

## **Carbonatation atmosphérique**

La carbonatation est un phénomène complexe qui se produit lorsque le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère diffuse sous forme gazeuse dans le matériau cimentaire à travers

les fissures et les pores superficiels. La carbonatation conduit à la dissolution des phases contenant du calcium ( $\text{Ca(OH)}_2$ , C-S-H et ettringite) et donc à la perte de l'effet tampon. En effet, la portlandite assure le maintien d'un pH de 12,45 à 25°C et l'armature en acier se retrouve ainsi dans sa zone de passivation (Figure 14). Après la carbonatation, le pH de la matrice cimentaire descend en-dessous de 9,5 et provoque la dépassivation de l'acier. La corrosion peut ainsi s'initier si les conditions d'humidité et / ou présence de l'oxygène sont présentes. La carbonatation entraîne la corrosion généralisée des armatures.

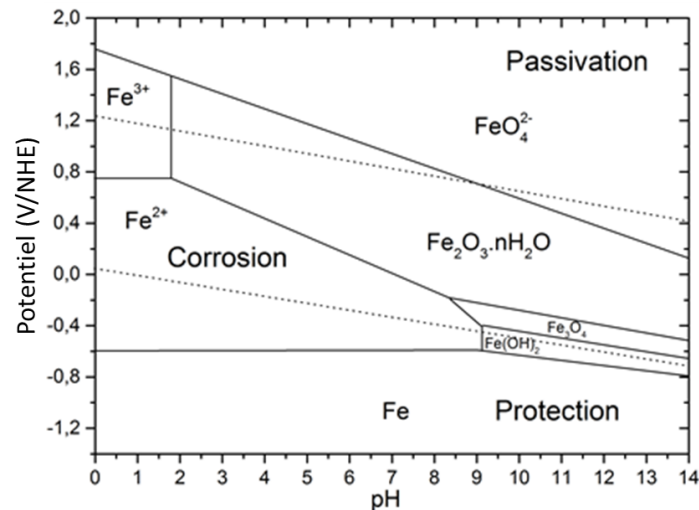


Figure 14 : Diagramme de Pourbaix du fer/eau simplifié [43]

### 3.1 Systèmes réactionnels

#### 3.1.1 Dissolution du dioxyde de carbone

La vitesse de carbonatation est maximale aux alentours de 50-70 % d'humidité relative (HR) (Figure 15) [44], [45]. Elle est très faible lorsque le matériau cimentaire est saturé en eau ou complètement sec. Car à faible HR, les réactions chimiques sont inhibées en raison du manque d'eau alors qu'à haute humidité relative, la diffusion du  $\text{CO}_2$  est limitée en raison de la saturation des pores du matériau (la diffusion de dioxyde de carbone en solution est 10000 fois plus faible qu'en phase gazeuse [46]).

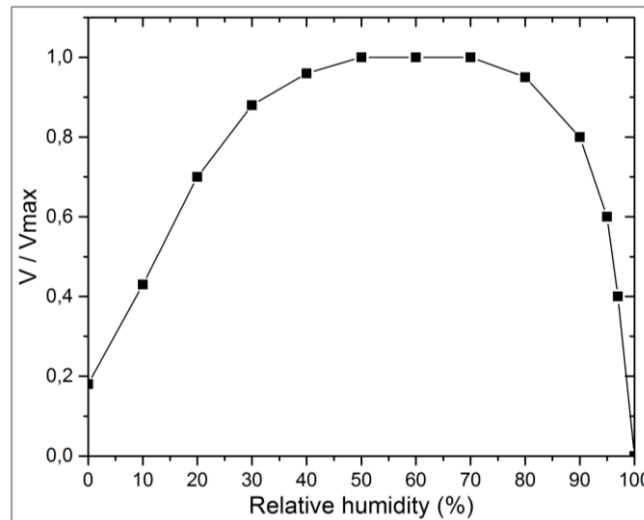
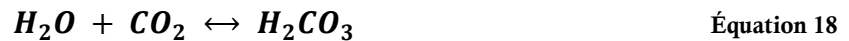


Figure 15 : Cinétique de carbonatation en fonction de l'humidité relative [44]

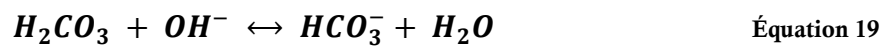
Le  $\text{CO}_2$  se dissout dans la solution interstitielle pour donner des ions carbonate suivant les étapes suivantes [47] :

- 1) Formation de l'acide carbonique :

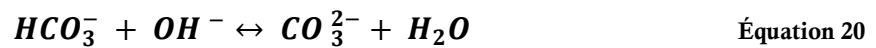


L'acide carbonique ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) se dissout dans l'eau en deux phases ( $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{CO}_3^{2-}$ ) comme indiqué dans les deux équations ci-après. La spéciation se fait en fonction du pH.

