

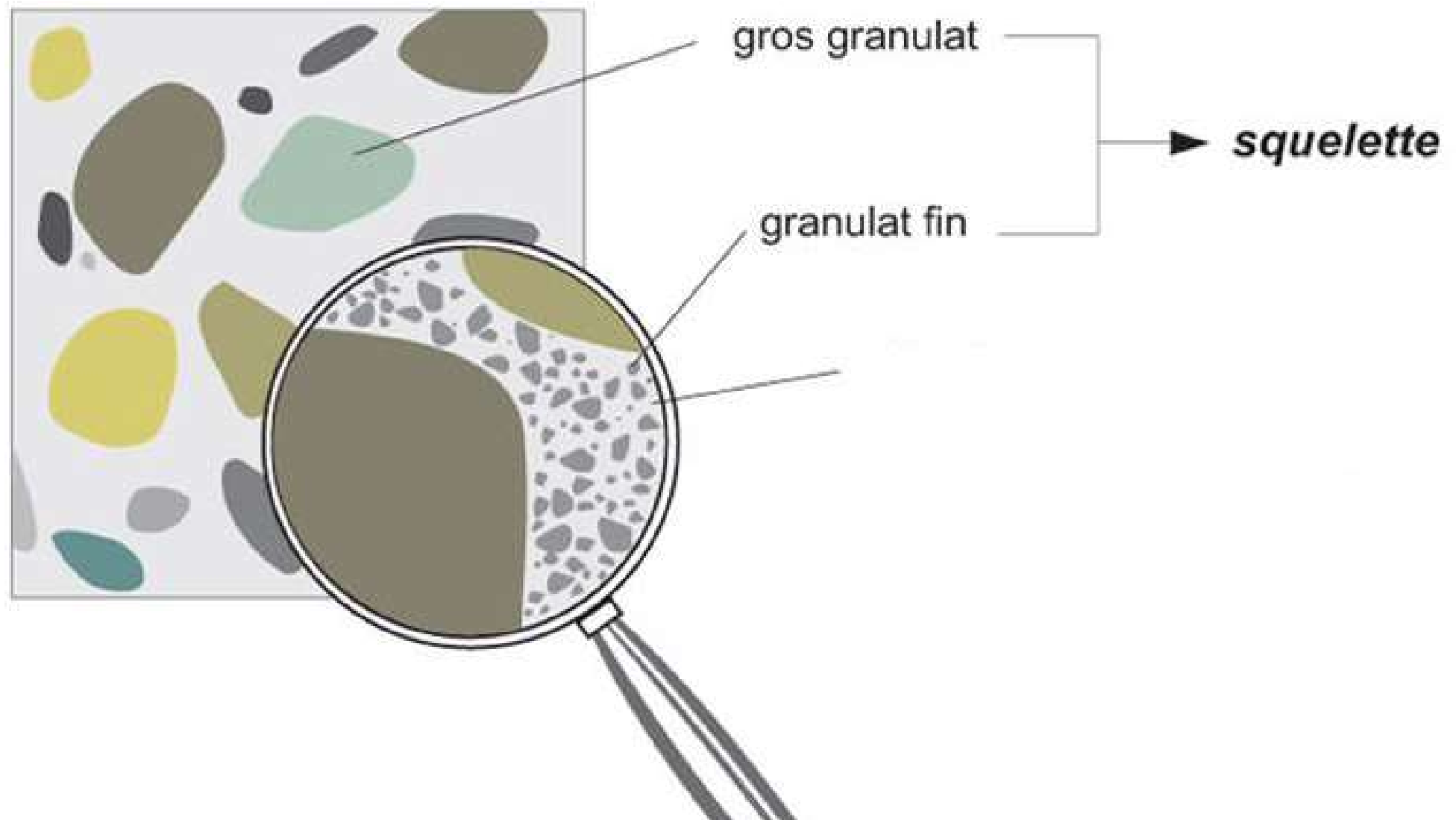
LGCIV2047 – Pathologie et réhabilitation des ouvrages

Semaine 03 - Vendredi

Tous les efforts ont été faits pour contacter les détenteurs des droits d'auteur des photographies.

Les détenteurs de droits d'auteur que nous n'avons pas pu joindre ou qui n'ont pas été reconnus à leur juste valeur sont invités à contacter l'éditeur.

Le matériau



Le béton est un assemblage de grain qui constituent son squelette. Moins il y a de vides plus il est résistant.

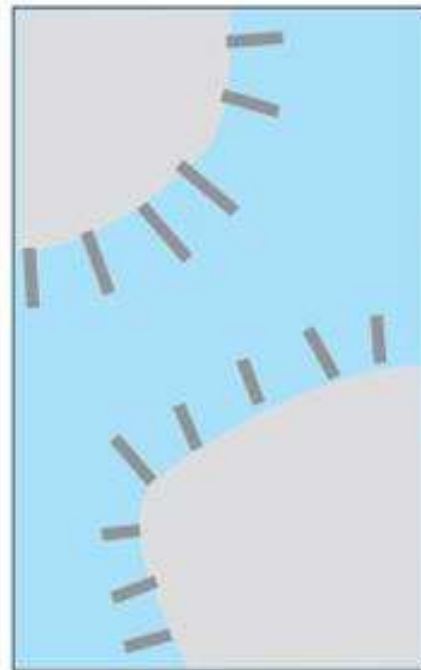
Liant hydraulique

début de la réaction
avec l'eau
(immédiatement)

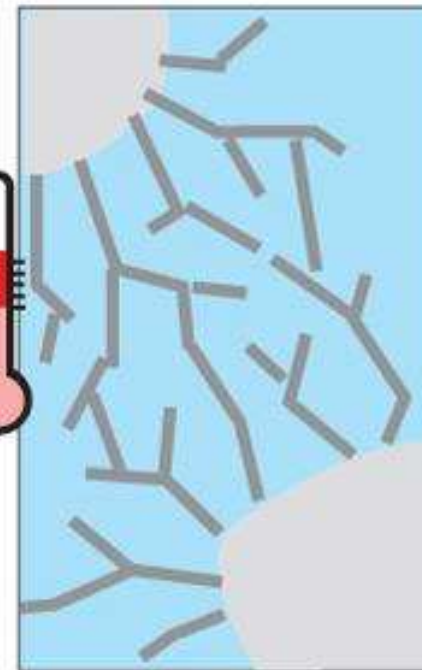
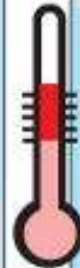


grains de ciment
séparés par film d'eau

"prise"
(pâte de ciment raidit)
*(après quelques
heures)*



'hydrates' (cristaux)
+ 'chaux libre'



durcissement
*(après quelques jours,
mais continuant pendant
des semaines)*



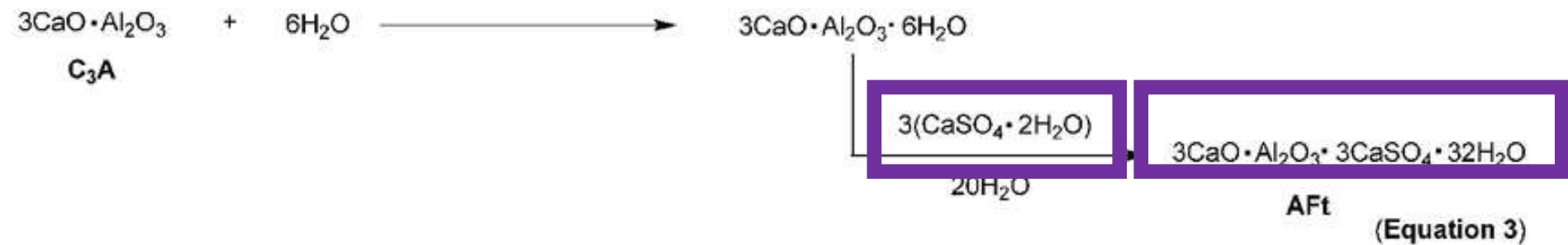
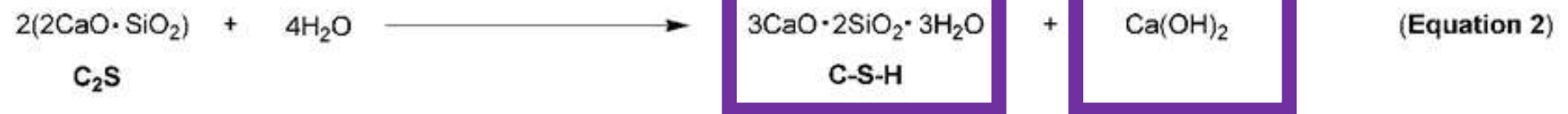
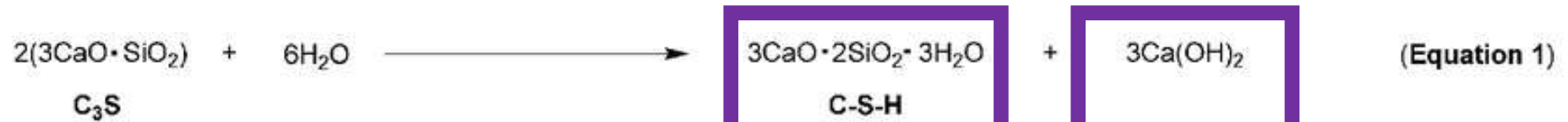
réseau de cristaux
(+ éventuellement excès
d'eau de gâchage)

1 / 10.000 mm



influence de la température et
de l'humidité ambiantes !

