

METHODES D'ESTIMATION DE LA DUREE DE VIE DES STRUCTURES EN BETON

Yves F. Houst et F. Alou

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
Laboratoire de matériaux de construction
CH 1015 Lausanne, Suisse

MOTS CLES

Béton, durabilité, modélisation, simulation numérique, carbonatation, diffusion de gaz, gaz carbonique, oxygène.

RESUME

Les ouvrages en béton subissent des sollicitations extrêmement variées. La plupart de ces sollicitations sont relativement bien connues et l'on a souvent pu les modéliser, le plus souvent qualitativement. Les modèles existants peuvent être classés en deux catégories. Il y a ceux avec lesquels on tente d'expliquer les mécanismes en termes de modification de structure et de transitions, on les appelle *modèles de la science des matériaux*. Les autres modèles servent à caractériser les propriétés des matériaux dans le calcul des structures du génie civil. Ce sont les *modèles de la technologie des matériaux*. In situ, il est rare qu'un seul type de sollicitation agisse en même temps sur les structures et les méthodes traditionnelles sont impuissantes pour prévoir la durée de service des constructions nouvelles ou existantes avec la fiabilité souhaitable.

Actuellement, la simulation numérique permet de traiter quantitativement des processus interactifs complexes. Dans cette communication, nous décrivons quelques exemples de modélisation de processus de dégradation de caractère physique et chimique. Nous nous attachons à décrire plus précisément un modèle numérique du processus de carbonatation du béton que nous avons développé. On montre quelques résultats obtenus avec ce modèle pour la prévision de la vitesse de carbonatation pour diverses qualités de béton. On montre également que l'emploi de modèles numériques est fréquemment freiné par les lacunes des connaissances des propriétés des matériaux. On donne comme exemple la mesure des coefficients de diffusion du gaz carbonique et de l'oxygène en fonction de la teneur en eau du matériau et l'influence de la microstructure.

ABSTRACT

Concrete structures are affected by various stresses. Most of these stresses are relatively well known and it has often been possible to model them, essentially in a qualitative way. The existing models can be subdivided into two groups. There are models with which it is tried to explain mechanisms in terms of structural changes and transitions. This type can be called *materials science models*. The other type which serve to characterize materials properties in structural engineering, can be called *materials engineering models*. In situ, generally not only one kind of stress acts at the same time and traditional methods are not suitable to predict the service life of new or existing structures and buildings.

Numerical simulation methods allow us today to treat complex interactive processes in a quantitative way. In this contribution, some examples of modelling of degradation processes are given, taking into consideration physical and chemical causes. A numerical model, which describe the carbonation of concrete and that we have developed, is described in more details. Some results obtained with this model allow us to predict the carbonation of concrete of two qualities. It is also shown that the lack of knowledge of the materials properties often limits the use of numerical models. The diffusion coefficients of carbon dioxide and oxygen as a function of the water content and of the microstructure are given as an example.

1. INTRODUCTION

La durée de vie d'un ouvrage ou d'un élément de construction peut être définie comme la période pendant laquelle toutes les propriétés dépassent un seuil minimum acceptable avec un entretien courant.

Pour procéder à l'estimation de la durée de vie, on utilise soit des modèles purement théoriques pour décrire les interactions matériaux-environnement ou on procède à un "essai de durabilité" du matériau ou de l'élément de construction, puis on transpose ces résultats dans un modèle pour évaluer la durée de vie [1]. Les essais de durabilité sont accélérés ou non.

De très nombreux facteurs agissent sur la durée de vie des éléments de construction et des matériaux. Il est évident que, pour l'estimation de la durée de vie, on ne peut pas tenir compte de tous ces facteurs qui n'ont d'ailleurs pas tous la même importance dans un environnement donné et selon l'usage prévu. Une approche systématique de la méthodologie à utiliser pour la prévision de la durée de vie des matériaux de construction et des composants a été donnée par Master et Brandt [2]. Nous nous limiterons ici à décrire quelques exemples concernant les ouvrages en béton.

2. MODELISATION : PRINCIPES ET LIMITATIONS

Les modèles existants peuvent être divisés en deux groupes [3]. Il y a ceux qui tentent d'expliquer les mécanismes en termes de modifications de structure et de transitions; on les appelle *modèles de la science des matériaux*. Par contre, d'autres modèles servent à caractériser les propriétés des matériaux dans le calcul des structures du génie civil; ce sont les *modèles de la technologie des matériaux*.

