
Qualification de la Durabilité d'un Béton soumis à la Carbonatation avec un Plan d'essais accélérés Optimisé

Matoiri Chaibati Nadare¹, David Bigaud², Abdessamad Kobi³, Horacio Colina⁴

¹ LARIS, Université d'Angers, 49000, France (nadare.matoirichaibati@etud.univ-angers.fr)

² LARIS, Université d'Angers, 49000, France (david.bigaud@univ-angers.fr)

³ LARIS, Université d'Angers, 49000, France (abdessamad.kobi@univ-angers.fr)

⁴ ATILH, 92974 Paris-La-Défense Cedex, France (h.colina@atilh.fr)

RÉSUMÉ. En Europe, c'est la norme EN 206 qui est la référence pour la production du béton. Cependant, avec l'innovation, il devient de plus en plus difficile d'utiliser les seules spécifications prescriptives pour justifier la fabrication du béton. C'est ainsi, qu'une approche alternative basée sur la performance est proposée. Cette approche se concentre sur l'évaluation des indicateurs de durabilité au moyen de tests de performance. Un nouveau béton est ainsi qualifié si sa durabilité est au moins égale à celle du béton qui respecte les spécifications prescriptives de la norme. Les tests de performance représentent un coût économique pour l'industrie du béton qui cherche une solution pour le réduire et en même temps garantir la robustesse du processus de qualification de la nouvelle formule de béton. Une solution consiste à réduire la durée des tests et à contrôler le nombre d'échantillons pour les tests de durabilité. Ainsi, avec un plan d'essais accélérés optimisé, il est possible de caractériser la durabilité du béton en utilisant un processus de dégradation (processus de Wiener). Le plan d'essais optimisé donne le temps optimal et le nombre minimum d'essais permettant de prédire la durabilité du béton.

ABSTRACT. EN 206 is the standard used in Europe to produce concrete. It is prescriptive. Today, innovation gives opportunity to produce new concrete with new formulations which differ from those of the standard. Thus, to complete the standard, an alternative called performance-based approach is proposed. The goal is to show that the durability of the new concrete is at least equal to the concrete defined in the standard with durability tests. These latter represent a cost in term of time and money that concrete industry want to optimize. One solution is to realize an optimized accelerated test plan which allows to reduce the number of samples, tests levels and test duration. The data collected during the test are used on a degradation model (Wiener process) which characterize the degradation phenomenon study in order to predict the durability of the concrete.

MOTS-CLÉS : durabilité, approche performantielle, optimisation, processus de dégradation, essais accélérés, plan d'essai.

KEY WORDS: durability, performantial approach, optimization, degradation process, accelerated tests, test plan.

1. Introduction

Les spécifications prescriptives pour la production du béton en Europe sont définies dans la norme EN 206 [EN 206 14]. Les formulations sont prédéfinies selon 18 classes d'exposition. Chaque classe d'exposition représente un environnement donné. L'approche prescriptive limite les possibilités de produire de nouvelles formules de béton avec d'autres composants qui ne sont pas prévus par la norme (car ne disposant pas de retour d'expérience suffisant). Pour lever ce frein à l'innovation, les professionnels de la construction veulent s'affranchir des prescriptions normatives en adoptant une approche dite performantielle [GOD 14]. C'est une approche basée sur les performances du béton et non sur des exigences de moyens. Son utilisation est autorisée par la norme EN 206. Le principe est de proposer une nouvelle formule de béton en modifiant les prescriptions établies dans la norme. Il s'agit alors de montrer que la nouvelle formule est au moins aussi performante que la formule de référence (celle qui respecte les prescriptions de la norme) à l'aide d'indicateurs de durabilité ou des témoins de durée de vie. Les indicateurs de durabilité [Allahyari, 16] [TOU 17] sont des paramètres physico-chimiques fondamentaux corrélés à la durabilité du béton vis-à-vis de différentes agressions dans un environnement donné. On distingue deux types d'indicateurs :

- les indicateurs de durabilité généraux (exemple : la porosité, perméabilité au gaz, teneur en portlandite) ;
- les indicateurs de durabilité spécifiques à une dégradation donnée (exemple : bilan en alcalins équivalents de la formule de béton pour l'alcali-réaction).

Les témoins de durée de vie pour le cas de la corrosion des armatures sont : la profondeur de carbonatation et la profondeur de pénétration des ions chlorures.

Les essais dites performantiels permettent de caractériser directement la performance du béton vis-à-vis d'une dégradation donnée. Parmi ces essais, on peut citer : l'essai de résistance à la carbonatation du béton, l'essai de la résistance au gel-dégel en présence ou non de sels de déverglaçage, l'essai de résistance à la pénétration des chlorures et la résistance à la pénétration des sulfates externes. Ces essais sont généralement accélérés afin de pouvoir observer rapidement le phénomène de dégradation.