Hydration reactions of Portland cement



La prise du ciment

1. La phase dormante

La pâte de ciment semble ne pas évoluer, cela peut durer de 1 à 4 heures selon le type de ciment.

2. Prise du ciment

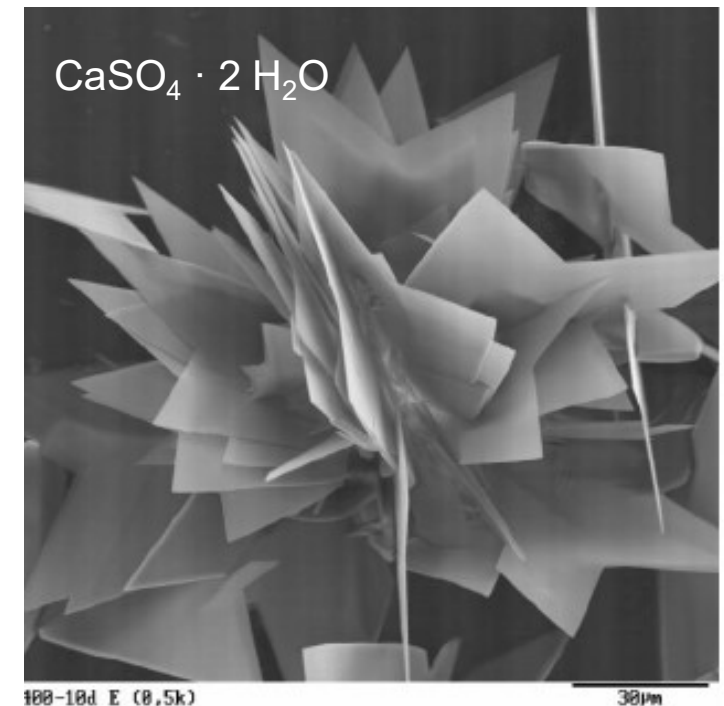
Augmentation de la viscosité et dégagement de chaleur, formation des aiguilles d'Ettringite et cristaux de Gypse, suivie de la **Portlandite** et des **CSH** (silicates de calcium hydratés). C'est l'enchevêtrement du gel CSH qui donne sa solidité au ciment.

3. Poursuite du durcissement du ciment

Les réactions vues précédemment se poursuivent encore plusieurs mois après la prise. Ainsi tout le gypse et l'Ettringite finissent par disparaître et le CSH comble peu à peu toutes les porosités du ciment.



Aiguilles d'Ettringite



Cristaux de Gypse

La prise du ciment

1. La phase dormante

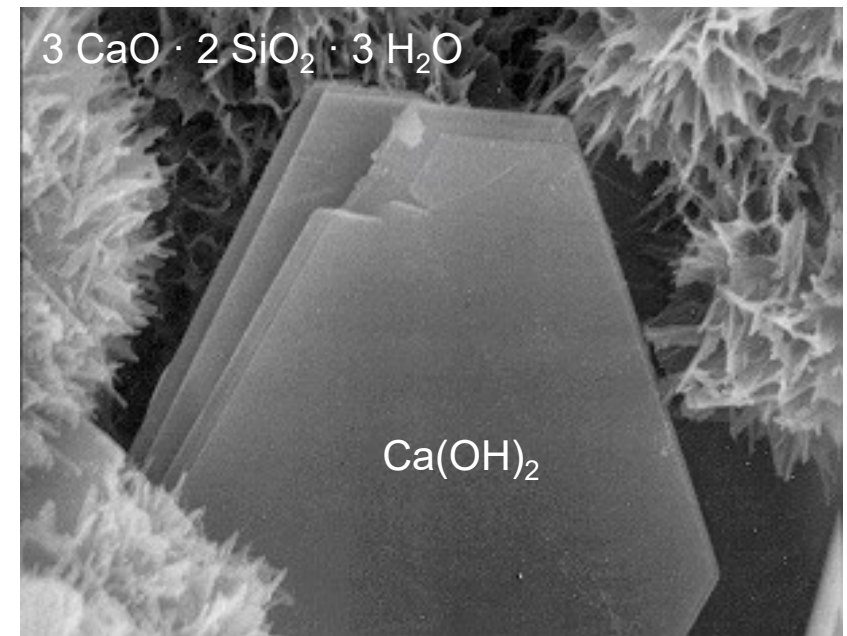
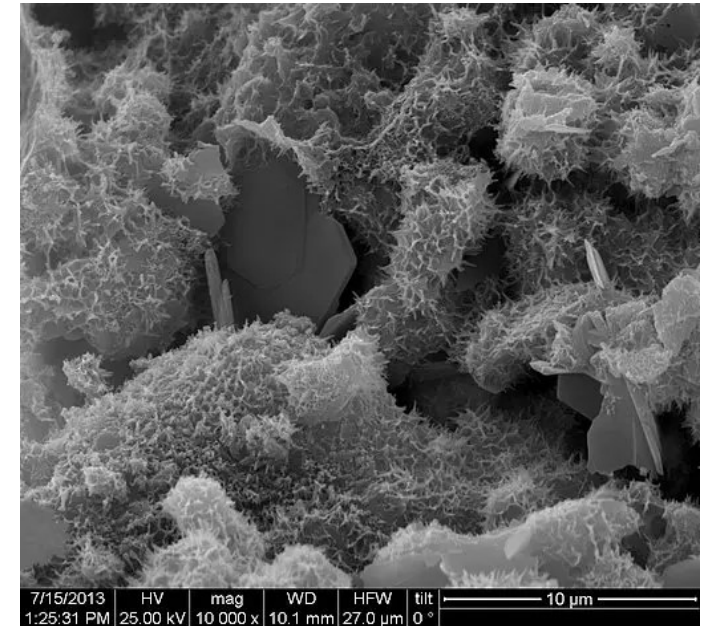
La pâte de ciment semble ne pas évoluer, cela peut durer de 1 à 4 heures selon le type de ciment.