Le béton est un matériau composite hétérogène. Si l'on veut décrire son comportement de façon satisfaisante, il faut tenir compte des propriétés des composants individuels. Pour cela, il est utile d'introduire une approche à trois niveaux. Sur le premier niveau, le micro-niveau, on place les propriétés caractéristiques de la pâte de ciment durcie. Sur le second niveau (ou meso-niveau), on représente la structure du matériau composite. La structure réelle est représentée par une structure aléatoire ou par une matrice contenant des inclusions distribuées au hasard. Les résultats des modèles développés sur le meso-niveau servent de base à la formulation des lois des matériaux. Cette formulation se place au macro-niveau. Le caractère hétérogène du béton disparaît à ce niveau. Les modèles peuvent être utilisés directement dans le calcul et l'analyse des structures du génie civil [4].

La modélisation mathématique est une partie essentielle de l'estimation de durée de vie et les modèles peuvent être déterministes ou probabilistes [5]. Ces modèles sont constitués d'un système d'équations qui décrivent les phénomènes physiques et chimiques les plus importants ou leur description statistique, ainsi que d'une base de données qui contient les valeurs numériques des paramètres utilisés et des données climatiques générales, mais si possible aussi du micro-, meso- et macro-climat.

Que l'on utilise la modélisation mathématique ou une méthode plus empirique avec un "essai de durabilité", il est nécessaire de bien connaître les mécanismes de dégradation et les propriétés des matériaux in situ. De nombreuses lacunes subsistent, ce qui limite encore fortement la valeur des prévisions de durée de vie, aussi subtiles que puissent être les développements mathématiques et la résolution des modèles complexes grâce aux ordinateurs les plus puissants.

D'après Regourd [6], les barrières limitant les prévisions de la durée de vie des matériaux de construction inorganiques et des constructions sont les suivantes :

- les mécanismes de dégradation sont inconnus ou trop peu connus
- les essais accélérés ou en temps réel ne sont pas satisfaisants
- les mesures préventives sont insuffisantes

Les mécanismes de dégradation les plus importants sont :

- la corrosion des armatures, liée à la carbonatation et à la diffusion des chlorures dans les structures exposées à l'eau de mer ou aux sels de déverglaçage
- la formation d'ettringite et les expansions liées aux sulfates présents dans les sols et l'eau de mer
- la réaction des granulats contenant de la silice amorphe, des silicates réactifs ou certains calcaires dolomitiques avec les alcalis des ciments
- les effets du gel avec ou sans sel de déverglaçage

Le nombre des recherches effectuées actuellement dans ce domaine est très important, ce qui montre vraisemblablement que de nombreux points demeurent obscurs.

L'emploi de plus en plus répandu de ciments avec constituants secondaires (laitier, cendres volantes, pouzzolanes artificielles ou naturelles, fumée de silice condensée, etc.) complique encore beaucoup la compréhension des mécanismes de dégradation.

Les essais accélérés doivent permettre de reproduire dans un temps relativement court les processus de dégradation qui prennent de nombreuses années dans un environnement naturel. Les réactions chimiques sont accélérées en augmentant la température ou la concentration des agents agressifs. Les résistances mécaniques ou les variations de dimensions sont mesurées sur des échantillons de mortier ou de béton de petites dimensions. Fréquemment, l'échelle du temps qui relie les résultats des essais accélérés aux mesures en environnement réel n'est pas connue et souvent non linéaire. L'augmentation de la température peut modifier les mécanismes de dégradation, ainsi que la morphologie des produits de réaction.

Les essais en temps réel exigent souvent des extrapolations pour des durées d'exposition cent fois ou mille fois plus longues que celles mesurées.

Les mesures préventives, qui dépendent du degré d'agressivité de l'environnement, sont souvent bien connues. Il s'agit d'abord de réaliser des bétons aussi imperméables que possible et, dans certains cas extrêmes, de protéger le béton par un enduit à base de résines synthétiques ou bitumineux. Rappelons toutefois qu'il est non seulement nécessaire de prévoir des mesures préventives, mais encore qu'il faut soigneusement vérifier qu'elles soient appliquées. Il est aussi fréquent que seulement quelques défauts ponctuels mettent en danger une structure entière.

3. QUELQUES EXEMPLES

3.1 Contraintes thermiques

Dans les matériaux à structure multiphasée comme le béton, des déformations différentielles des composants y occasionnent des contraintes lors des variations de température du matériau. Dans le cas où les différences entre les coefficients de dilatation thermique des composants du matériau sont très importantes, les contraintes thermiques résultantes lors d'une variation brutale de la température peuvent considérablement réduire la durabilité de la construction à cause de la multifissuration interne. De nombreuses dégradations de constructions en béton sont constatées dans les régions désertiques à cause des changements brutaux de température et dans les pays froids à cause du gel.

