La carbonatation du béton

Autor(en): **Hermann, Kurt / Hunkeler, Fritz**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin du ciment**

Band (Jahr): **67 (1999)**

Heft 12

PDF erstellt am: **29.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-146497

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

2

La carbonatation du béton

La loi √t connue se prête à l'évaluation de la progression de la carbonatation du béton dans des conditions climatiques contrôlées (éléments de construction protégés contre la pluie, essais en laboratoire). Pour des bétons soumis à de fréquentes variations du taux d'humidité, la loi √t prédit des profondeurs de carbonatation élevées. Le risque de corrosion de l'armature est de ce fait souvent fortement surévalué.

L'air contient normalement du dioxyde de carbone (CO_2) en concentration de 0,03 % en volume. On trouve de plus fortes concentrations de CO_2 dans les zones de routes à fort trafic, de tunnels et d'installations d'incinération. Pendant ce qu'on appelle la carbonatation, le CO_2 réagit avec l'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$) de la pâte de ciment durcie; il en résulte du carbonate de calcium ($CaCO_3$):

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O.$$

Cette réaction ne se développe qu'en présence d'eau. Elle ne reproduit qu'incomplètement le processus qui s'accomplit pendant la carbonatation. C'est pourquoi il en est traité un peu plus en détail dans l'encadré «Chimie de la carbonatation».

La carbonatation provoque des modifications fondamentales dans la structure de la pâte de ciment durcie, entre autres [3]

- augmentation de la résistance à la compression
- augmentation de la dureté de la surface
- amélioration de la résistance à l'abrasion.

Mais ces modifications généralement souhaitables s'accompagnent d'autres modifications indésirables, par exemple le retrait de carbonatation (retrait de l'ordre de grandeur du retrait de dessication), ainsi que d'une possible incidence néfaste sur la protection contre la corrosion de l'armature.

Protection contre la corrosion de l'armature

Dans le béton, l'acier est en principe protégé contre la corrosion, car sous l'action de la pâte de ciment fortement alcaline, il se forme spontanément à sa surface une très mince couche protectrice, continue et adhérant solidement. Cette couche passive composée d'oxydes de fer empêche pour ainsi dire complètement la corrosion. Toutefois, à des valeurs pH inférieures à 11,0 –11,5, elle n'est plus stable; en présence d'eau et d'oxygène, il y a risque de corrosion pour l'armature.

La valeur pH de l'eau interstitielle du béton est de > 12,5. Cette valeur se maintient aussi longtemps que le $Ca(OH)_2$ transformé en $CaCO_3$ peut être continuellement remplacé par du $Ca(OH)_2$ de la pâte de ciment durcie. Lorsqu'il n'y a plus de $Ca(OH)_2$ (et plus d'autres composés basiques solubles dans l'eau) en contact avec l'eau interstitielle, la valeur pH de cette eau descend au-dessous de 9 à 10, selon l'exposition, la sorte de ciment, etc. Il y a risque de corrosion dès que le front de carbonatation atteint l'armature. En raison des manques d'homogénéité dans la composition et la structure du béton, le front de carbonatation présente généralement des maximums et des minimums.

Le SO_2 et le NO_x de l'air peuvent également abaisser la valeur pH de l'eau interstitielle. Mais comme la concentration de ces gaz est encore plus faible que celle du CO_2, leur contribution est en général insignifiante.

Mesure de la profondeur de carbonatation

Pour les analyses de bétons concernant la progression de la carbonata-

Chimie de la carbonatation

La carbonatation du béton est due à des réactions chimiques des composants alcalins de la pâte de ciment durcie (NaOH, KOH, $Ca(OH)_2$, silicates de calcium et hydrates de silicate de calcium) avec le dioxyde de carbone (CO_2). L'oxyde de calcium et l'hydroxyde de calcium entre autres sont inclus dans les réactions suivantes.