Dans cet article, une méthodologie fondée sur l'exploitation des essais accélérés est appliquée. Le phénomène physico-chimique est modélisé en tant que processus de dégradation en fonction du temps. L'utilisation d'un processus de dégradation couplé à un plan d'essais optimisé permet de prédire la durabilité du béton pour un environnement donné. Après avoir exposé le sujet et la problématique dans l'introduction, la deuxième partie présente l'application d'un processus de dégradation représentant l'évolution du phénomène de carbonatation dans le béton et l'optimisation du plan d'essais accélérés de carbonatation du béton.

2. Processus de dégradation : la carbonatation du béton

Afin d'avoir une idée sur les choix de processus de dégradation permettant de modéliser la carbonatation du béton, on peut se référer aux trajectoires représentant l'évolution de la profondeur de carbonatation de différents bétons en fonction du temps (figure1).

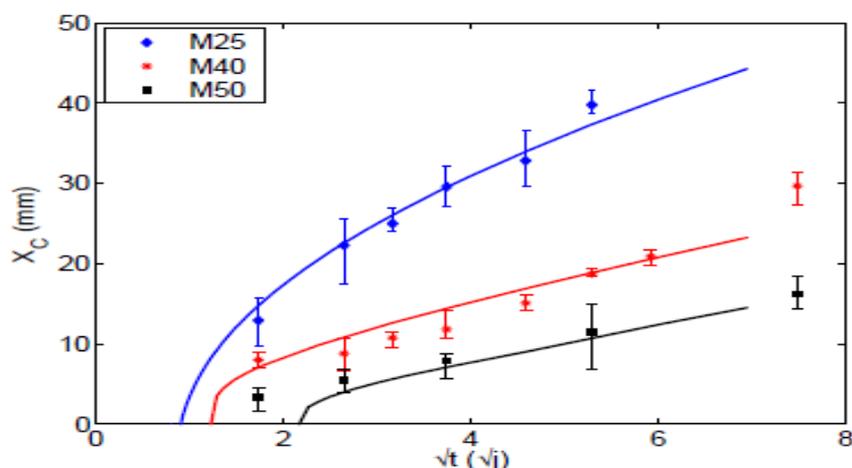


Figure1. Profondeur de carbonatation de 3 bétons en fonction de la racine carrée du temps (M25, M40 and M50) [THI 05]

On remarque à travers la figure1, que les trajectoires sont croissantes. La carbonatation du béton peut être modélisée par le processus de Wiener [CHEN 16] [YE 15]. Le processus de Wiener est un processus à accroissements indépendants avec une tendance croissante [WHI 1995]. Elle décrit des trajectoires de dégradation croissante en moyenne. Le processus de dégradation doit prendre en compte l'effet du niveau de stress et la variabilité de la dégradation. Pour la carbonatation, le niveau de stress est représenté par le taux de concentration de CO_2 . Le processus de carbonatation peut être représenté par [1] :

$$X(t/S_k) = \mu_k \Lambda(t) + \sigma_B B(\Lambda(t)). \quad [1]$$

$X(t/S_k)$ est un processus de Wiener de tendance non linéaire. C'est un processus à accroissements indépendants. Il représente la dégradation, qui est dans notre cas, la profondeur de carbonatation du béton mesurée à l'instant t .

Le paramètre μ_k est appelé drift. Il représente la fonction d'accélération du processus de dégradation et σ_B est le paramètre de diffusion ou volatilité. $\Lambda(t)$ est une transformation d'échelle du temps. Pour le processus de carbonatation du béton, $\Lambda(t)=t^{0.5}$. $B(t)$ est le mouvement Brownien standard avec les propriétés suivantes:

- $B(0) = 0$ avec $B(t) \in (-\infty, +\infty)$;
- Les accroissements $B(t + \Delta t) - B(t) \sim N(0, \Delta t)$, sont stationnaires et indépendants
- $B(t) \sim N(0, t)$.

Le processus de Wiener $X(t/S_k)$ est composé par une tendance linéaire qui est représentée par $\mu_k \Lambda(t)$ et une partie variable par $\sigma_B B(\Lambda(t))$. Le paramètre μ_k reflète l'effet du niveau de stress S_k . S_0 représente le stress sous les conditions normales de l'environnement. Parmi les fonctions d'accélération les plus utilisées, on trouve :