Au moyen d'une structure composite simulée [7], on peut aisément calculer les contraintes thermiques dues au gel dans un béton saturé d'eau. Pour une température voisine de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, la matrice de pâte de ciment durcie, saturée d'eau, a une dilatation thermique très importante. La dilatation relative des granulats peut être négligée. Les résultats des calculs effectués sont montrés sur la figure 1 où l'on a reporté les contraintes de traction dépassant la valeur limite de σ_1 (3 MPa). On remarque sur cette

figure que ces contraintes élevées sont principalement localisées dans les interfaces matrice-granulats. Ces calculs sont en accord avec les résultats observés par voie expérimentale.

3.2 Attaque de la pâte de ciment par des acides

Romben [8] a étudié l'attaque acide de pâtes de ciment durcies. Comme on peut le voir sur la figure 2, il distingue trois périodes où les vitesses d'attaque sont distinctes. Durant la première période qui dure de quelques heures à quelques jours, selon la nature du ciment ou la concentration de l'acide, la vitesse dépend de la surface de l'échantillon. Si la concentration de l'acide et la surface sont constantes, la profondeur d'attaque x est proportionnelle au temps. Dans la deuxième étape, l'attaque est contrôlée par diffusion de l'acide à l'intérieur des couches d'hydroxyde, x varie avec la racine carrée du temps. Après quelques centaines de jours, la vitesse d'attaque augmente brusquement et est alors à nouveau proportionnelle au temps, mais avec une autre constante de proportionnalité. On a montré que cette étape correspondait physiquement à la dissolution des hydroxydes, ce qui met à nouveau en contact le ciment avec la solution.

4. MODELISATION DE LA CORROSION DES ARMATURES DANS LE BETON

4.1 Exposé du problème

Il est bien connu que la solution présente dans les pores du béton est fortement alcaline, avec un pH compris entre 13 et 14. Dans cet environnement, les armatures en acier ne se corrodent pas, on dit que l'acier est passivé. Cependant, il arrive que ces armatures se corrodent. C'est que le béton enrobant les armatures s'est modifié de telle façon qu'elles ne sont plus protégées. Cela peut se produire localement ou à grande échelle. En général, il faut un certain temps pour que la corrosion débute.

L'expérience montre que par exemple les chlorures qui atteignent l'armature peuvent supprimer la protection de l'acier assurée par le milieu basique. La passivation disparaît également lorsque le béton au contact de l'armature est neutralisé par le gaz carbonique de l'air. C'est ce qu'on appelle la carbonatation du béton.

Lorsque la corrosion débute, la vitesse est fixée à la fois par la vitesse des réactions anodiques et cathodiques et du contact entre les deux zones de réaction. La corrosion de l'acier se traduit par une réduction de la section de l'armature, ce qui peut mettre en danger la structure. De plus, les produits de corrosion qui s'accumulent dans la zone de l'anode et qui ont un volume plus grand que celui de l'acier, exercent des contraintes sur le béton de couverture, ce qui peut entraîner la fissuration et l'éclatement du béton superficiel.

Du point de vue de la corrosion des armatures, la durée de vie d'une structure en béton peut être divisée en deux périodes: une période d'initiation et une période de propagation. La durée de la première est déterminée par le temps nécessaire à la neutralisation du béton d'enrobage de l'armature ou à la pénétration de chlorures par exemple et par leur concentration nécessaire au démarrage de la corrosion. La vitesse de corrosion durant la période d'initiation est très faible et ne devient notable que pendant la période de propagation. La vitesse de carbonatation ou de pénétration des chlorures durant la période d'initiation n'est pas constante. La vitesse de corrosion durant la période de propagation, varie même dans un climat constant; elle croît localement à la suite de migration d'ions ou décroît de par la formation d'une barrière à la diffusion créée par les produits de corrosion. De plus, le béton est en général fissuré et n'est pas toujours homogène. Tous les paramètres importants et les phénomènes détaillés sont décrits dans un rapport d'un comité technique RILEM [9].

Dans la section suivante, nous présentons un modèle analytique qui décrit la période d'initiation due uniquement à la carbonatation. On verra que si l'on désire développer un modèle réaliste, de nombreuses difficultés se présentent.

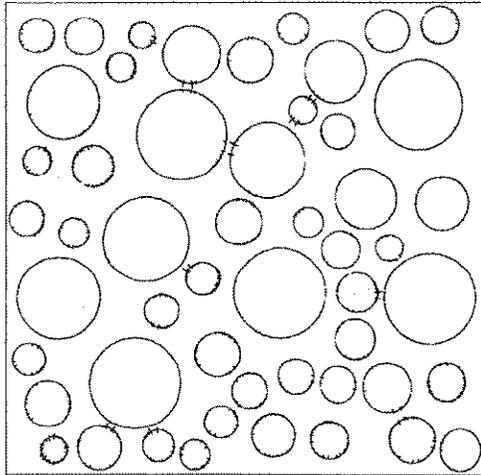


Figure 1 - Répartition des contraintes d'origine thermique dépassant σ_f (= 3 MPa), la valeur limite de la résistance à la traction du béton à l'état saturé et à température de -5°C .

