicateurs de durabilité sont évalués ainsi que les incertitudes associées. Le risque d'amorçage de la corrosion des armatures par pénétration des chlorures est alors estimé par l'indice de fiabilité de Lind-Hasofer. L'application de cette méthodologie complète a permis de rendre opérationnelle l'approche performantielle.

ABSTRACT. The performance-type approach of durability is used for the study of an immersed concrete in sea water. The general and complementary durability indicators are exposed. To take into account the variability of those parameters, a probabilistic approach is proposed. Based on the concrete formulation and the chemical cement composition, the durability indicators are evaluated with the associated incertitude. The corrosion risk is estimated through the Lind-Hasofer reliability index. The application of this complete methodology has succeeded in validated the performance-type approach.

MOTS-CLÉS : corrosion, approche performantielle, chlorures, fiabilité.

KEYWORDS: corrosion, performance-type approach, chlorides, reliability.

1. Introduction

La corrosion constitue la principale cause de dégradation des ouvrages de génie civil en béton armé notamment en environnement marin où la pénétration des chlorures peut engendrer des désordres importants. Depuis plusieurs années, la notion de durabilité s'est imposée, au delà de la simple considération mécanique jusqu'alors retenue. La réglementation actuelle (norme EN 206) est prescriptive quant à la composition des bétons. Il devient indispensable de spécifier des critères en matière de durabilité.

La meilleure connaissance des phénomènes de dégradation permet d'envisager la mise en place d'une méthodologie de dimensionnement des ouvrages pour la durabilité. L'une des tendances actuelles tend vers une approche performantielle, fondée sur la notion d'indicateurs de durabilité (AFGC, 2004). La démarche est donc de proposer une formulation de béton adaptée au travers du choix des indicateurs de durabilité et de leurs spécifications relatives.

On note également que le béton est un matériau hétérogène, conséquence de la variabilité de fabrication sur chantier, des matériaux qui le constituent et des méthodes de mesure. Ainsi, on constate une fluctuation des indicateurs retenus. Comment alors prendre en compte ces dispersions dans l'approche performantielle pour une prédiction de la durabilité et s'assurer d'un dimensionnement objectif ?

Le but de cette étude est d'exposer la méthodologie probabiliste de l'approche performantielle sur l'exemple d'un béton immergé dans l'eau de mer. Nous définirons les indicateurs de durabilité, considérés comme des variables aléatoires, en quantifiant leur variabilité et nous estimerons alors la probabilité de dépassement des armatures pour s'assurer de la durabilité potentielle du béton.

2. La démarche performantielle probabilisée

Les différentes étapes de cette démarche globale sont construites autour des *indicateurs de durabilité*. La sélection des indicateurs et la spécification de critères d'acceptation, en fonction du type d'environnement et de la durée de vie spécifiée, constituent deux points majeurs de la méthodologie. Les indicateurs de durabilité sont les paramètres essentiels dans l'évaluation et la prédiction de la durabilité du matériau et de la structure par rapport au processus de dégradation considéré. Ils doivent être quantifiables à partir d'essais en laboratoire, et significatifs (reproductibilité de l'essai, mode opératoire, estimation de la variance du résultat...).

Les indicateurs de durabilité *généraux* sont des indicateurs valables pour les différentes dégradations envisagées. Ils constituent le minimum requis pour appréhender la durabilité du matériau d'une façon globale. On peut citer la porosité accessible à l'eau, le coefficient de diffusion des chlorures, la perméabilité aux gaz et aux liquides... La détermination d'indicateurs *complémentaires* aux paramètres précédemment définis peut être envisagée lorsqu'ils servent par exemple comme données d'entrée dans un modèle prédictif (isotherme d'interaction chlorures-matrice par exemple).

La durée de vie relative à la corrosion du béton peut être définie comme le temps mis pour atteindre la dépassement des armatures. En environnement marin, ce sera le temps pour que la concentration en chlorures atteigne une concentration critique au niveau du premier lit d'armatures. On peut retenir comme critère d'amorçage une concentration critique en chlorures totaux égale à 0.4% par rapport à la masse de ciment (AFGC, 2004).