- Réaction de $Ca(OH)_2$:
  $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$
- Réaction d'hydrate de silicate de calcium (CSH):
  $3\,CaO + 2\,SiO_2 \cdot 3\,H_2O + 3\,CO_2 \rightarrow 3\,CaCO_3 \cdot 2\,SiO_2 \cdot 3\,H_2O$
- Réaction avec silicate tricalcique (C_3S):
  $3\,CaO \cdot SiO_2 + 3\,CO_2 + m\,H_2O \rightarrow SiO_2 \cdot m\,H_2O + 3\,CaCO_3$
- Réaction avec silicate bicalcique (C_2S):
  $2\,CaO \cdot SiO_2 + 2\,CO_2 + m\,H_2O \rightarrow SiO_2 \cdot m\,H_2O + 2\,CaCO_3$

Source: [10]

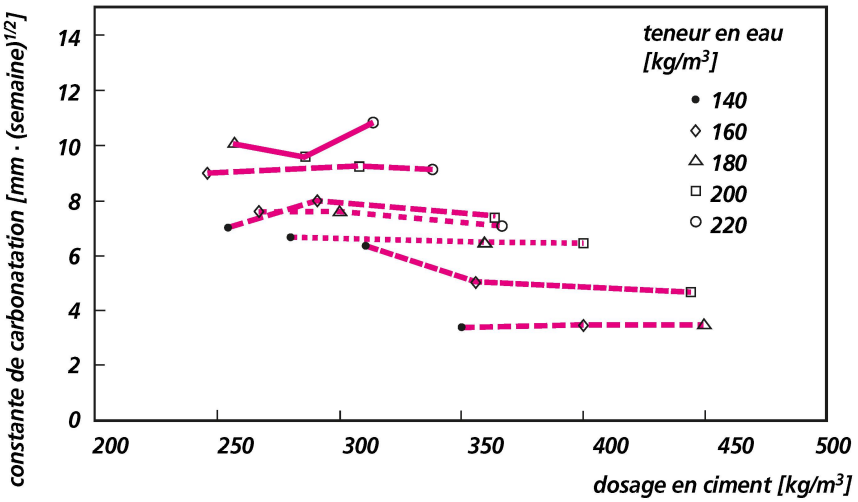

Fig. 1 Influence du dosage en ciment sur la carbonatation (essais en laboratoire; constante de carbonatation: voir équation (1)) selon [2].

tion, on utilise en général une méthode simple: le décèlement avec de la phénolphtaléine. La phénolphtaléine est un indicateur de pH qui passe de rouge-violet à incolore dans le domaine de valeurs pH de 8,3 à 10,0. En règle générale, on asperge sur la face de cassure fraîche d'une carotte ou d'une éprouvette une solution de phénolphtaléine à 1 % dans de l'éthanol ou un mélange eau/éthanol. La couleur de la zone carbonatée ne change pas, alors que la pâte de ciment durcie de la zone non carbonatée devient violette.

Un autre procédé pour déterminer la profondeur de carbonatation dans les ouvrages et revêtements consiste à forer des trous et à analyser continuellement la poussière de forage. Un dispositif de forage est par exemple décrit, qui, jusqu'à environ 40 mm de profondeur, permet de déterminer continuellement, en fonction de la profondeur de forage, aussi bien la valeur pH (et donc la profondeur de carbonatation) que la teneur en chlorures [5]. Ce procédé n'est pas encore utilisable dans la pratique.

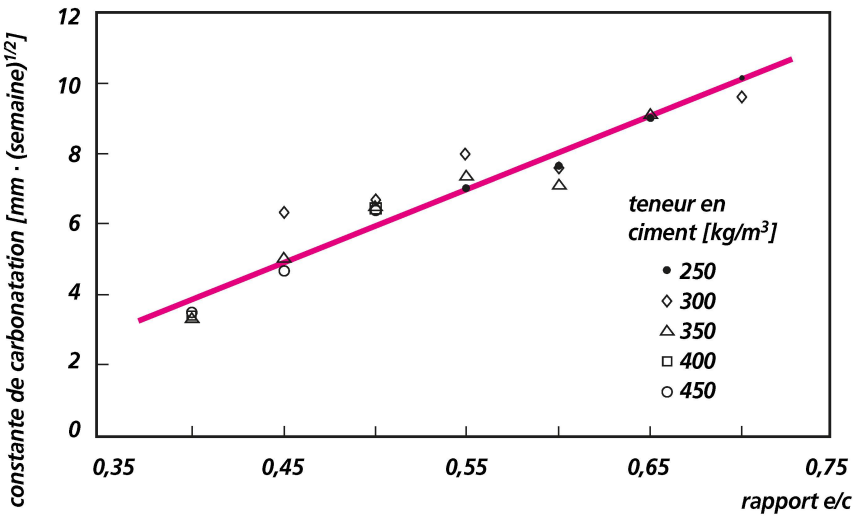

Fig. 2 Influence du rapport e/c sur la carbonatation (essais en laboratoire; constante de carbonatation: voir équation (1)) selon [2].