La matrice de pâte de ciment a un coefficient de dilatation thermique important, tandis que celui des granulats peut être négligé. Les contraintes élevées sont concentrées aux interfaces matrice-granulats.

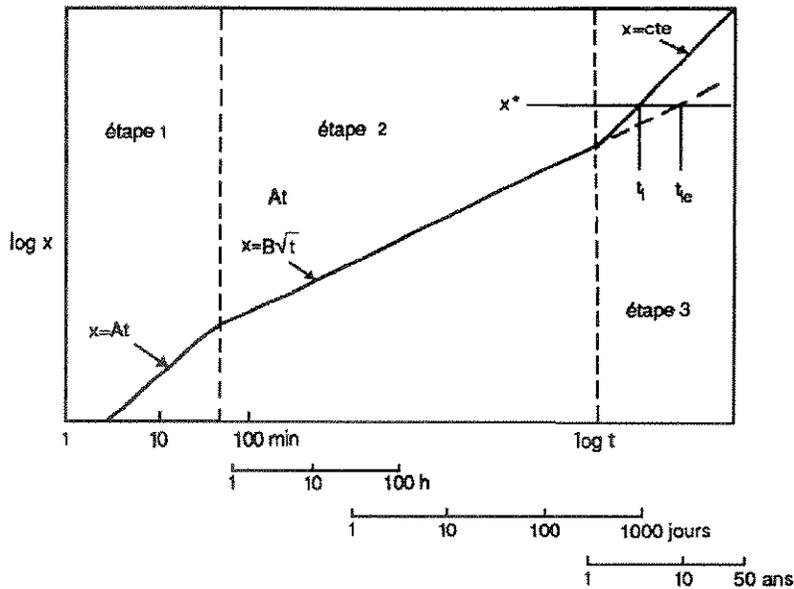


Figure 2 - Les différentes étapes de l'attaque acide du ciment (Romben 1979), profondeur d'attaque x en fonction du temps t .

4.2 Modélisation de la carbonatation du béton

Modèles

La modélisation des problèmes de carbonatation a été étudiée au Laboratoire des Matériaux de Construction de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne selon plusieurs approches. On a montré comment développer une méthode tenant compte des incertitudes inhérentes au phénomène (approche probabiliste) qui permet d'évaluer l'état présent d'une construction et de calculer sa durée de vie probable. Un processus stochastique a été utilisé pour évaluer la distribution de la profondeur de carbonatation dans le temps et une distribution normale pour la couverture des armatures [11].

Brieger et Wittmann [10] ont décrit le processus de carbonatation au moyen d'un système d'équations aux dérivées partielles, qui leur ont permis d'étudier les facteurs les plus importants, ainsi que divers mécanismes. La résolution des équations a été effectuée par voie numérique. Une autre approche a été faite par Brieger et Bonomi [12] qui ont été inspirés de modèles de la dynamique des fluides pour construire un modèle discret en temps et en espace d'automate cellulaire probabiliste.

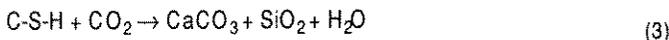
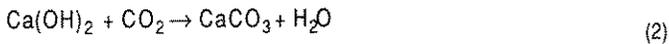
On a d'abord tenté d'étudier la carbonatation au moyen d'un modèle numérique [13]. Tous les paramètres utilisés peuvent être reliés à des propriétés mesurables qui sont définies pour une composition du béton et un environnement donnés. Cet exemple, qui est développé ci-après, nous paraît intéressant, car il permet de montrer le genre de paramètre à déterminer expérimentalement et les difficultés qui limitent l'application pratique d'un tel modèle.

Le béton jeune peut être considéré comme un matériau poreux saturé d'eau. Immédiatement après le démoulage le séchage commence. Il peut être décrit par une équation de diffusion :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D_w \frac{\partial w}{\partial x} \quad (1)$$

Dans cette équation, w représente l'eau évaporable et D_w le coefficient de diffusion de vapeur d'eau qui dépend de la teneur en eau.

Si la surface du béton saturé d'eau est exposée à l'air, la carbonatation se superpose au séchage. C'est à dire que l'hydroxyde de calcium, Ca(OH)_2 , et les produits d'hydratation (surtout le silicate de calcium hydraté C-S-H) réagissent avec le gaz carbonique CO_2 :



Selon les équations (2) et (3) de l'eau est libérée dans le béton par les réactions de carbonatation. Pour tenir compte de cette libération d'eau, il faut modifier l'équation (1) :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D_w \frac{\partial w}{\partial x} + \alpha_1 \frac{\partial c}{\partial t} \quad (4)$$

c représente la quantité de carbonate formé et α_1 est un paramètre du matériau qui tient compte du dosage en ciment et du rapport eau/ciment.