2. Prise du ciment

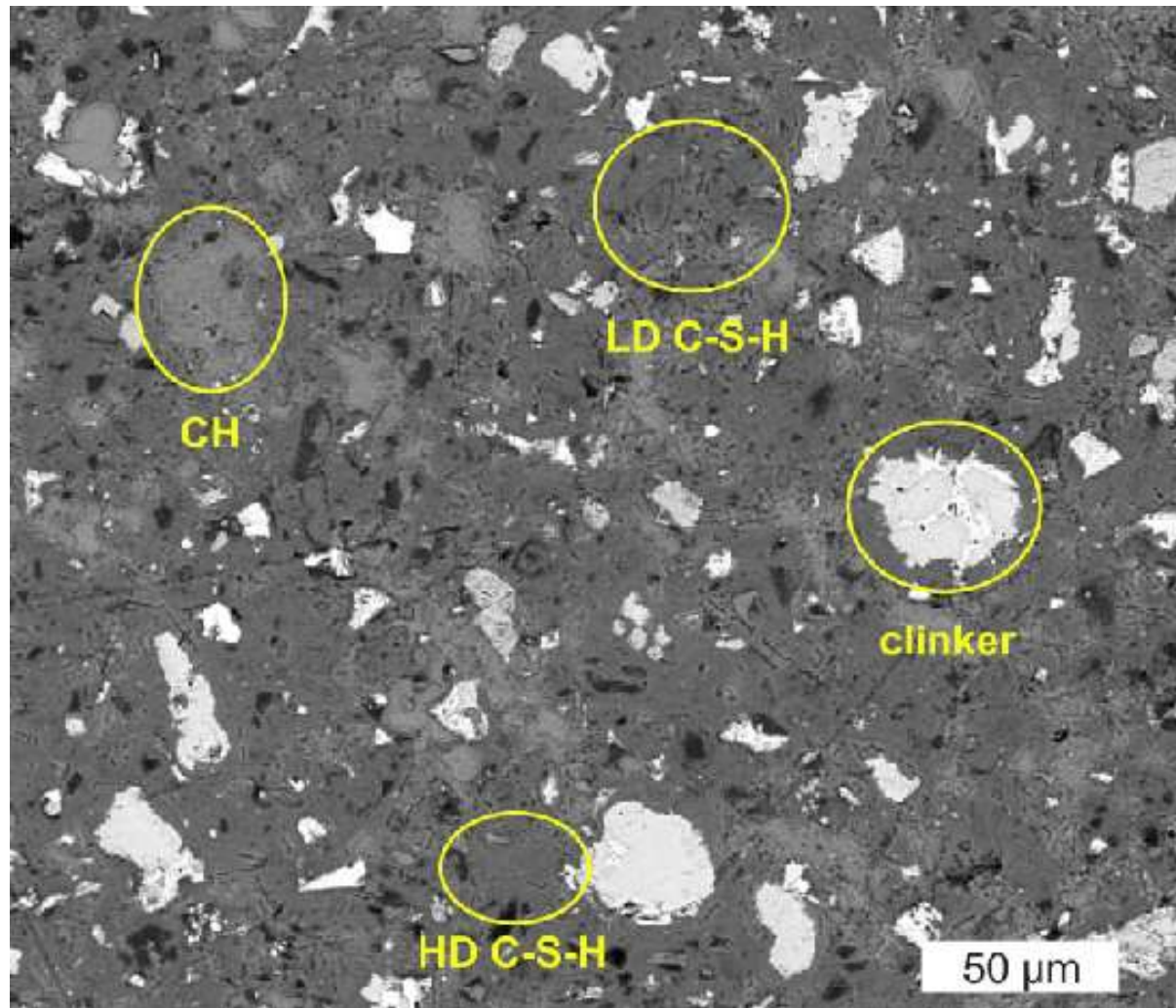
Augmentation de la viscosité et dégagement de chaleur, formation des aiguilles d'Ettringite et cristaux de Gypse, suivie de la **Portlandite** et des **CSH** (silicates de calcium hydratés). C'est l'enchevêtrement du gel CSH qui donne sa solidité au ciment.

3. Poursuite du durcissement du ciment

Les réactions vues précédemment se poursuivent encore plusieurs mois après la prise. Ainsi tout le gypse et l'Ettringite finissent par disparaître et le CSH comble peu à peu toutes les porosités du ciment.



Un cristal hexagonal de Portlandite (au centre) entouré de gel CSH



Jiří Němeček, Jiří Němeček & Jaroslav Lukeš, NANOINDENTATION AND ACCELERATED PROPERTY MAPPING OF PORTLAND CEMENT PASTE, *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, Vol. 27.

Quelque photo

Causes mécaniques : érosion, abrasion



Le terme "usure" définit à la fois la sollicitation et la dégradation de la surface soumise au **frottement**. L'érosion peut être considérée une forme d'usure de surface. Les phénomènes d'abrasion typiques sont le contact et le frottement entre les surfaces des structures en béton et les dommages causés par les particules solides transportées par les torrents (gravier, cailloux et sable).

Causes physiques : gel et dégel



L'expansion volumique de l'eau lors de la transformation de l'état liquide à l'état solide (environ +9,1%) soumet le béton à des contraintes considérables, ce qui entraîne également sa **désintégration**. Solutions possibles :

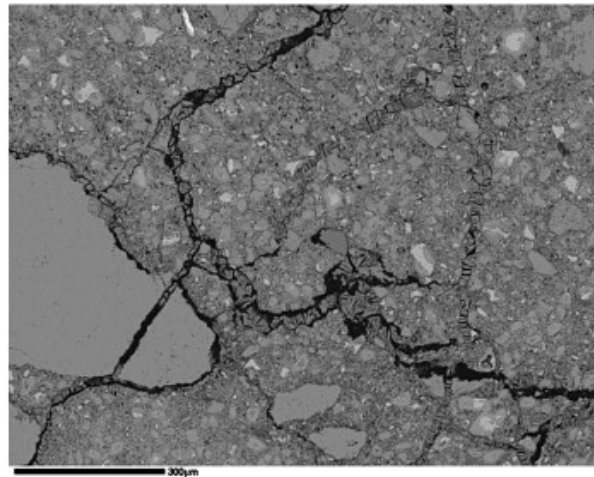
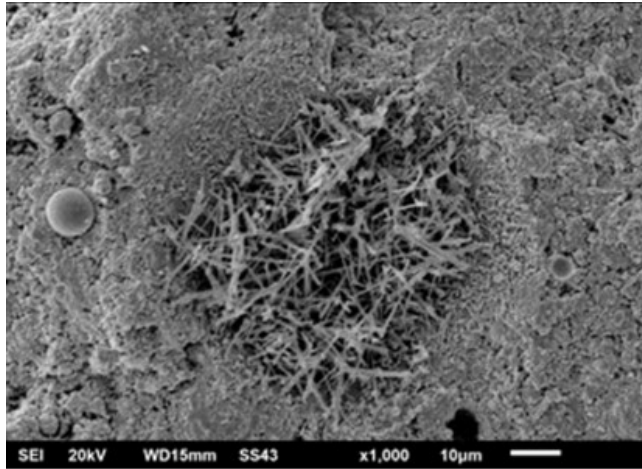
- réaliser une protection de surface imperméable sur le béton.
- améliorer l'imperméabilité du béton pendant la mise en œuvre du béton en ajoutant des additifs spécifiques.

Causes physiques : températures élevées



Lorsque le béton commence à se réchauffer, l'eau libre présente dans le béton va d'abord s'évaporer et être contenue dans les pores du béton. S'il n'y a pas de voie d'évacuation suffisante pour la vapeur, une **surpression** interne sera créée et détruira la matrice de béton. A' partir de température plus élevée, le C-S-H ($> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$) et l'hydroxyde de calcium ($> 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) commencent à se décomposer. La couleur change en rose-rouge. Fusion $> 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Réparation possible si la couleur n'a pas changé. (Pompiers... attention !)

Causes chimiques : Formation retardée de l'Ettringite



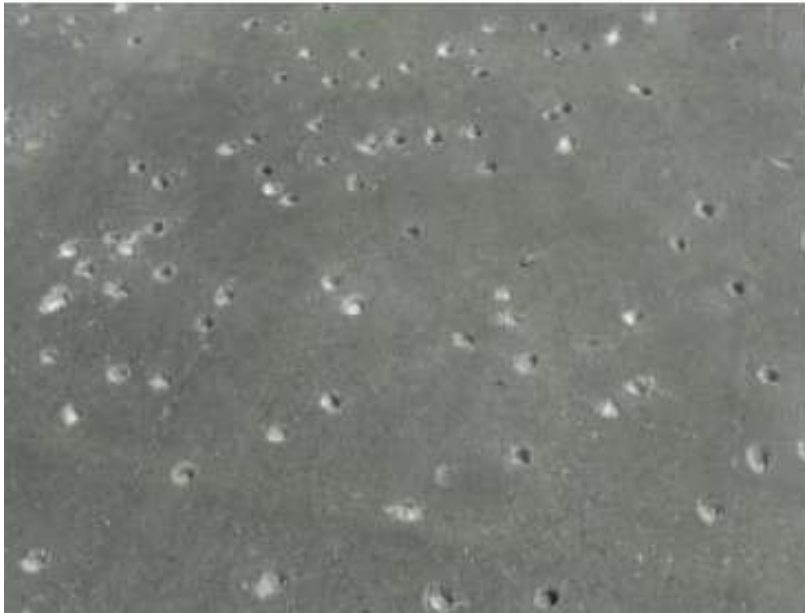
L'ettringite formée dans la structure en béton durci, soit de manière retardée (en raison de **températures élevées** lors de l'hydratation initiale), soit de manière additionnelle (contact avec des eaux contenant **sulfates**) peut, en raison de la croissance des cristaux ou de l'augmentation du volume, provoquer des contraintes qui dépassent la résistance à la traction de la structure et peuvent donc causer des dommages. (La transformation du monosulfate en ettringite, par exemple, entraîne une augmentation de volume 2,3 fois supérieure)

Causes chimiques : réaction alcali-agrégat (ASR)



L'ASR (Alkali-Silica Reaction) est une réaction provoquée par une combinaison **d'agréats réactifs, de valeurs de pH élevées (alcalines) et d'eau**. Un type de gel se forme à l'interface entre les particules de granulats et le mortier de ciment. Ce gel est très expansif en présence d'eau. Le processus de réaction peut prendre des années, mais une fois que la réaction est en cours, les forces d'expansion provoquent l'apparition de fissures à la surface.