- la fonction d'Arrhenius, utilisée lorsque le stress est une température :

$$\mu_k = a \exp\left(-\frac{b}{S_k}\right), \quad [2]$$

- la fonction puissance inverse utilisée dans le cas des roulements à billes :

$$\mu_k = a S_k^{-b}, \quad [3]$$

- la fonction exponentielle utilisée dans le cas général pour différents types de stress :

$$\mu_k = a \exp(b S_k). \quad [4]$$

Le stress utilisé dans le cas de la carbonatation (la concentration de CO_2) ne correspond pas aux situations évoquées au niveau des équations [2] et [3]. On choisit donc d'utiliser la fonction exponentielle [4] avec $a \sim N(\mu_a, \sigma_a^2)$. Les paramètres μ_a, σ_a et b sont inconnus et doivent être estimés à partir des données obtenues lors des essais. La durabilité du béton est définie comme étant le premier temps de défaillance. On définit une valeur critique w qui représente l'enrobage du béton. Le temps de défaillance étant le premier instant où la profondeur de carbonatation atteint l'enrobage pour la première fois, on définit la durabilité D du béton sous S_0 par l'équation [5] :

$$D = \inf\{t / X(t/S_0) \geq w\}. \quad [5]$$

La durabilité D sous le stress S_k suit une distribution Inverse Gaussienne [Chhikara, 89]. La fonction de répartition [6] et la densité de probabilité [7] du processus sont représentées par :

$$F(t/S_k) = P(D \leq t) = \Phi\left(\frac{\mu_k \Lambda(t) - w}{\sigma_B \sqrt{t}}\right) + \exp\left(\frac{2\mu_k w}{\sigma_B^2}\right) \phi\left(\frac{-\mu_k \Lambda(t) - w}{\sigma_B \sqrt{t}}\right), \quad [6]$$

$$f(t/S_k) = \frac{\partial F(t)}{\partial t} = \sqrt{\frac{w^2}{2\pi\sigma_B^2 t^3}} \cdot \exp\left(-\frac{(w - \mu_k t)^2}{2\sigma_B^2 t}\right) \quad t > 0. \quad [7]$$

Ainsi à partir des équations [6] et [7], la durabilité du béton sous S_0 peut-être approximée par :

$$D = E(T) = E(E(T/\mu_0)) = \frac{w}{\mu_a \exp(bS_0)}. \quad [8]$$

2.1. Estimation des paramètres du Modèle

Après avoir défini le processus de Wiener et la fonction d'accélération, il faut estimer les paramètres inconnus ($\mu_a, \sigma_a, b, \sigma_B$). Pour cela, on utilise la méthode du Maximum de vraisemblance (MLE).

Supposons que l'on a N éprouvettes de béton pour l'essai de carbonatation accélérée:

- $S_0 \leq S_1 \leq \dots \leq S_d$ représentent les niveaux de stress (d étant le nombre de stress),
- n_k est le nombre d'éprouvettes pour le niveau de stress S_k , avec $\sum_{k=1}^d n_k = N, 1 \leq k \leq d$
- Pour chaque stress, les temps de mesures sont donnés par $t_1, t_2, \dots, t_m, 1 \leq j \leq m, t_0 = 0$.

Pour $1 \leq i \leq n_k, 1 \leq k \leq d, 1 \leq j \leq m$, l'équation (1) devient :

$$X_{ijk} = X_i(t_j/S_k) = \mu_k \Lambda(t_j) + \sigma_B B(\Lambda(t_j)). \quad [9]$$

La dégradation X_{ijk} suit une distribution normale multivariée de moyenne $\mu_a \exp(bS_k \Lambda)$ et de variance $V_k = \sigma_a^2 \exp(2bS_k \Lambda) \Lambda \Lambda^T + A$; avec $A = \sigma_B^2 E$. E est la matrice des temps de mesures de l'essai accéléré de carbonatation.

L'estimation des paramètres ($\mu_a, \sigma_a, b, \sigma_B$) s'obtient en maximisant la log-vraisemblance de $\theta = (\mu_a, \sigma_a, b, \sigma_B)$:

$$L(\theta/X) = -\frac{\ln(2\pi)}{2} \sum_{k=1}^d \sum_{i=1}^{n_k} m_{ki} - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^d \sum_{i=1}^{n_k} \ln |V_k| - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^d \sum_{i=1}^{n_k} (X_{ik} - \mu_k \Lambda)' V_k^{-1} (X_{ik} - \Lambda). \quad [10]$$

Le maximum de vraisemblance de μ_a est obtenue en égalant à 0 la dérivée de l'équation [10] :

$$\widehat{\mu}_a = \frac{\sum_{k=1}^d \sum_{i=1}^{n_k} \exp(bS_k \Lambda)^T V_k^{-1} X_{ik}}{\sum_{k=1}^d \sum_{i=1}^{n_k} \exp(2bS_k \Lambda)^T V_k^{-1} \Lambda}. \quad [11]$$