Dans l'étape suivante, il faut décrire la pénétration du dioxyde de carbone g dans le système poreux du béton. En première approximation, on peut à nouveau utiliser l'équation générale de la diffusion:

$$\frac{\partial g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D_g \frac{\partial g}{\partial x} \quad (5)$$

Dans cette équation, D_g est le coefficient de diffusion du CO_2 qui dépend de la teneur en humidité.

La réaction de carbonatation consomme du dioxyde de carbone. En tenant compte de cette perte, on peut écrire l'équation différentielle (6) suivante :

$$\frac{\partial g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D_g \frac{\partial g}{\partial x} - \alpha_2 \frac{\partial c}{\partial t} \quad (6)$$

Dans cette équation α_2 est à nouveau un paramètre du matériau qui dépend essentiellement de la composition du béton.

La vitesse de formation du carbonate dans le béton est donnée par $\partial c/\partial t$. Cette vitesse de formation du carbonate dépend de l'avancement de la carbonatation :

$$f_1(c) = \frac{c_{\max} - c}{c_{\max}} \quad (7)$$

c_{\max} est la quantité maximale de produits à carbonater. La vitesse dépend également de la concentration en CO_2 :

$$f_2(g) = \frac{P(CO_2)}{P_s(CO_2)} \quad (8)$$

Finalement, la teneur en eau du béton w a une importante influence sur sur la vitesse $\partial c/\partial t$:

$$f_3(w) \quad (9)$$

En admettant que l'on puisse combiner ces trois influences majeures sous forme de facteurs, on obtient :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \alpha_3 \cdot f_1(c) \cdot f_2(g) \cdot f_3(w) \quad (10)$$

α_3 est à nouveau un paramètre du matériau qui tient compte de la composition du béton et du degré d'hydratation.

Paramètres

Le modèle décrit a fait apparaître trois paramètres α_1 , α_2 , α_3 . Le premier paramètre α_1 dépend du dosage en ciment et du rapport e/c. On peut l'évaluer à partir des données de la littérature comme par exemple celles de Taplin [14] qui a déterminé la quantité de produits d'hydratation formés en fonction du temps et cela pour divers e/c.

Par contre, α_2 est plus difficile à évaluer. Il dépend essentiellement de la porosité et de la distribution de la taille des pores qui elles-même dépendent de la composition du béton et du temps. Les isothermes de désorption, les mesures de distribution de la taille de pores aident à l'évaluation de ce paramètre.

Le troisième paramètre α_3 ne peut être évalué à partir des données connues en l'état du modèle. Il est estimé à partir des résultats réalistes que l'on peut attendre.

Coefficients de diffusion

Le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau en fonction de l'humidité des pores a été mesuré par de

nombreux chercheurs. Les résultats sont parfois contradictoires, mais on peut utiliser par exemple les relations proposées par Bazant et Najjar [15].

Le coefficient de diffusion du gaz carbonique en fonction de l'humidité et de la porosité n'est, par contre, pas connu. Tuuti [16] l'a évalué à partir de quelques mesures effectuées avec l'oxygène. Cette situation nous a conduit à concevoir un dispositif et à mesurer ces coefficients de diffusion [17]. Comme le coefficient de diffusion de l'oxygène peut être important pour l'étude de la corrosion des armatures du béton et que le dispositif réalisé permettait sans complication particulière d'effectuer des mesures simultanées avec les deux gaz, nous avons fait les mesures avec un mélange de gaz (78 % N_2 , 20 % O_2 , 2 % CO_2). Nous avons mesuré ces coefficients de diffusion sur des pâtes de ciment gâchées avec 3 rapports eau/ciment et préalablement carbonatées. Les résultats sont représentés graphiquement sur la figure 3.