Causes chimiques : réaction alcali-agrégat (ACR)



<https://civilblog.org/2023/09/12/alkali-aggregate-reaction-the-silent-threat-to-concrete/>

L'ACR (Alkali-Carbonate Reaction) est une réaction entre les alcalis contenus dans le mortier de béton et les composants chimiques des **roches carbonatées** telles que les calcaires dolomitiques. La réaction provoque la cristallisation et une expansion considérable, ce qui entraîne des dommages importants en peu de temps. L'ACR ne réagit pas aux efforts d'atténuation, la meilleure solution est donc d'éviter ces agrégats. Heureusement, ces granulats sont généralement reconnus comme impropres à l'utilisation, de sorte que les problèmes d'ACR dans le béton durci sont relativement rares.

Causes chimiques : eaux de faible dureté (lixiviation)



Leur "pauvreté" en sels signifie que ces eaux, qui s'écoulent contre des murs en béton représentés par des canaux, des conduites, etc. tendent à acquérir la teneur en sel du béton lui-même, par la dissolution de l'hydroxyde de calcium ou de la chaux libre (CaO et Ca(OH)_2).

Causes chimiques : dioxyde de carbone (corrosion causée (?) par la carbonatation)



La carbonatation est due à la pénétration du CO_2 dans le béton. Le phénomène consiste en la transformation du hydroxyde de calcium en carbonate de calcium en raison de la présence de dioxyde de carbone, dont la teneur dépend de l'environnement (zones plus ou moins industrialisées).

Pour les bétons courants, la carbonatation est maximale pour une humidité relative de l'ordre de 60 % et presque nulle en atmosphère sèche ou saturée en eau.

Ce phénomène est susceptible de se développer sur **tout type de structure en béton** dès que les conditions en termes de CO_2 et d'humidité sont rencontrées.

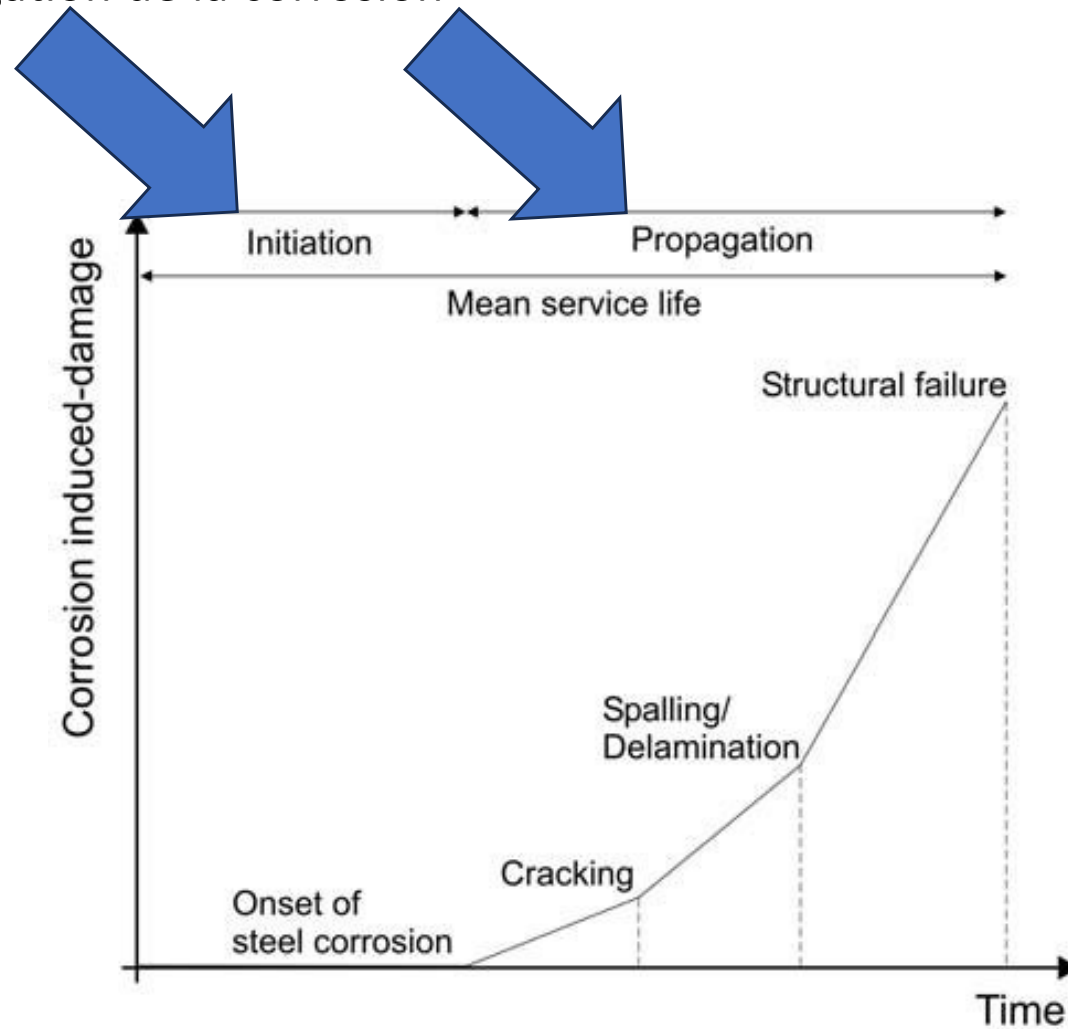
Causes chimiques : chlorures



Les chlorures sont naturellement présents dans l'eau de mer et, par conséquent, toutes les structures maritimes en béton armé sont potentiellement vulnérables à leur attaque. Les chlorures sont également présents artificiellement dans les **sels de déverglaçage** et, lorsqu'ils sont utilisés, rendent toutes les structures en béton armé de type autoroutier particulièrement vulnérables à la dégradation.

Corrosion des barres d'armature

Initiation e propagation de la corrosion



Ferreira, Miguel & Jalali, Said. (2006). Probability-based durability design of concrete structures in marine environment.

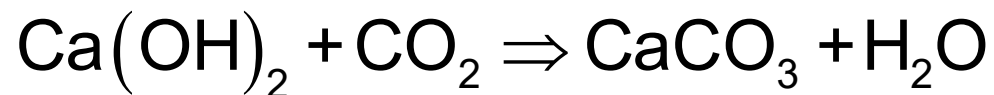
Carbonatation

Corrosion causée (?) par la carbonatation

Le dioxyde de carbone contenu dans l'atmosphère réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former du carbonate de calcium et de l'eau.

pH environ 12,6

Diminution du pH



pH inférieur à 11,5 → Dépassivation

La phénolphtaléine (indicateur chimique) devient violette au contact d'une matière dont le pH est supérieur à environ 9,2 et reste incolore pour des valeurs de pH inférieures.