Les modèles prédictifs ont un rôle majeur puisqu'ils assurent le lien entre les indicateurs (les données d'entrée du modèle) et les témoins de durée de vie (les données de sortie). De nombreuses procédures de dimensionnement sont fondées sur des concepts déterministes. Cependant, si l'on ne considère pas les écarts types mesurés sur les indicateurs de durabilité, et que l'on procède au calcul avec uniquement les valeurs moyennes, on risque de sous-estimer la pénétration des chlorures et sous-dimensionner la structure. Il convient alors d'avoir recours aux approches probabilistes, seul moyen rationnel de tenir compte des incertitudes.

Le résultat recherché est la probabilité de dépassivation du premier lit d'armatures en fonction de l'âge de la structure. Le calcul passe par la définition d'une fonction de performance E . Ainsi, si l'on suppose que R représente la résistance de la structure et S la sollicitation appliquée, il vient :

$$E(\vec{X}) = R(\vec{X}) - S(\vec{X}) \quad [1]$$

En fonction des réalisations des variables aléatoires (représentées par le vecteur X), l'état d'une structure peut appartenir à deux domaines : un *domaine de défaillance* ($E(X) \leq 0$) ou un *domaine de sûreté* ($E(X) > 0$). La frontière d'équation $E(X) = 0$ est appelée *surface d'état limite* ou de *défaillance* (Figure 1).

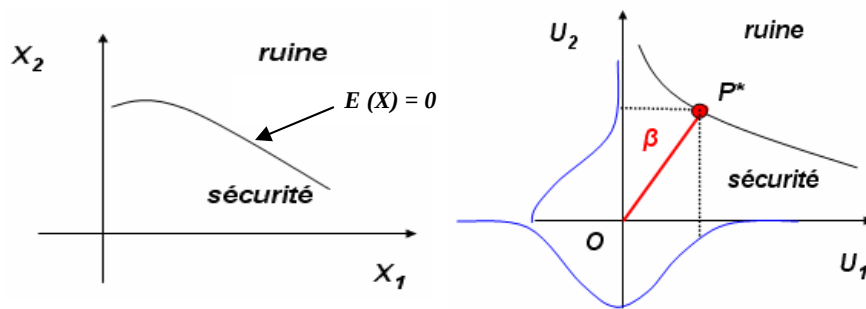


Figure 1 et 2. Définition de la surface d'état limite et de l'indice de fiabilité

La fiabilité P_r et la probabilité de défaillance P_f sont alors définies respectivement par :

$$P_r = \text{prob}[E(\vec{X}) > 0] \text{ et } P_f = \text{prob}[E(\vec{X}) \leq 0] = 1 - P_r \quad [2]$$

L'ensemble des approches traitant de la fiabilité d'une structure est classé en cinq niveaux d'analyse.

Niveau 0 : Ce sont les approches purement déterministes où la sécurité est caractérisée par un facteur global de sécurité.

Niveau 1 : Ce sont les approches de type semi-probabilistes qui consistent à appliquer des facteurs partiels de sécurité et à définir des valeurs caractéristiques aux différentes grandeurs. Elles peuvent néanmoins aboutir à un surdimensionnement.

Niveau 2 : Dans cette approche, la probabilité de défaillance est estimée par un indice de fiabilité ; l'indice d'Hasofer-Lind est généralement utilisé. Celui-ci est défini dans l'espace des variables aléatoires standardisées¹ (représentées par le vecteur U) comme la distance la plus courte entre la surface d'état limite et l'origine du repère, soit $\beta = \|OP^*\|$ (Figure 2). P^* est donc le point où la défaillance est la plus probable. Dans ces conditions, les valeurs médianes des lois de distribution étant centrées sur l'origine du repère, plus β est petit, plus la probabilité de défaillance est importante. Au contraire, si l'indice β est grand, les valeurs correspondantes au point P^* se situent loin des médianes des lois de distribution : la probabilité de défaillance est alors faible (Figure 2).