Carbonatation rapide

La faible teneur en CO_2 de l'air contribue beaucoup à ce que la carbonatation soit un processus lent. Il peut être considérablement accéléré par l'augmentation de la concentration de CO_2, un procédé dont il est fréquemment fait usage pour déterminer la résistance à la carbonatation des bétons. Avec le procédé utilisé au TFB [6], les échantillons sont entreposés à 60 % d'humidité relative dans une atmosphère purement de CO_2. La profondeur de carbonatation est déterminée après 0, 9, 18 et 36 jours avec le test à la phénolphtaléine. Des concentrations de CO_2 aussi élevées (bien 3000 fois la concentration naturelle) ne sont pas absolument nécessaires. Lors d'essais comparatifs, on a par exemple mesuré avec une teneur en CO_2 de 4 % en volume une vitesse de carbonatation 50 fois plus grande qu'avec une atmosphère de laboratoire «normale» (0,03 % en volume) [7].

Influences sur la carbonatation

La vitesse de carbonatation d'un béton dépend de nombreux facteurs.

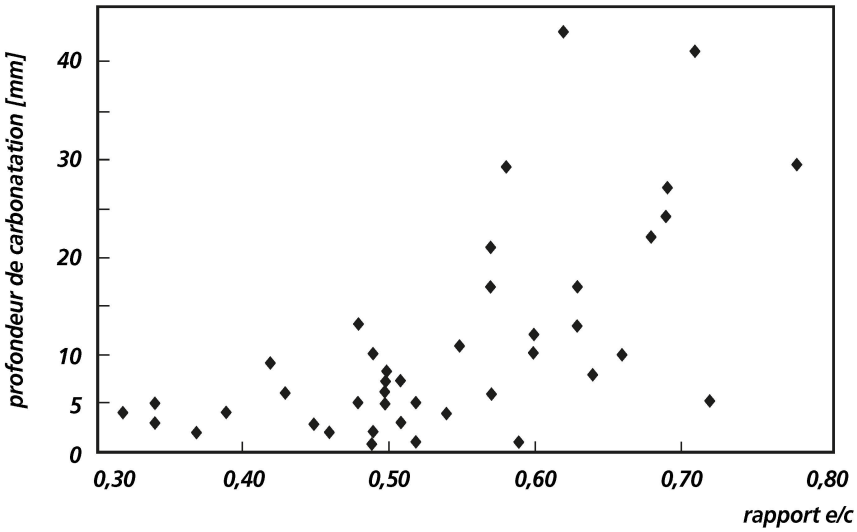

Fig. 3 Influence du rapport e/c sur la carbonatation du béton dans des ponts ayant jusqu'à 68 ans [8].

Quelques-uns d'entre eux sont décrits ci-après.

Sorte et quantité de ciment, rapport e/c

Dans certains des bétons avec ciments Portland, on observe des profondeurs de carbonatation plus faibles que dans des bétons comparables avec ciments de haut fourneau. Cela est compréhensible, car la teneur en $Ca(OH)_2$ de la pâte durcie du ciment Portland est d'environ 25 % de la masse, et celle de la pâte durcie du ciment de haut fourneau, seulement de quelque 10 % de la masse (dépend de la teneur en laitier de haut fourneau).

La valeur pH de l'eau interstitielle est déterminée principalement par la teneur des minéraux du clinker en oxyde de sodium (Na_2O), oxyde de potassium (K_2O) et oxyde de calcium (CaO) ou en hydroxydes (NaOH, KOH, $Ca(OH)_2$) en résultant. La progression de la carbonatation ne dépend donc pas uniquement de la teneur en $Ca(OH)_2$, mais également de celle en Na_2O et en K_2O [16].

Diverses analyses ont été faites en ce qui concerne l'influence de la quantité de ciment sur la profondeur de carbonatation. Les résultats d'une analyse avec des ciments Portland sont représentés à la *figure 1* [2]. Ils démontrent que comparée à l'influence du rapport e/c (de 0,40 à 0,70), l'influence de la teneur en ciment est faible. Le rôle du rapport e/c ressort également de la *figure 2,* dans laquelle la profondeur de carbonatation en fonction du rapport e/c est représentée.