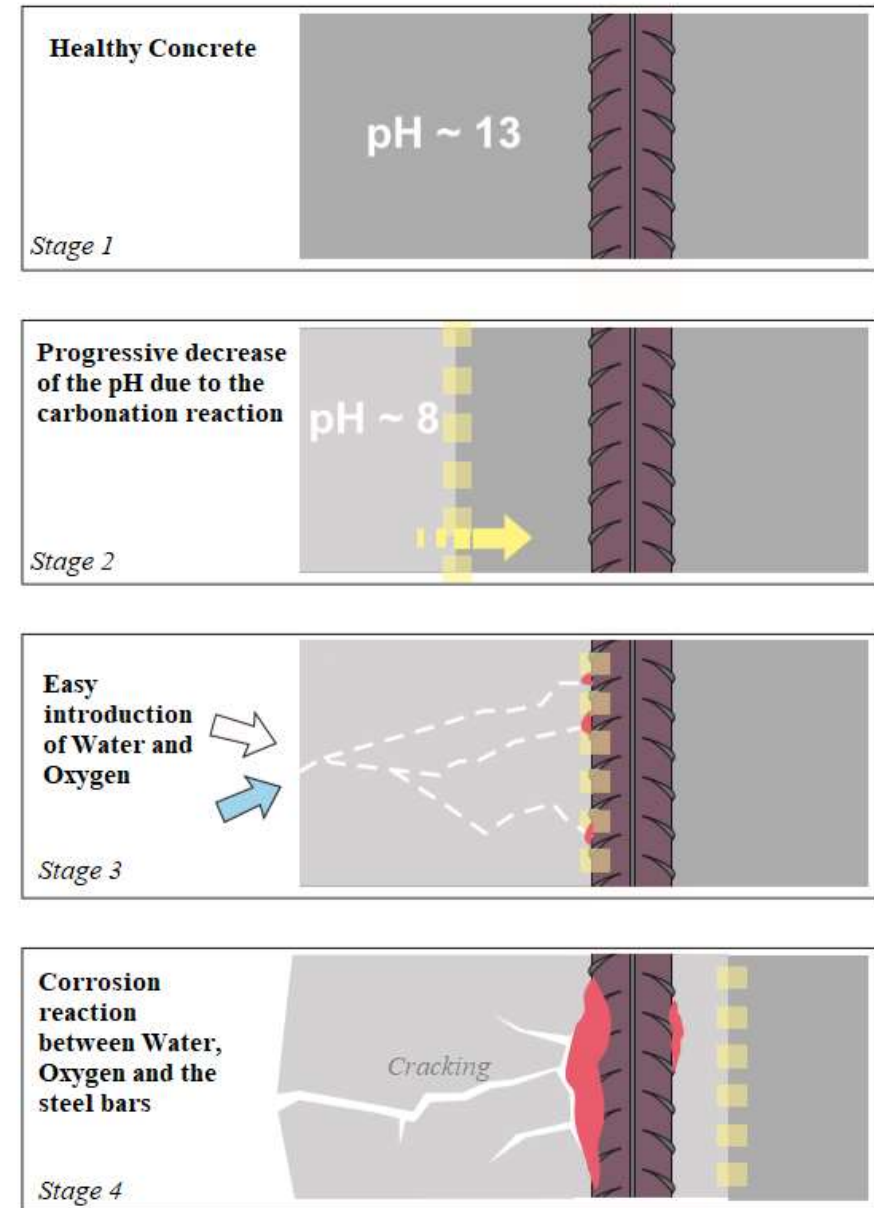


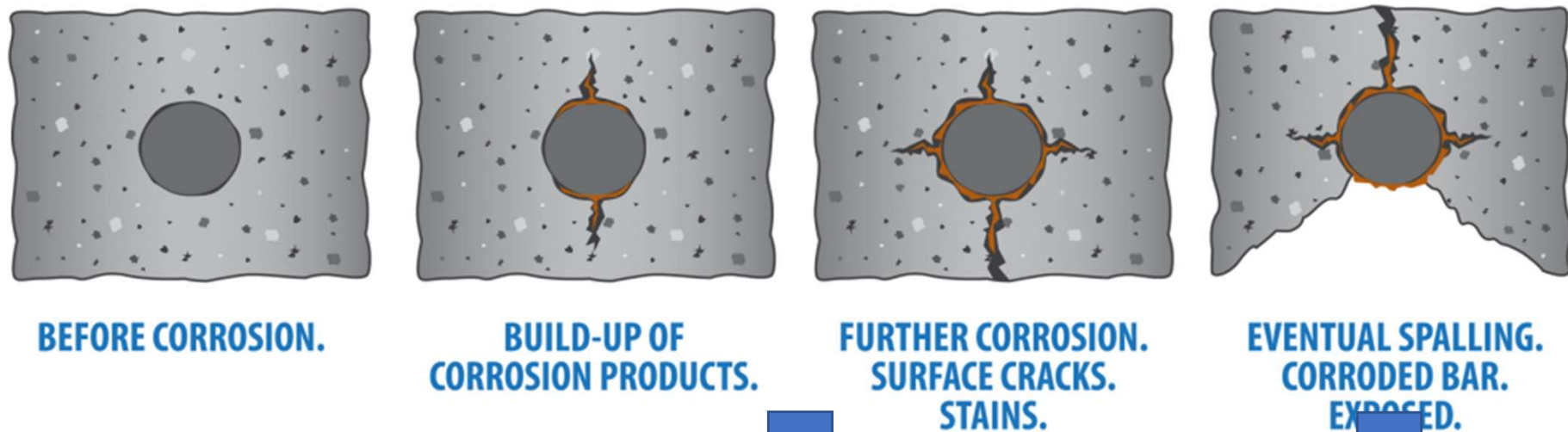
Le dioxyde de carbone est présent dans l'eau et dans l'air à des pourcentages variables en fonction des conditions environnementales et de la pollution.

Lorsque le dioxyde de carbone entre en contact avec des produits en béton armé, il **neutralise les composants alcalins** présents dans le béton et le pH passe de valeurs >13 à des valeurs beaucoup plus bas.

Lorsque le front de carbonatation atteint les barres d'armature, le film protecteur passif de l'acier **est rompu** et, en présence d'eau et d'oxygène, la corrosion peut commencer.

Comme les produits de corrosion de l'acier occupent un **volume plus important**, certaines parties du béton sont soumises à des contraintes de traction et se fissurent.





The corrosion cycle of steel begins with the rust expanding on the surface of the bar and causing cracking near the steel/concrete interface. As time marches on, the corrosion products build up and cause more extensive cracking until the concrete breaks away from the bar, eventually causing spalling.

<https://www.civilengineeringforum.me/carbonation-and-corrosion/>

Splitting



Spalling



Humidité relative

La vitesse de pénétration de la carbonatation varie en fonction de l'humidité du béton, qui est en équilibre avec l'humidité de l'atmosphère (à laquelle on se réfère souvent pour définir les conditions d'humidité du béton). On remarque l'extrême importance du microclimat dans les situations concrètes, c'est-à-dire les conditions d'humidité et de température qui sont créées dans les différentes parties de la structure. Par exemple, dans le cas d'un mur extérieur d'un bâtiment, dans une zone abritée de la pluie, le taux de pénétration est toujours beaucoup plus élevé que dans la zone non protégée. La plage d'humidité relative la plus dangereuse pour la carbonatation se situe entre **50 et 80 %**.

Température

L'augmentation de la température, si toutes les autres conditions sont égales, augmente la vitesse de pénétration.