Niveau 3 : La probabilité de défaillance est évaluée directement en calculant une intégrale multiple sur le domaine de défaillance. Les méthodes de Monte-Carlo sont généralement utilisées.

Dans l'approche performantielle globale et prédictive, les méthodes de niveau 2 peuvent être retenues pour deux raisons principales :

- Certains documents normatifs comme l'Eurocode 0 préconisent cette méthode et des indices de fiabilité β cibles sont proposés. Ainsi les approches probabilistes s'inscrivent dans les contextes de référence avec un langage commun aux instances de normalisation.
- Le calcul de l'indice β par des moyens numériques est plus rapide que le calcul direct de la probabilité de défaillance par les méthodes de niveau 3. Les temps de calcul se trouvent ainsi diminués.

3. Illustration de la démarche

La méthodologie exposée précédemment revêt un caractère général. Nous allons l'appliquer ici pour une partie d'un **ouvrage situé en immersion dans l'eau de mer**.

3.1. Composition du béton

Le béton utilisé pour cette étude est un béton haute-performance de rapport $E/C=0.4$ et dont la composition est donnée dans le tableau 1. Le ciment utilisé pour

¹ Normales centrées et réduites par une transformation probabiliste (par exemple la transformation de Nataf)

la composition du béton est un CEM I. Son analyse chimique est fournie dans le tableau 2.

Constituants	Dosage (kg/m ³)	Composition chimique [%]	
Gravier	1152	SiO ₂	20,3
Sable	760	Al ₂ O ₃	5,26
Ciment	425	Fe ₂ O ₃	2,24
Eau	145	CaO	63,71
Superplastifiant	6	MgO	1,12
		SO ₃	3,49
		K ₂ O	1,1
		Na ₂ O	0,08
		perte feu	2,2

Tableau 1 et 2. Formulation du BHP et caractéristiques chimiques du ciment

3.2. Les indicateurs de durabilité

Les deux indicateurs généraux de durabilité retenus pour l'exposition à l'eau de mer sont la porosité accessible à l'eau et le coefficient de diffusion des chlorures. L'isotherme de fixation chlorures-matrice et la concentration en chlorures à la surface exposée sont deux indicateurs complémentaires nécessaires.

La porosité accessible à l'eau p est déterminée suivant le mode opératoire recommandé par l'AFPC-AFREM (AFPC, 1997). La porosité mesurée est de 9.5 % et elle suit une loi lognormale avec un écart-type de 0.4%. La concentration en chlorures à la surface exposée est de 480 mol/m³. Elle correspond à la salinité moyenne des océans de 35g/l, dont 27g/l de NaCl. Nous considérons une valeur déterministe puisque la salinité peut varier localement (proximité d'un estuaire...) mais reste quasi-constante pour une position géographique donnée.

Dans notre démarche, et pour une simplicité d'application, seules la composition du béton, les caractéristiques chimiques du ciment et la mesure de la porosité sont nécessaires. Deux modèles permettent de calculer le coefficient de diffusion et l'isotherme de fixation. Le coefficient de diffusion effectif D_e est calculé à partir de la porosité de la pâte de ciment selon la relation de Tognazzi (Tognazzi, 1998) et du pourcentage volumique de pâte. Les chlorures fixés C_B sont calculés à partir des quantités de CSH, de monosulfoaluminates et des chlorures libres selon la relation de Hirao (Hirao *et al.*, 2005). Ainsi on a :

$$D_{e\text{ expérimental}} = Err_D \times D_{e\text{ calculé}} \text{ et } C_{B\text{ expérimental}} = Err_C \times C_{B\text{ calculé}} \quad [3]$$

Pour quantifier la variabilité de ces deux indicateurs de durabilité, une synthèse bibliographique d'une quarantaine de points expérimentaux a permis de mesurer

l'erreur des modèles et d'en proposer une loi de distribution. Err_D et Err_C suivent des lois lognormales respectivement de moyenne 1.02 et 1.01 et d'écart type 0.42 et 0.22. L'écart type sur le coefficient de diffusion peut paraître important mais il reflète la diversité des essais existants pour la mesure de ce coefficient. Plusieurs autres études statistiques ont montrés que les coefficients de diffusion peuvent avoir un coefficient de variation allant jusqu'à 50% (Kikpatrick *et al.*, 2002), (Cramer *et al.*, 2002).