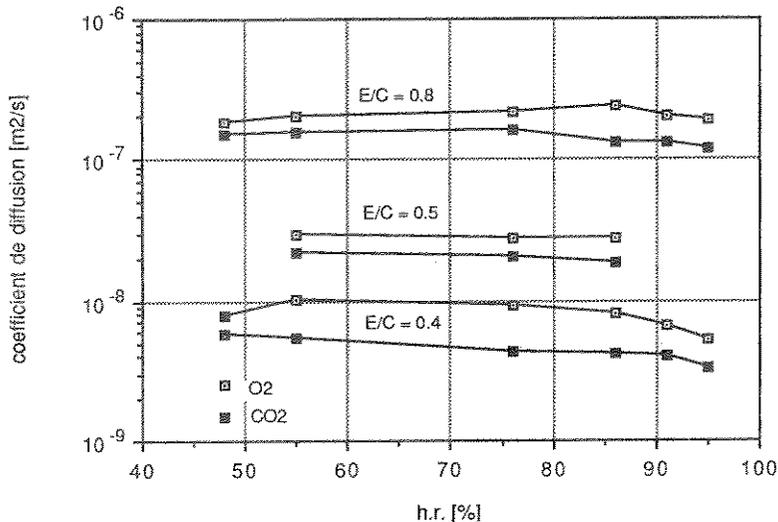


Figure 3 - Influence de l'humidité sur les coefficients de diffusion de l'oxygène et du gaz carbonique. Les mesures ont été effectuées sur 3 pâtes de ciment en équilibre hydrique. Leurs caractéristiques figurent dans une autre publication [18].

On constate que le coefficient de diffusion de l'oxygène est plus élevé que celui du gaz carbonique. Ceci n'est pas étonnant puisque l'oxygène a un diamètre moléculaire plus faible que celui du gaz carbonique (~ 10 %). Les coefficients de diffusion varient fortement avec le rapport eau/ciment, c'est-à-dire avec la porosité. La variation est supérieure d'un facteur 10 lorsqu'on passe d'un rapport e/c de 0.4 à 0.8.

A humidité relative plus élevée que 90 %, on pourrait s'attendre à ce que les coefficients de diffusion diminuent notablement puisque une partie non négligeable des pores est occupée par l'eau condensée. Mais on ne constate en réalité qu'une faible diminution. Ces résultats ne confirment pas la diminution attendue, ni le modèle proposé par Papadakis et al. [19].

Résultats et discussion

Des paramètres tirés de la littérature et des valeurs expérimentales ont été directement introduits dans le modèle analytique décrit ci-dessus. Comme les coefficients de diffusion des équations (4) et (6) sont respectivement fonction de l'humidité et du degré de carbonatation, le système des trois équations (4), (6), (10) a été résolu numériquement. On peut déterminer la distribution d'humidité d'un échantillon

en train de sécher, ainsi que l'avancement de la carbonatation. On a effectué un calcul pour un béton pouvant être qualifié de courant (C1) et un autre calcul pour un béton de qualité médiocre (C2). Le coefficient de diffusion de CO_2 , D_g , du béton médiocre a été pris dix fois plus grand que celui de l'autre béton (C1). On a reporté sur la figure 4, les profondeurs de carbonatations calculées en fonction du temps. A titre comparatif, on a également reporté des résultats mesurés sur divers types de béton [20]. On constate que les résultats obtenus avec le modèle sont tout à fait réalistes. La figure 4 montre qu'après une carbonatation initiale rapide, l'avancement de la carbonatation suit une loi en \sqrt{t} , ce qui est en accord avec de très nombreuses observations. Pour une estimation grossière de la profondeur de carbonatation d après un temps t , on peut utiliser l'équation simple suivante :

$$d = a + b \sqrt{t} \quad (11)$$

Cette expression est couramment proposée; Vénuat et Alexandre [21] l'ont suggérée sur une base purement empirique. En fait, la valeur moyenne de la profondeur de carbonatation est de valeur limitée. Il est plus important de connaître la probabilité des valeurs extrêmes [22]. Le modèle numérique peut être étendu pour couvrir les aspects statistiques des propriétés des matériaux, aussi bien que des conditions climatiques (humidité et température).

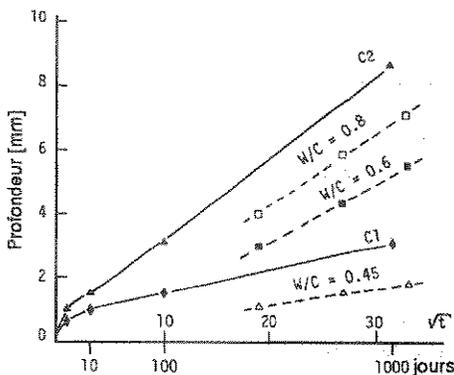


Figure 4 - Profondeur de carbonatation en fonction du temps calculée pour deux types de béton (C1 et C2). A titre comparatif, on a reporté des résultats expérimentaux de Schiessl [20].

Nous avons mesuré les coefficients de diffusion de CO_2 et O_2 sur des pâtes de ciment. Pour faire de telles mesures sur du béton et qu'elles soient réalistes, il est nécessaire d'avoir des échantillons de dimension beaucoup plus importante. Etant donné que ces coefficients sont déjà faibles et qu'il faudrait un temps considérable pour carbonater les échantillons et obtenir un équilibre hydrique, il n'est pratiquement pas possible d'effectuer ces mesures sur du béton. Pour cette raison, il est important de pouvoir prédire l'influence de la teneur en granulats sur le coefficient de diffusion effectif du béton. Cette influence peut être déterminée numériquement à l'aide des structures composites simulées, comme cela a été fait pour la diffusion d'humidité [7].