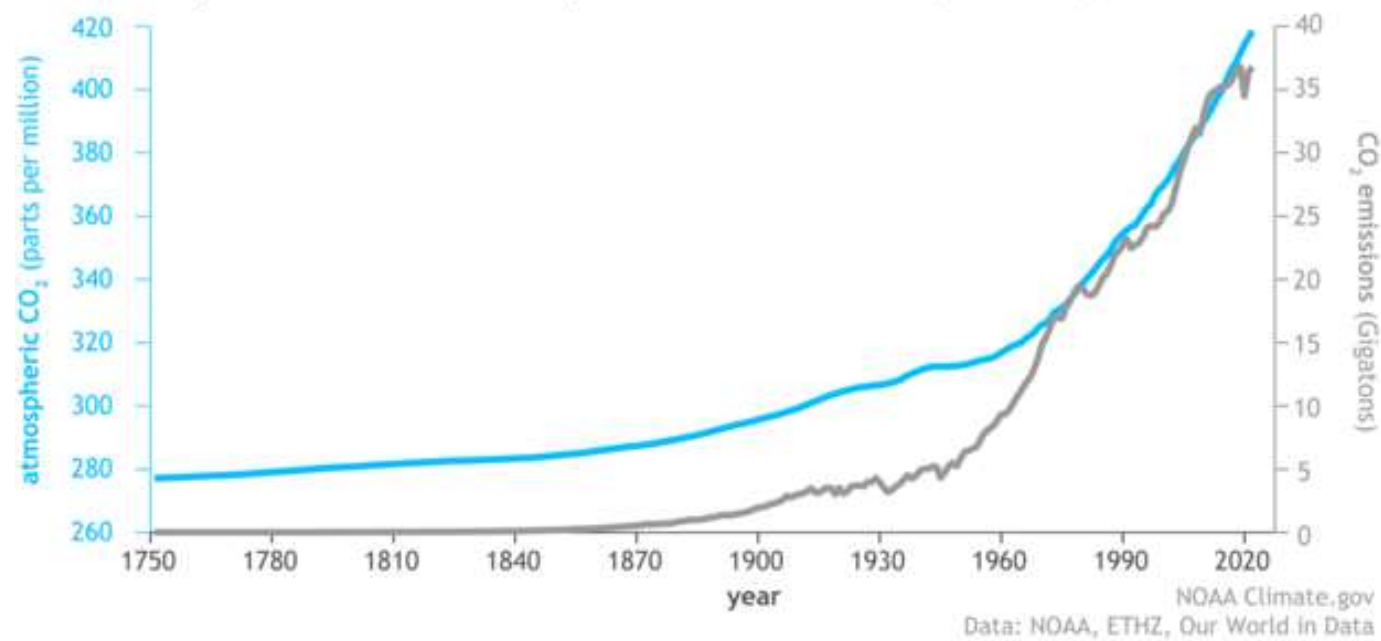
Rapport E/C

La diminution du rapport E/C, qui entraîne une réduction de la porosité capillaire de la pâte de ciment, ralentit la pénétration de la de la carbonatation.

Concentration de dioxyde de carbone

Plus la teneur en CO₂ de l'atmosphère augmente, plus la vitesse de pénétration du front de carbonate augmente.

Global atmospheric carbon dioxide compared to annual emissions (1751-2022)



Formule complète (?) (trop compliqué...)

$$x(t) = \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot (k_t \cdot R_{Acc,0}^{-1} + \varepsilon_t) \cdot C_s} \cdot \sqrt{t} \cdot W(t)$$

3 **4** **2** **1** **2** **5** **6**

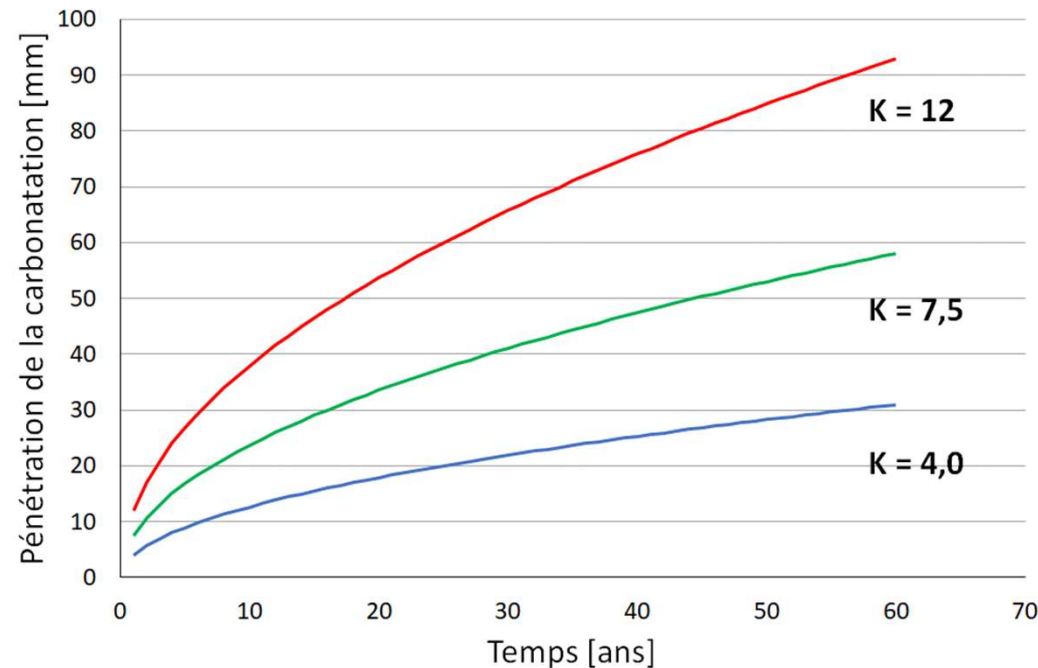
- 1** Inverse de la résistance à la carbonatation (essai de laboratoire)
- 2** Transformation de l'inverse de la résistance des conditions de laboratoire aux conditions naturelles (avec HR = 65%)
- 3** Permet de prendre en compte l'influence de l'humidité réelle
- 4** Permet de prendre en compte l'influence de la période de curage
- 5** Le paramètre C_s représente la concentration de CO_2 dans l'air due à l'atmosphère normale et aux éventuelles sources d'émission
- 6** Il prend en compte les conditions méso-climatiques dues à l'humidification de la surface du béton (en fonction du nombre de jours de pluie et de la probabilité que la pluie atteigne l'élément).

Formule simplifiée

Béton compacte, pas fissuré

$$x(t) = K \cdot t^{1/p} = \dots = K \cdot \sqrt{t}$$

p = paramètre dépendant de la porosité du béton

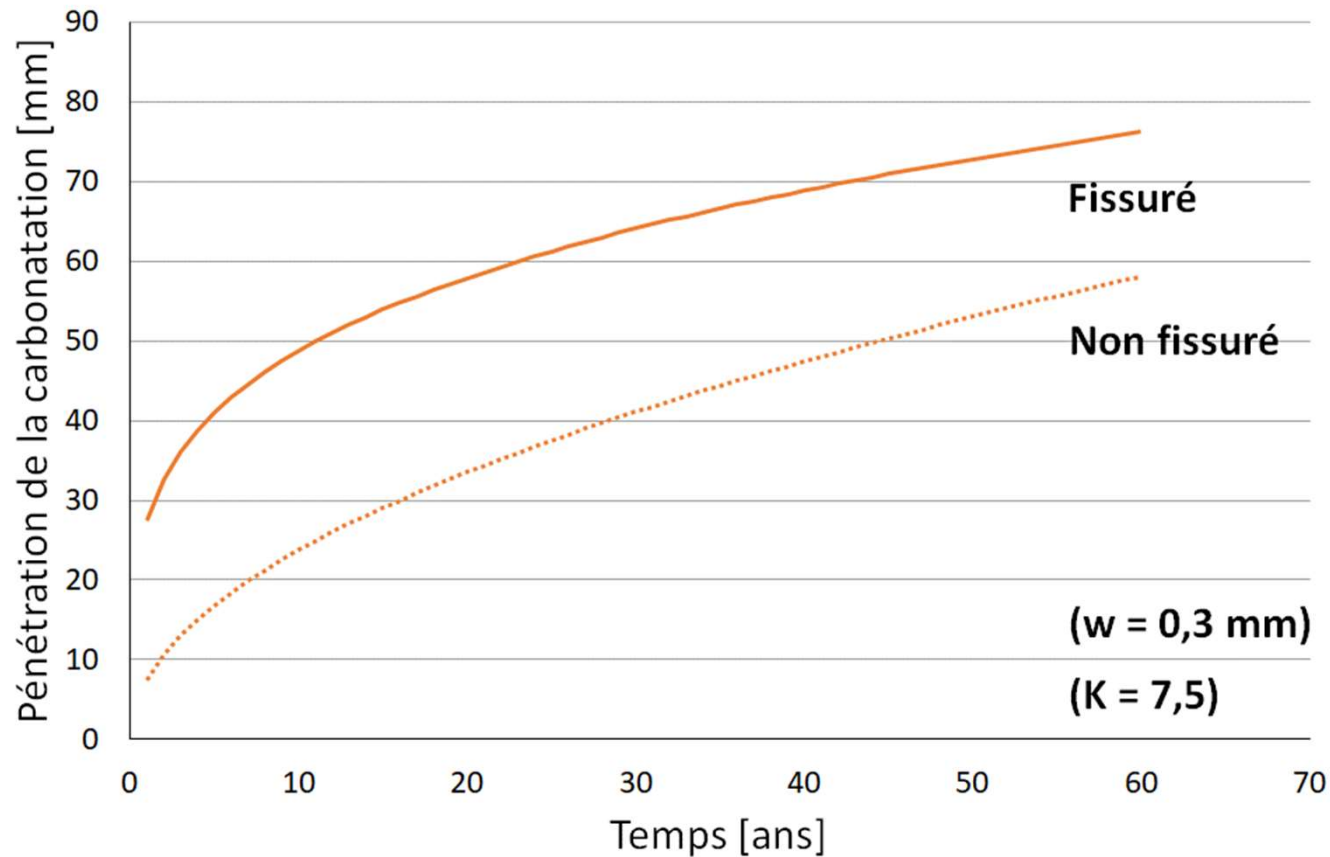


Les valeurs de K trouvées pour des structures réelles exposées à l'atmosphère et protégées de la pluie varient de 2 à 15 mm/an^{1/2} et plus précisément : 2 < K < 6 pour les bétons de haute compacité (c.-à-d. avec un faible w/c et bien compactés et durcis) avec un contenu en ciment supérieure à 350 kg/m³ ; 6 < K < 9 pour les bétons de compacité moyenne K > 9 pour les bétons poreux avec une teneur en ciment inférieure à 250 kg/m³.