Enfin, l'enrobage est lui aussi un paramètre aléatoire. Nous considérons comme moyenne la valeur préconisée sur chantier, à savoir 5 cm. La loi de distribution est lognormale et le coefficient de variation de 20% (Casciati *et al.*, 1991), ce qui peut paraître élevé mais traduit une qualité courante d'exécution des ouvrages.

En résumé, nous avons quatre paramètres aléatoires pour notre étude : la porosité, le coefficient de diffusion effectif, l'isotherme d'interaction chlorures-matrice, et l'enrobage du béton. Les valeurs moyennes et les écarts types des lois de distribution associées sont rappelés dans le tableau 3.

Variable	Distribution	Moyenne	Ecat-type
Porosité p	Lognormale	9,50%	0,38%
Erreur sur le coefficient de diffusion effectif des Cl ⁻ Err_D	Lognormale	1,02	0,42
Erreur sur l'isotherme de fixation Err_{Cb}	Lognormale	1,01	0,22
Enrobage e	Lognormale	5 cm	1 cm

Tableau 3. Distribution des variables aléatoires

3.3. Prédiction de la durabilité

Le béton étant immergé dans l'eau de mer, nous pouvons travailler sur un modèle de diffusion des chlorures dans le béton en milieu saturé. La pénétration des chlorures peut donc être modélisée par la loi de Fick. La loi de conservation nous conduit alors à résoudre l'équation suivante :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_{app} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \text{où} \quad D_{app} = \frac{D_e}{p + (1-p)\rho_s \frac{\partial C_b}{\partial c}} \quad [4]$$

Dans l'équation [4], D_e représente le coefficient de diffusion effectif (m^2/s), c la concentration en chlorures libres (mol/m^3 de solution), C_b la quantité de chlorures fixés (mol/kg de solide), p la porosité, et ρ_s la masse volumique spécifique du matériau poreux (kg/m^3). La probabilité de dépassement d'une armature à une date donnée est égale à la probabilité pour que la concentration en chlorures dans le béton

au niveau de l'armature soit supérieure à la concentration critique en chlorures (0.4% de la masse de ciment). La fonction de performance E est donc la suivante :

$$E(p, Err_D, Err_{Cb}, e) = C_{critique} - C_{CI^- \text{ enrobage}}(p, Err_D, Err_{Cb}, e) \quad [5]$$

La concentration en chlorures à l'enrobage est calculée avec le modèle numérique précédemment décrit. L'indice de fiabilité β est déterminé par la méthode du gradient projeté avec contrôle d'erreur pour lequel le point de défaillance P^* le plus probable est obtenu par itération successive (Rackwitz *et al.*, 1979). La variation dans le temps de l'indice de fiabilité est représentée sur la Figure 3 par la courbe C1. La diminution de l'indice de fiabilité illustre l'augmentation de la probabilité de défaillance du matériau au cours du temps. On passe d'un indice β de 7.67 au bout d'un an d'exposition à 0.97 au bout de 50 ans d'exposition. Les Eurocodes préconisent une valeur seuil de 1,5 pour les ELS à 50 ans. L'indice de fiabilité calculé est donc légèrement inférieur à la cette valeur limite.