Ces résultats proviennent d'essais de carbonatation accélérée en laboratoire. Une vaste étude portant sur des ponts ayant de 50 à 68 ans, faite en Angleterre, a fourni les résultats donnés à la *figure 3.* Le dosage en ciment était de 250 à 300 kg/m^3. Il vaut la peine de souligner que jusqu'à un rapport e/c de 0,55, les profondeurs de carbonatation étaient inférieures à 15 mm.

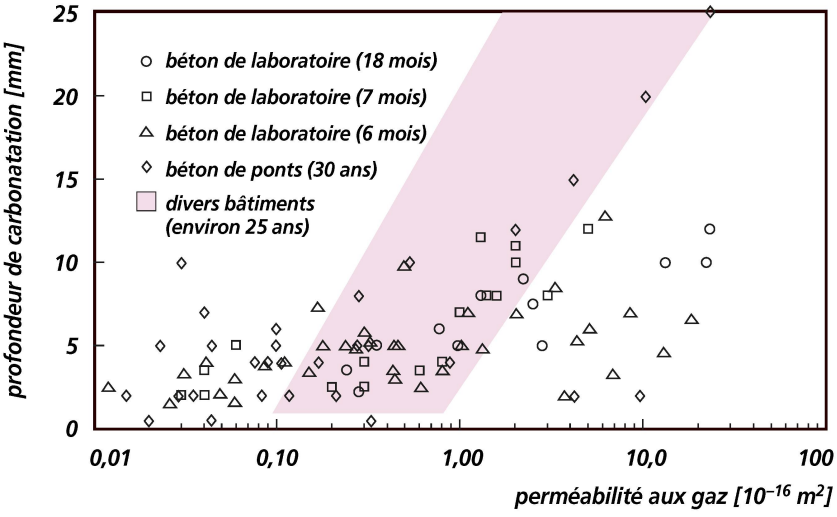

Fig. 4 Carbonatation en fonction de la perméabilité aux gaz [10].

Ajouts

Les ajouts à action pouzzolanique diminuent la teneur en $Ca(OH)_2$, réduisant ainsi la résistance à la carbonatation d'un béton. Il faut donc les utiliser en quantité limitée [9]. Les ajouts tels que fumées de silice rendent toutefois la structure plus dense.

Densité du béton

Une structure plus dense conduit à une vitesse de carbonatation plus faible. C'est pourquoi des paramètres de transport tels que coefficient d'absorption d'eau, de diffusion des

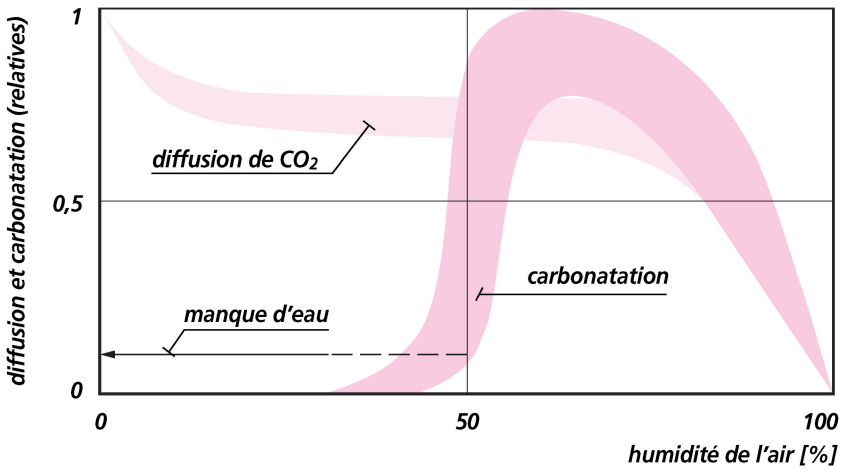

Fig. 5 Vitesse de diffusion de CO_2 et vitesse de carbonatation en fonction de l'humidité de l'air [1].

gaz et de perméabilité aux gaz (voir *figure 4)* conviennent comme grandeur approximative pour la résistance à la carbonatation.

Résistance à la compression

Pâte de ciment durcie plus dense signifie en règle générale aussi résistance à la compression plus élevée. C'est pourquoi la résistance à la compression peut également être utilisée comme grandeur approximative pour la résistance à la carbonatation.