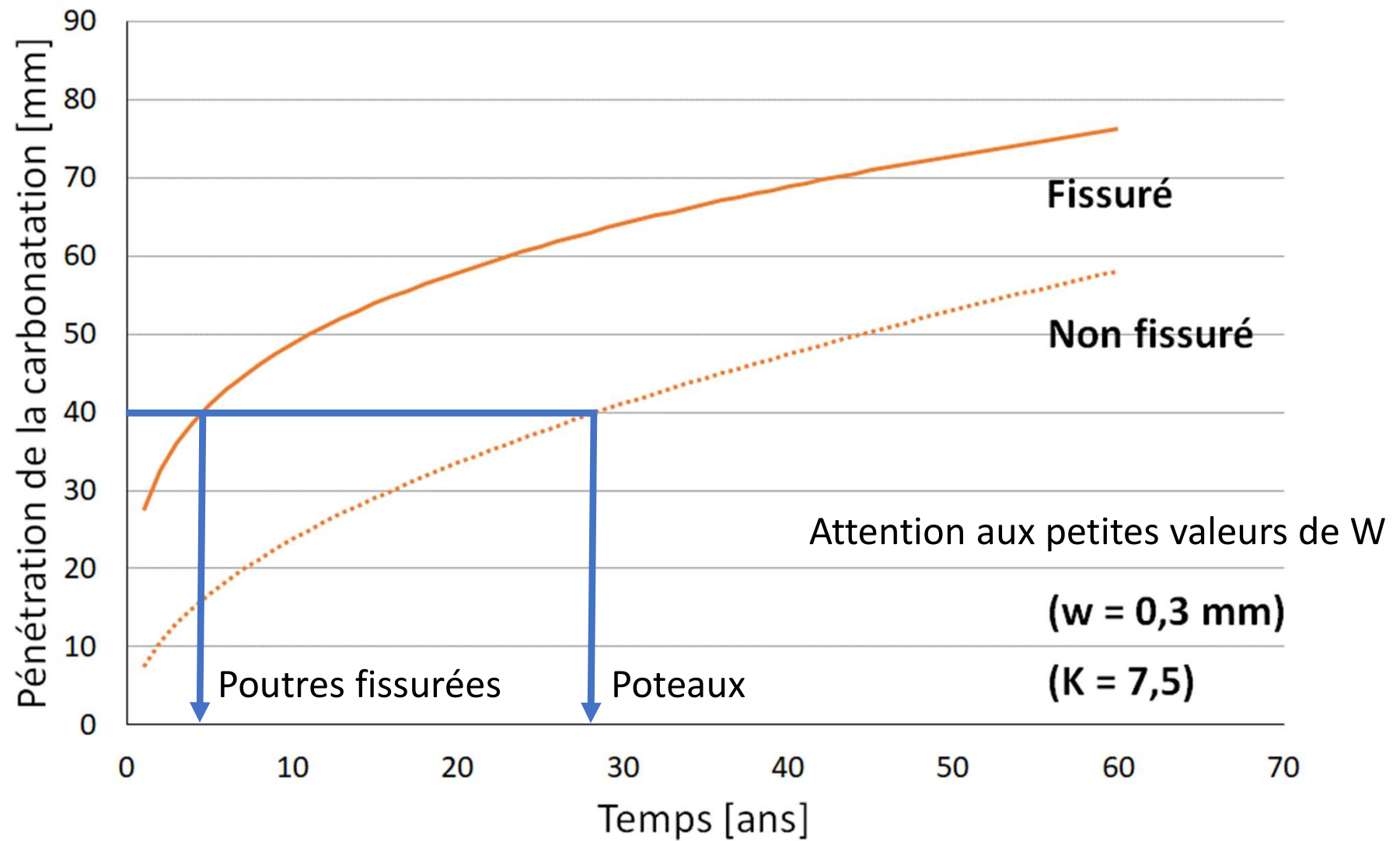
Béton fissuré

$$x(t) = 50 \cdot \sqrt{w} \cdot \sqrt[4]{t} \quad (\text{Vesikari, 1988})$$

w = largeur de la fissure [mm]



Temps de initiation à la corrosion



Si 40 mm est l'enrobage des barres d'acier

Chlorures

Corrosion causée par les chlorures

L'attaque corrosive est déclenchée lorsque la concentration de chlorures en contact avec l'armature atteint une valeur suffisamment élevée (**teneur critique**). En plus, la destruction du film dépend non seulement de la concentration en chlorures, mais aussi de la **teneur en oxygène** à la surface des barres.

Par conséquent, l'attaque peut avoir lieu pour des teneurs en chlorures relativement faibles sur des structures exposées à l'atmosphère, où l'oxygène atteint facilement l'armature ; pour des teneurs beaucoup plus élevées sur des structures immergées dans la mer ou dont l'apport d'oxygène est entravé.



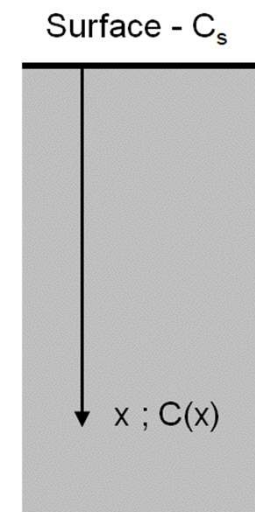
<https://www.ctlgrouppqatar.com/single-post/2019/02/02/chloride-attacks-on-concrete-structures>

L'expérience des structures marines et des structures exposées à l'action des sels antigel montre que, même en présence de mécanismes de pénétration **autres** que la diffusion, il est possible de prédire avec une bonne approximation les profils de concentration de chlorure au cours du temps, en utilisant une équation **formellement identique** à la seconde loi de Fick dans laquelle C est la concentration totale des chlorures et D est un coefficient de diffusion effectif (ou apparent) dérivé expérimentalement.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

$$C(x, t) = C_s \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{ce} \cdot t}} \right)$$

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^z e^{-\eta^2} d\eta$$



La connaissance a priori des valeurs C_s et D_{ce} et leur constance dans le temps et l'espace ne sont pas acquises, mais peuvent varier dans une **large fourchette**. La concentration des chlorures de surface C_s dépend de la composition du béton, de la position de la structure, de l'emplacement et de l'orientation de sa surface, du **micro-environnement** dans lequel elle évolue, de la concentration de chlorures dans l'environnement et en général des conditions d'exposition en ce qui concerne la direction, de la vitesse et de l'intensité du vent et de la pluie.

Dans le cas des dalles de pont, la classification suivante est utilisée aux États-Unis classification pour l'agressivité de l'environnement (les valeurs se réfèrent à 1 m³ de béton ou sont exprimées en **pourcentage du poids du béton**) :

	Absolu	En pourcentage
Faible	0.0 ÷ 2.4 Kg/m ³	0.00 ÷ 0.10 %
Moyenne	2.4 ÷ 4.8 Kg/m ³	0.10 ÷ 0.20 %
Élevé	4.8 ÷ 5.9 Kg/m ³	0.20 ÷ 0.25 %
Très élevé	5.9 ÷ 8.9 Kg/m ³	0.25 ÷ 0.37 %

Les valeurs du coefficient de diffusion apparent D_{ce} varient généralement de 10⁻¹³ m²/s à 10⁻¹¹ m²/s en fonction des caractéristiques du béton. D_{ce} dépend de la **structure poreuse** du béton et donc de tous les facteurs qui la déterminent tels que le rapport w/c, le compactage, le durcissement et la présence de fissures.