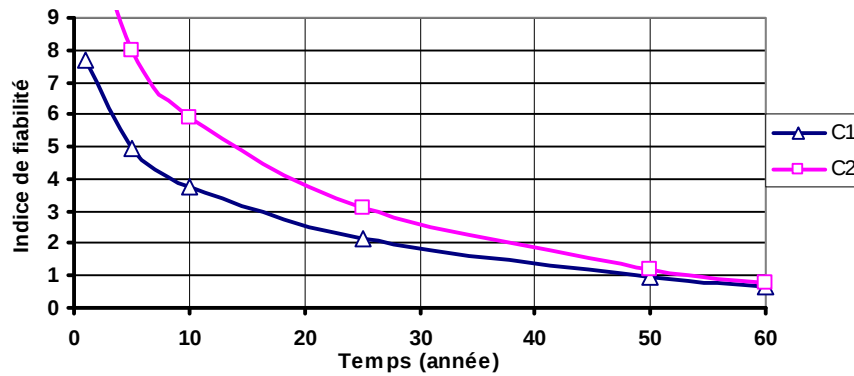


Figure 3. Variation de l'indice de fiabilité en fonction du temps

Une bonne qualité d'exécution sur le chantier peut permettre de réduire les écarts types pour améliorer d'autant la fiabilité. La courbe C2 sur la Figure 3 illustre l'évolution de l'indice de fiabilité pour une réduction de moitié des coefficients de variation sur le coefficient de diffusion et l'enrobage. On constate l'effet bénéfique d'une meilleure qualité d'exécution, significatif jusqu'à 40 ans. Au-delà de cette date, les valeurs des paramètres physiques sont trop proches des valeurs médianes des distributions pour que l'écart type soit influent. Il faut alors envisager une meilleure formulation du béton ou l'augmentation de l'enrobage pour satisfaire aux critères de fiabilité. Ainsi, l'approche probabiliste permet de fixer des objectifs qualitatifs en terme de qualité de réalisation des ouvrages (limitation des écarts types), d'amélioration de la formulation ou encore optimisation ou augmentation des enrobages. Elle constitue de ce fait un outil indispensable pour rendre opérationnelle l'approche performantielle.

5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce travail la méthodologie de la démarche performantielle globale et prédictive de la durabilité des bétons et une application en immersion dans l'eau de mer. La notion d'indicateur probabilisé de durabilité est fondamentale puisqu'elle permet de qualifier les formulations de bétons et de mener les prédictions nécessaires. La durée de vie de l'ouvrage est ainsi quantifiée objectivement au travers de l'indice de fiabilité β en prenant en compte toutes les incertitudes liées à la mise en œuvre, au matériau lui-même ou encore aux mesures. Le recours à des modèles et à un recueil de données bibliographiques permet d'appliquer la démarche en limitant le nombre d'essais. On retiendra alors le caractère général et transposable de cette méthodologie performantielle probabilisée. Elle offre aux ingénieurs des outils d'aide à la décision en matière de durabilité en prenant en compte les caractères aléatoires des phénomènes.

5. Bibliographie

- AFGC, « Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages », *Documents scientifiques et techniques*, 2004.
- AFPC, « Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité », *Compte-rendu des journées techniques*, 1997.
- Casciati F., Negri L., Rackwitz R., « Geometrical variability in structural members concrete and systems », *Working document*, Joint Committee on Structural Safety, 1991.
- Cramer S.D., Covino B.S., Bullard S.J., « Corrosion prevention and remediation strategies for reinforced concrete coastal bridges », *Cement and Concrete Composites*, Vol.24, No.1, 2002.
- Hirao H., Yamada K., Takahashi H., Zibara H., « Chloride binding of cement estimated by binding isotherms of hydrates », *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol.3, n° 1, 2005, p. 77-84.
- Kirkpatrick T., Weyers R.E., Anderson-Cook C.M., Sprinkel M.M., « Probabilistic model for the chloride-induced corrosion service life of bridge decks », *Cement and concrete Research*, Vol.32, 2002.
- Rackwitz R., Fiessler B., « Structural reliability under combined random load sequences », *Computers and Structures*, Vol.9, 1979.
- Tognazzi C., « Couplages fissuration dégradation chimique dans les matériaux cimentaires : caractérisation et modélisation », Thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 1998.