5. CONCLUSION

L'estimation de la durée de vie d'un ouvrage ou d'une structure en béton n'est pas facile. D'une part, les facteurs de dégradation sont très variés et, d'autre part, le béton est un matériau évolutif.

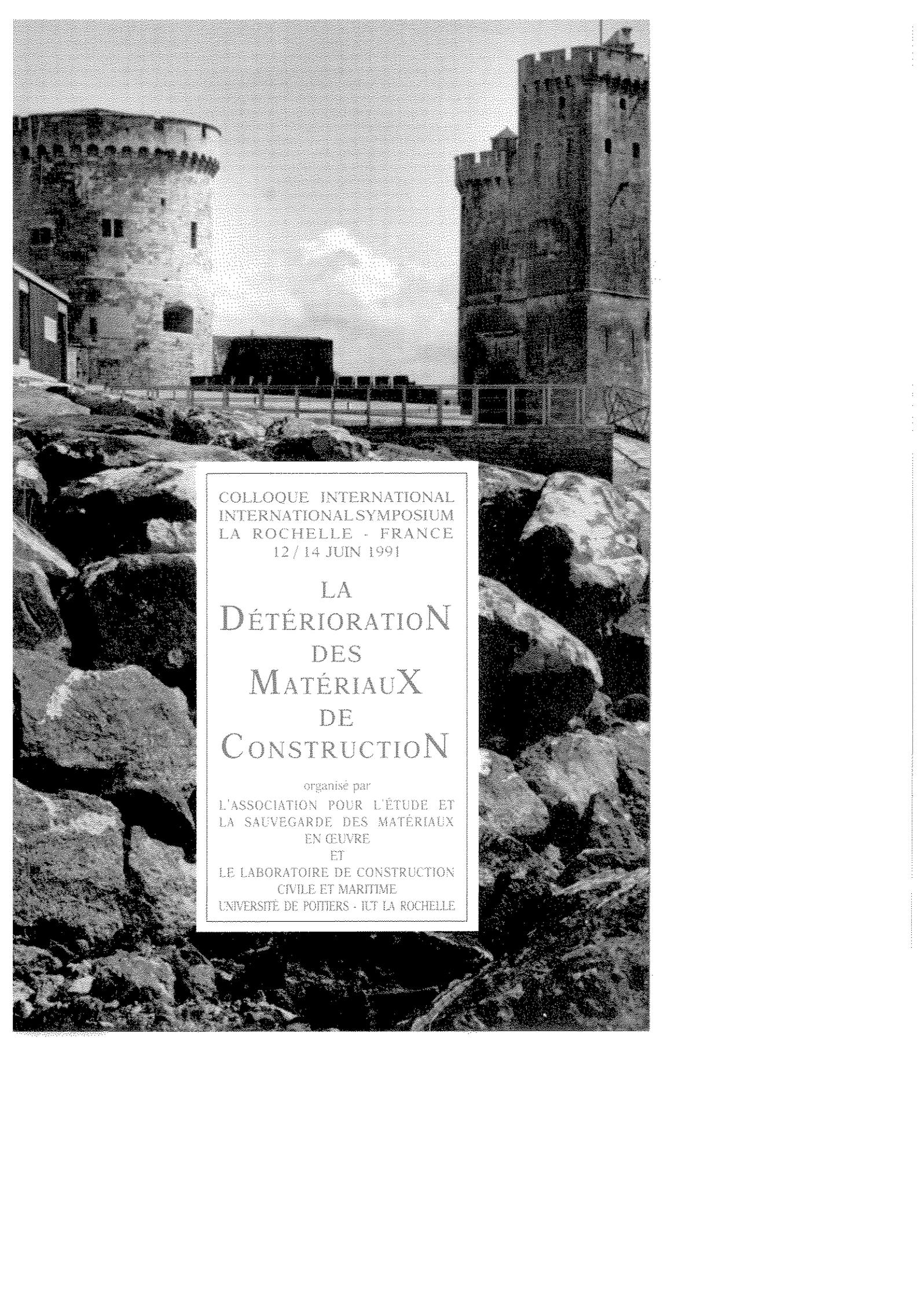
De nombreux modèles ont été proposés. Ils sont parfois simples et faciles à utiliser, mais permettent rarement d'obtenir une estimation quantitative, c'est-à-dire réelle de la durée de vie. Le développement considérable de la puissance des ordinateurs permet de traiter avec succès de nombreux aspects du problème. Cependant, le comportement physique, chimique et mécanique est très complexe et des processus tels que le vieillissement, le séchage, le fluage, le retrait, la formation de fissures, etc.

interagissent mutuellement, si bien que ces interactions sont souvent négligées par soucis de simplification.