Humidité de l'air et du béton

La vitesse de diffusion de CO_2 est de 3 à 4 ordres de grandeur plus élevée dans un béton sec ou peu humide que dans un béton complètement trempé, dans lequel il ne se produit par conséquent pratiquement pas de carbonatation. Mais un béton sec ne se carbonate pas, car de l'eau circulant librement est nécessaire pour la réaction. C'est en fait avec des taux d'humidité de 50–70 % que la vitesse de carbonatation est la plus élevée *(figure 5).*

BIBLIOGRAPHIE

Le présent article est basé pour l'essentiel sur des documents établis pour le séminaire TFB «Dauerhafte Betonbauwerke – unser Ziel» [1].

[1] **Hunkeler, F.,** «Einfluss der Betonqualität auf den Chlorid- und Karbonatisierungswiderstand», documents pour le séminaire TFB no 974 762 «Dauerhafte Betonbauwerke – unser Ziel» du 13 mai 1998 à Wildegg.

[2] **Loo, Y.H., Chin, M.S., Tam, C.T.,** and **Ong, K.C.G.,** «A carbonation prediction model for accelerated carbonation testing of concrete», Magazine of Concrete Research **46** [168], 191–200 (1994).

[3] **Koelliker, E.,** «Die Carbonatisierung von Stahlbeton – ein Überblick», Beton- und Stahlbetonbau **85** [6], 148–153 et [7], 186–189 (1990).

[4] **Weigler, H.,** et **Karl, S.,**«Beton: Arten – Herstellung – Eigenschaften», Ernst & Sohn, Berlin (1989), pages 422–427.

[5] «Bohrverfahren zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe und des Chloridgehalts von Beton», Wissenschaftliche Informationen Bundesamt für Strassenwesen, info 2/98, www.bast.de/ PUBLICAT/Basisinfo/Info1998/info9802.htm.

[6] **Piguet, A.,** «Détermination rapide de la carbonatation du béton», Bulletin du ciment **56** [8], 1–8 (1988).

[7] **Ho, D. W. S., and Lewis, R. K.,** «Carbonation of concrete and its prediction», Cement and Concrete Research **17** [3], 489–504 (1987).

[8] **Brown, J. R.,** «Factors affecting steel corrosion in concrete bridge structures», IABSE Symp. 1989, pages 543–548.

[9] **Manns, W.,** «Gemeinsame Anwendung von Silicastaub und Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff», Beton **47** [12], 716–720 (1997).

[10] **Jacobs, F.,** «Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen», Beton **49** [5], 276–282 (1999).

[11] **Wierig, H.-J.,** «Longtime studies on the carbonation of concrete under normal outdoor exposure», Proc. of the Rilem Seminar on the durability of concrete structures under normal outdoor exposure, Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung, Universität Hannover (1984), pages 239–249.

[12] **Schröder, F., Smolczyk, K., Grade, K., Vinkeloe, R.,** et **Roth, R.,** «Einfluss der Luftkohlensäure und Feuchtigkeit auf die Beschaffenheit des Betons als Korrosionsschutz für Stahleinlagen», Deutscher Ausschuss für Stahlbeton **182,** 1–28 (1967).

[13] **Bunte, D.,** «Zum karbonatisierungsbedingten Verlust der Dauerhaftigkeit von Aussenbauteilen aus Stahlbeton», Deutscher Ausschuss für Stahlbeton **436,** 1–172 (1993).

[14] **Frey, R.,** «Untersuchung der 20jährigen Karbonatisierung von Betonen», Beton **43** [3], 116–120 (1993).

[15] **Sickert, G.,** «Modellerweiterung für den Carbonatisierungsfortschritt im Beton», Betonwerk und Fertigteil-Technik **63** [12], 74–88 (1997).

[16] **Reschke, T.,** et **Gräf, H.,** «Einfluss des Alkaligehalts im Zement auf die Carbonatisierung von Mörtel und Beton», Beton **47** [11], 664–670 (1997).

[17] **Martin, H., Raue, A.,** et **Schiessl, P.,** «Karbonatisierung von Beton aus verschiedenen Zementen», Betonwerk und Fertigteil-Technik **41** [12], 588–590 (1975).