Les maximums de vraisemblance de σ_a, b et σ_B ($\widehat{\sigma}_a, \widehat{b}$ and $\widehat{\sigma}_B$) sont obtenus en substituant l'équation [11] dans [10] et en optimisant l'équation [11]. Les valeurs obtenues seront utilisées dans [11] pour calculer $\widehat{\mu}_a$. Une fois tous les paramètres estimés, on obtient l'estimation de la durabilité sous le stress S_0 par l'équation :

$$\widehat{D} = \frac{w}{\widehat{\mu}_a \exp(\widehat{b}S_0)} \quad [12]$$

2.3. Optimisation d'un Plan d'Essais

L'optimisation du plan d'essai passe par la minimisation d'une fonction objectif. Dans notre cas, la fonction objectif peut être définie comme la variance asymptotique de la durabilité \widehat{D} :

$$\text{Avar}(\widehat{D} | P) = G^t I^{-1}(\theta) G, \quad [13]$$

Avec $P = (S_1, \dots, S_d, n_1, \dots, n_d, t_1, \dots, t_m)$, $G^t = (\frac{\partial D}{\partial \mu_a}, 0, \frac{\partial D}{\partial b}, 0)$, $I^{-1}(\theta)$ est l'inverse de la matrice de Fisher.

La minimisation de la variance asymptotique de la durabilité se fait sous les contraintes suivantes :

- Le temps de mesure t_m , ne doit pas dépasser la durée totale de l'essai t_E .
($t_m < t_E$),
- le nombre d'éprouvettes de béton n_k pour un niveau de stress ne doit pas dépasser le nombre total d'éprouvettes N disponible,
- le nombre de stress ne doit pas dépasser un nombre fixé de stress,
- la valeur maximale du stress le plus élevé (la concentration en CO_2) ne doit pas dépasser une valeur fixée,
- le cout total de l'essai (TC_A) ne doit pas dépassé un budget fixé (B_f).

Le plan d'essai optimal, qui permet de prédire la durabilité du béton est obtenu avec la résolution de l'équation suivante:

$$\begin{aligned} & \text{Min (Avar}(\widehat{D} | P) \\ & \text{sous } TC_A(S_1, \dots, S_d, n_1, \dots, n_d, t_1, \dots, t_m) \leq B_f. \end{aligned} \quad [14]$$

Etant donné la complexité de l'équation [14], sa résolution passe par la minimisation numérique d'un algorithme sous les différentes contraintes.

L'optimisation du plan d'essais a pour but de trouver le nombre minimum d'essais à réaliser, le temps minimal et les stress utilisés (nombre de stress et valeur de chaque stress). Pour la carbonatation accélérée, la concentration en CO_2 étant fixée pour certains protocoles d'essais (exemple : 3% pour le protocole européen). Cette valeur sera la valeur maximale du stress à ne pas dépasser.

3. Conclusion

Dans cet article, une méthodologie permettant de prédire la durabilité du béton vis-à-vis de la corrosion des armatures a été exposée. Cette méthodologie est basée sur l'optimisation d'un plan d'essais sous différents contraintes. L'évolution de la profondeur de carbonatation est modélisée par un processus de Wiener. Un premier plan d'essai est utilisé afin d'estimer les paramètres du processus avec la méthode du Maximum de Vraisemblance (MLE). Une fois les paramètres estimés, on peut passer à l'optimisation du plan d'essai sous différents contraintes. Cette méthodologie est généralisable pour les bétons soumis à d'autres environnements (exemple : un environnement avec du gel-dégel ou de l'attaque sulfatique).

4. Bibliographie

- [EN 206 14] EN 206. «Performance, production and conformity », *Concrete-Specification 2014*.
- [GOD 14] Godart B., Aubagnac C., « Approche performantielle de la durabilité des ouvrages d'art en béton », *Revue scientifique et Technique de la construction, 2014, p 3-14*.
- [ALL 16] Allahyari I., Approche performantielle des bétons-Vers une meilleure caractérisation des indicateurs de durabilité, Thèse de Doctorat, Université Toulouse III Paul Sabatier, 2016.
- [TOU 17] Touil B., Etude de la durabilité des Bétons dans un environnement Marin –Approche Performantielle et Prédictive basée sur les Indicateurs de durabilité, Thèse de Doctorat, Université Aboubakr Belkaid-Tlemcen, 2017.
- [THI 05] Thiery., Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires – Prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques, Thèse de Doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées de Paris 2005.
- [CHEN 16] Chen Z., Li S., Pan E., « Optimal Constant-Stress Accelerated Degradation Test Plans Using Nonlinear Generalized Wiener Process », *Journal Mathematical Problems in Engineering 2016*.
- [YE 15] Ye Z., Xie M., « Stochastic Modelling and Analysis of Degradation for Highly Reliable Products », *Journal Applied Stochastic Models in Business and Industry, vol 31, n° 1, p.16-32, 2015*.
- [WHI 1995] WHITMORE GA., «Estimating degradation by a wiener diffusion process subject to measurement error », *Journal of lifetime Data. Analysis, vol 1, p.307-319, 1995*.