Il semble qu'actuellement seuls des systèmes experts soient capables de modifier radicalement la situation [23]. Cependant, il n'existe pas encore de base de donnée générale, nécessaire au fonctionnement d'un modèle général décrivant le comportement du béton grâce à un tel système.

7. BIBLIOGRAPHIE

1. Fagerlund G. *in* Masters L.W. (Ed.): Problems in service life prediction of building and construction materials, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, etc. (1985), pp. 113-138.
2. Masters L.W. , Brandt E. , *Matér. Constr.* **22** (1989) 385-392.
3. Wittmann F.H. *in* Contemporary European Concrete Research, Gotab, Stockholm (1982), pp. 171-189.
4. Roelfstra P.E. 1989: A numerical approach to investigate the properties of concrete - Numerical concrete, thèse EPFL No 788, Lausanne (1989).
5. Siemes A., Vrouwenvelder A., van den Benkel A. 1984 *in* Sneek T., Kaarresalo A. (Ed.) : Third Int. Conf. Dur. Build. Mat. Comp., Technical Research Centre of Finland, Espoo (1984), vol. 3, pp. 581-590.
6. Regourd M. *in* Masters L.W. (Ed.): Problems in service life prediction of building and construction materials, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, etc. (1985), pp. 41-58.
7. Roelfstra P.E., Sadouki H., Wittmann F.H. , *Matér. Constr.* **18** (1985) 327-335.
8. Romben L. , *Swed. Cem. Concr. Res. Inst.* **9** (1979) 79. *cité par* Pommersheim j., Clifton J., *Matér. constr.* **18** (1985) 21-30.
9. Schiessl P. (Ed.): Corrosion of steel in concrete, Chapman and Hall, London- New York (1988).
10. Denarié E., *Chantiers/Suisse*, **19** (1988) 89-92.
11. Brieger L.M., Wittmann F.H. *in* Materials Science and Restoration (F.H. Wittmann Ed.), Technische Akademie Esslingen, Filderstadt (1986), pp. 635-640.
12. Brieger L.M., Bonomi E. , *Supercomputing Review*, November (1988) 3-4.
13. Houst Y.F., Wittmann F.H. *in* Materials Science and Restoration (F.H. Wittmann Ed.), Edition Lack+Chemie, Filderstadt (1983), pp. 181-185.
14. Taplin J.H. , *Austr. J. Appl. Sci.* **10** (1958) 329-345.
15. Bazant Z.P., Najjar L.P. *Cem. Concr. Res.* **1** (1971) 461-473.
16. Tuuti K., *Corrosion of steel in concrete*, CBI Research, Stockholm (1982).
17. Houst Y.F., Wittmann F.H. *in* Materials Science and Restoration (F.H. Wittmann Ed.), Technische Akademie Esslingen, Filderstadt (1986), pp. 629-634.
18. Houst Y.F., Influence of microstructure and water on the diffusion of CO₂ and O₂ through paste *accepté à la 2nd CANMET/ACI Int. Conf. Dur. Concr.*, Montréal 4-9 août 1991.
19. Papadakis V.G., Fardis M.n., Vayenas C.G. *in* Proc. 5th Int. Conf. Dur. Build. Mater. Comp., Baker J.M., etc (Eds.), Spon, London, etc. (1991), pp. 27-38.
20. Schiessl P.: Zur Frage der zulässigen Rissbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierung des Betons, *DAfStb Heft 255*, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin-München-Düsseldorf (1976).
21. Vénuat M., Alexandre J., *Rev. Mat. Constr.* No 638 (1968) 421-427, No 639 (1968) 469-481, No 640 (1969) 5-22.
22. Sentler L. *in* Sneek T., Kaarresalo A. (Ed.) : Third Int. Conf. Dur. Build. Mat. Comp., Technical Research Centre of Finland, Espoo (1984), vol. 3, pp. 569-579.
23. Schregenberger J.W., Kargl B., *Schw. Ing. Arch.* **106** (1988) 649-655.



COLLOQUE INTERNATIONAL
INTERNATIONAL SYMPOSIUM
LA ROCHELLE - FRANCE
12 / 14 JUIN 1991

LA
DÉTÉRIORATION
DES
MATÉRIAUX
DE
CONSTRUCTION

organisé par
L'ASSOCIATION POUR L'ÉTUDE ET
LA SAUVEGARDE DES MATÉRIAUX
EN ŒUVRE
ET
LE LABORATOIRE DE CONSTRUCTION
CIVILE ET MARITIME
UNIVERSITÉ DE POITIERS - IUT LA ROCHELLE