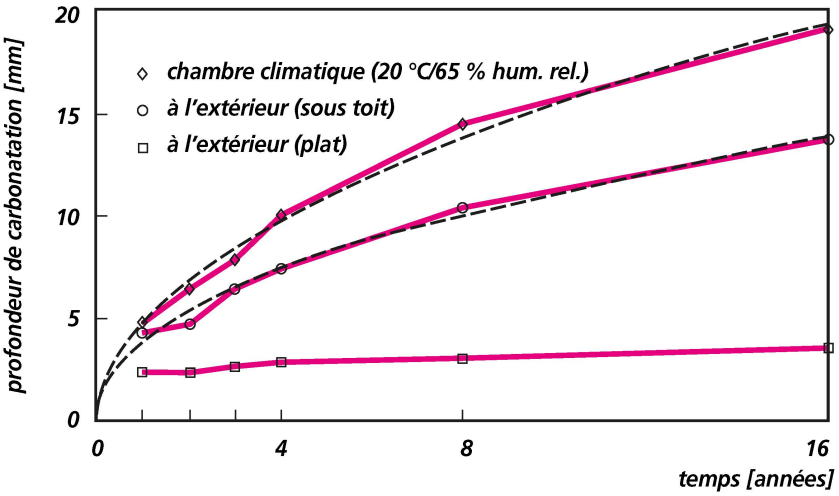

Fig. 6 Evolution de la profondeur de carbonatation dans le temps. La ligne tiretée correspond à l'évolution selon la loi √t [11].

Un béton protégé contre les précipitations est plus rapidement carbonaté qu'un béton qui y est exposé, car il peut disposer de suffisamment d'eau et de CO_2 *(figure 6)*.

Evolution de la carbonatation dans le temps

Dans les ouvrages où la carbonatation est déjà relativement bien avancée, c'est surtout le moment auquel le front de carbonatation atteint l'armature qui est intéressant. C'est pourquoi les essais pour calculer la progression de la carbonatation sur la base de données disponibles (en particulier âge du béton et profondeur de carbonatation du moment) n'ont pas manqué.

La loi √t est connue depuis les années soixante; elle est basée sur la 1ère loi de Fick:

$$(1)\quad x = (2\, D_G\, [c_1 - c_2]/a)^{1/2} \cdot t^{1/2} = A \cdot t^{1/2}$$

x	profondeur de carbonatation au moment t [m]
D_G	coefficient de diffusion de CO_2 dans le béton carbonaté [m^2/s]
a	quantité de CO_2 nécessaire pour la carbonatation des composants alcalins [g/m^3]
c_1	concentration de CO_2 sur la face extérieure [g/m^3]
c_2	concentration de CO_2 au front de carbonatation [g/m^3]
t	temps [s]
A	constante de carbonatation [$m \cdot s^{-1/2}$]

Dérivées de l'équation (1), diverses simplifications ont été faites, qui figurent dans le *tableau 1*. En raison de ces simplifications, la loi √t n'est plus valable qu'en cas de conditions climatiques constantes, telles que par exemple pour des éléments de construction protégés contre la pluie ou en laboratoire *(figure 6)*.

En 1967 déjà, il a été signalé que la progression de la carbonatation d'un béton fréquemment et intensivement humidifié devient avec le temps si faible que l'on peut pratiquement dire qu'elle s'arrête [12].

La loi √t étant insuffisamment proche de la réalité, de nombreuses propositions d'amélioration ont été faites. Un développement en a été proposé (équation 2) dans les années septante déjà, dans lequel il est tenu compte aussi bien de l'influence de

Hypothèse	Réalité
Le coefficient de diffusion de CO_2 D_G est constant localement et dans le temps.	Le coefficient de diffusion de CO_2 dépend fortement entre autres de l'humidité du béton *(figure 5)* et de la porosité de la couche carbonatée.
Le coefficient a dans l'équation (1) est indépendant de la profondeur.	Le coefficient a dans l'équation (1) dépend du degré d'hydratation et des conditions d'exposition (teneur en CO_2 de l'environnement).
Il n'y a pas de diffusion en retour de $Ca(OH)_2$ depuis l'intérieur du béton.	En raison de la chute de concentration due à la carbonatation, le $Ca(OH)_2$ se trouvant à l'intérieur de l'élément de construction migre vers l'extérieur.
Le béton se carbonate à une vitesse constante.	En raison de l'humidité de l'air variant constamment le béton en plein air se carbonate à des vitesses variant fortement dans le temps.

Tab. 1 Importantes simplifications de la loi √t.