- 2) Formation de l'ion bicarbonate :



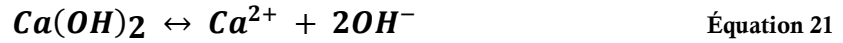
- 3) Formation de l'ion carbonate (à pH basique) :



### 3.1.2 Carbonatation de la portlandite

L'acidification de la solution interstitielle provoquée par la dissolution du  $\text{CO}_2$  dans la solution interstitielle conduit à la dissolution des hydrates, en particulier la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

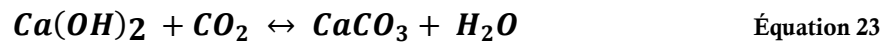
L'hydroxyde de calcium se dissout partiellement pour rétablir la basicité du milieu :



Les ions calcium ainsi libérés précipitent avec les ions carbonates suivant la réaction [48] :



Ces mécanismes réactionnels sont souvent simplifiés et résumés en une équation bilan qui s'écrit :



La (Figure 16) illustre le mécanisme de carbonatation de la portlandite et l'intervention des trois phases : gazeuse, aqueuse et solide au cours du processus [49].

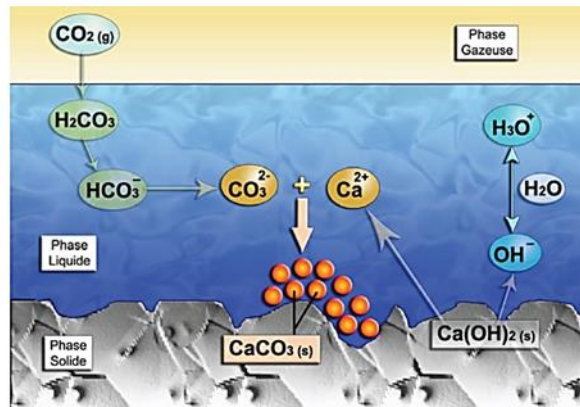
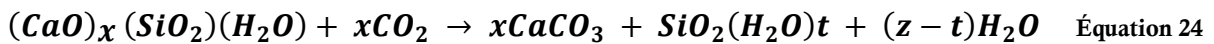


Figure 16 : Mécanisme de carbonatation de la portlandite [49]

### 3.1.3 Carbonatation des silicates de calcium hydratés (C-S-H)

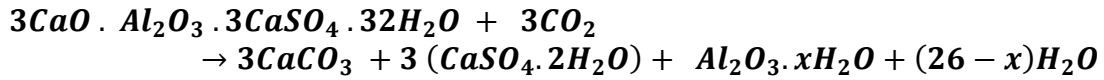
La carbonatation du gel C-S-H entraîne la consommation des ions calcium du gel conduisant à la formation d'une silice amorphe.

La réaction du C-S-H avec le dioxyde de carbone entraîne la formation du carbonate de calcium et d'un gel de silice amorphe, et peut s'écrire comme suit [50] :



### 3.1.4 Carbonatation des aluminates

La décomposition par carbonatation de l'ettringite conduit à la formation de carbonate de calcium, du gypse et un gel d'alumine [51] :



Équation 25

## 3.2 Modèles de carbonatation

La cinétique de carbonatation dépend de plusieurs paramètres, les principaux sont : la porosité, le taux de saturation, la quantité de matière carbonatable, la concentration en  $\text{CO}_2$  et les conditions environnementales (l'humidité relative, la température...).

La carbonatation est gouvernée par la diffusion du  $\text{CO}_2$  à travers la zone carbonatée. La plupart des modèles de carbonatation existants sont basés sur la diffusion de  $\text{CO}_2$ . Quelques-uns d'entre eux sont décrit ci-dessous.

### 3.2.1 Modèle général

Le modèle de base le plus simple est basé sur la solution analytique de la première loi de Fick (en régime permanent) :

$$x_c(t) = k\sqrt{t} \quad \text{Équation 26}$$

Avec:  $x_c(t)$  l'épaisseur carbonatée (mm),  $t$  le temps (ans) et  $k$  coefficient de carbonatation ( $\text{mm}/\text{an}^{0.5}$ ).

### 3.2.2 Modèle de Papadakis

Papadakis propose un modèle mathématique basé sur les processus physico-chimiques du phénomène de carbonatation. Ce modèle permet de lier la racine carrée du temps à la concentration de  $\text{CO}_2$   $[\text{CO}_2]$  et son coefficient de diffusion effectif dans le matériau carbonaté  $D_c(\text{CO}_2)$  et la concentration de la matière carbonatable dans le matériau  $[\text{CaO}]$  [52], [53] :

$$k_{\text{Papadakis}} = \sqrt{\frac{2 D_c(\text{CO}_2) [\text{CO}_2]}{[\text{CaO}]}} \sqrt{t} \quad \text{Équation 27}$$

Dans le cas d'un matériau totalement hydraté :