Grandeur mesurée		Etape de coffrage glissant no 3	Etape de coffrage glissant no 4
Résistance			
– à l'âge de 15 ans (m)	N/mm^2	57,8 ± 13,3	55,8 ± 9,5
– résistance à 28 jours (m)	N/mm^2	27,9 ± 5,8	28,5 ± 1,7
Dosage en ciment (c)	kg/m^3	282 ± 27,5	245 ± 5
Rapport e/c (c)		0,60 ± 0,07	0,60 ± 0,05
Volume des pores			
– volume des pores total (m)	Vol.%	15,1 ± 1,5	13,7 ± 0,6
– volume des capillaires (m)	Vol.%	13,6 ± 1,6	11,7 ± 0.8
Profondeur de carbonatation (m)	mm	11,4 ± 2,8	12,6 ± 1,6

Tab. 2 Résultats de l'analyse de carottes provenant de la face ouest d'un silo en béton armé ayant 15 ans (m = mesuré, c = calculé) selon [1].

l'humidité du béton sur le coefficient de diffusion de CO_2 D_G que de la diffusion en retour de $Ca(OH)_2$. On y a en outre introduit la profondeur de carbonatation finale x_∞ [17].

(2) $t = -a/b(x + x_\infty \cdot \ln [1 - x/x_\infty])$

- t temps
- x profondeur de carbonatation au moment t [m]
- x_∞ profondeur de carbonatation finale [m]
- a quantité de CO_2 nécessaire pour la carbonatation des composants alcalins [g/m^3]
- b constante d'inhibition: facteur dépendant de l'humidité; décrit la diminution du coefficient de diffusion de CO_2 D_G et le besoin en CO_2 supplémentaire en raison de la diffusion en retour de $Ca(OH)_2$

Il n'est pas traité ici des nombreuses autres modifications de la loi √t (voir p. ex. [13–15]).
Malgré sa validité limitée, la loi √t simple est malheureusement encore toujours utilisée pour extrapoler la progression de la carbonatation dans des éléments de construction en béton armé exposés aux précipitations. Sous nos latitudes, on peut partir du fait qu'après 15 à 30 ans, la carbonatation est terminée dans une large mesure, sauf pour des éléments de construction dont le béton est de mauvaise qualité. Mais avec la loi √t, la progression de la carbonatation est considérablement surestimée, ce qu'illustre l'exemple cité ci-après.

Carbonatation d'un silo en béton armé

Un silo en béton armé, construit avec un béton de médiocre qualité, présentait après 15 ans les données figurant dans le *tableau 2.* Dans la *figure 7,* on trouve aussi bien l'évolution future prévisible de la carbonatation pour le béton de l'étape de coffrage glissant no 4 basée sur la loi √t que l'extrapolation réaliste pour une profondeur de carbonatation finale de 15 ou 20 mm selon l'équation 2. Les pronostics pour l'évolution de la carbonatation après 30 ans diffèrent considérablement.

Fritz Hunkeler et *Kurt Hermann, TFB*

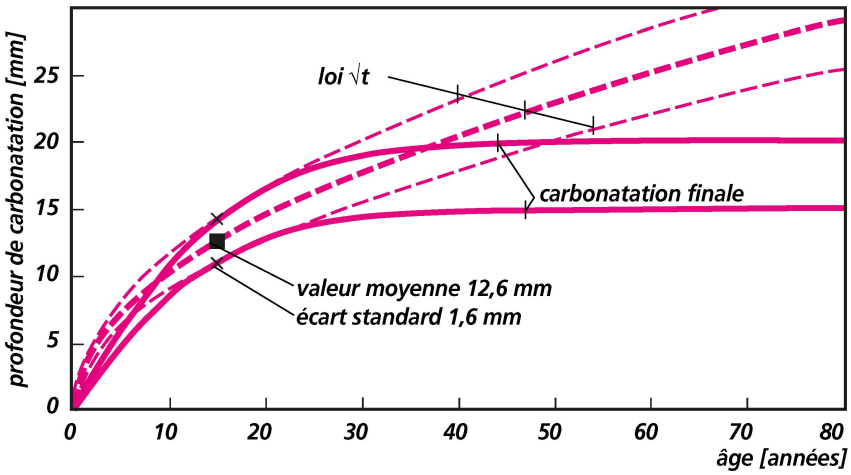

Fig. 7 Extrapolation de la progression de la carbonatation (basée sur les valeurs du* tableau 2*) au moyen de la loi √t (équation (1)) et au moyen de l'équation (2) (voir texte).