Béton fissuré

Il convient souvent de prendre en compte la variation du coefficient de diffusion du coefficient de diffusion apparent causée par la fissuration du béton et de prévoir ainsi plus rigoureusement la pénétration des chlorures sans toutefois devoir utiliser des méthodes numériques avancées ; un modèle simplifié a donc été présenté pour prédire la pénétration des chlorures dans le béton, appelé **Simplified Smeared Approach** (SSA) (SSA) (Boulfiza et al., 2003)

$$D_{av} = D_{ce} + \frac{w}{S_{m\theta}} \cdot D_{cr}$$

D_{av} = coefficient de diffusion moyen [cm^2/s]

D_{ce} = coefficient de diffusion du béton non fissuré [cm^2/s]

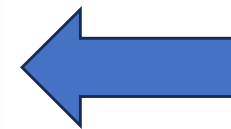
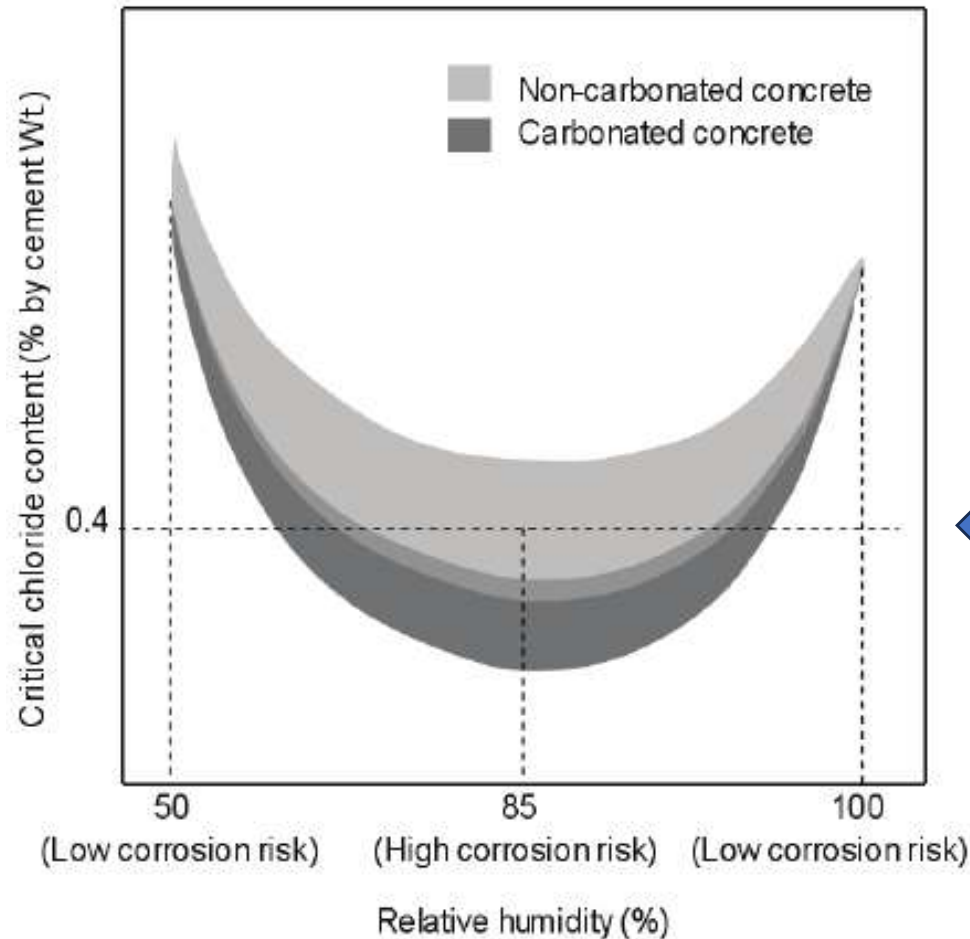
D_{cr} = coefficient de diffusion à l'intérieur de la fissure [cm^2/s]

w = largeur de la fissure

$S_{m\theta}$ = distance entre les fissures

La valeur de D_{cr} est généralement supposée égale à $5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ (Boulfiza et al., 2003). Il s'agit d'un choix heuristique principalement basé sur un jugement d'ingénieur.

Lorsque la concentration d'ions de chlore atteint une valeur comprise entre 0,2 % et 0,6 %, la corrosion peut se déclencher. Par convention, nous pouvons supposer une **valeur seuil de 0,4 % du ciment** (concentration critique).

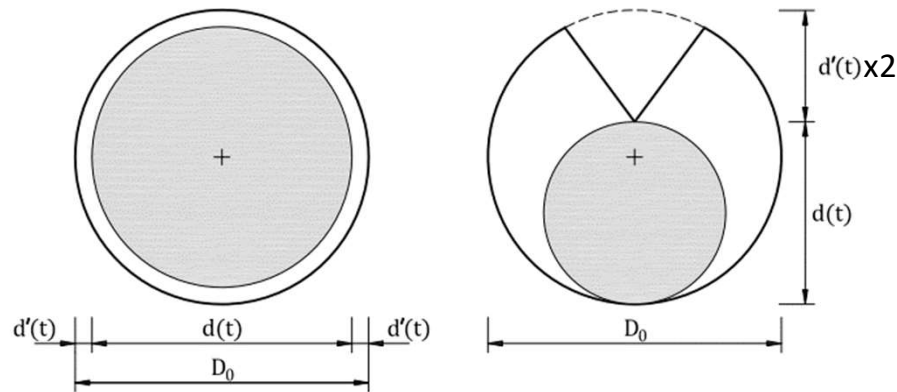


Rupture du film de passivation

Yoon, I & Koenders, Eduardus. (2009). Theoretical Time Evolution of Critical Chloride Content in Concrete. SDHM Structural Durability and Health Monitoring. 117. 1-19.

Modélisation de la corrosion

Lorsque le front de carbonatation, et/ou la teneur critique en chlorure, ont atteint les armatures, le phénomène de corrosion commence, car le film passivant est détruit. Selon le modèle de dégradation des armatures proposé dans un rapport RILEM (Sarjae & Vesikari, 1996), et également utilisé par d'autres auteurs, la réduction de la surface de la section résistante des armatures due à la corrosion peut être exprimée par la relation suivante :



$$A_s(t) = \begin{cases} \frac{N_s \cdot \pi \cdot d_0^2}{4} & t \leq t_0 \\ \frac{N_s \cdot \pi \cdot [d_0 - 2 \cdot d'(t)]^2}{4} & t > t_0 \end{cases}$$

N_s = le nombre de barres d'armature

d_0 = le diamètre initial des armatures [mm]

$d'(t)$ = la profondeur de la corrosion dans l'armature [mm]

t = l'instant générique [années]

t_0 = le temps d'initiation de la corrosion [années]

La réduction du diamètre de l'armature corrodée, $d'(t)$, à l'instant générique t , peut être estimée à l'aide de la loi de Faraday :

$$d'(t) = 0,0116 \cdot i_{\text{corr}} \cdot (t - t_0)$$

$$d'(t) = v_{\text{corr}} \cdot (t - t_0)$$

La constante 0,0116 est un facteur de conversion pour passer de $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ à $\mu\text{m}/\text{an}$. La loi de Faraday indique qu'une vitesse de corrosion de $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ correspond, dans le cas de l'acier, à une perte de d'environ $11,6 \mu\text{m}/\text{an}$.

La vitesse de la corrosion dépend fortement des conditions **environnementales** (humidité relative, température, etc.), du **type d'attaque** chimique et physique (carbonatation, chlorure, sulfate, etc.), des caractéristiques du béton et de l'acier, et de l'ouverture de la fissure.

Taux de corrosion de l'acier placé dans un béton carbonaté contaminé par des chlorures (rapport RILEM 14 (Sarja & Vesikari, 1996)).

Humidité relative %	Béton carbonaté $\mu\text{m}/\text{an}$	Béton carbonaté + chlorures $\mu\text{m}/\text{an}$
99	2	34
95	50	122
90	12	98
85	3	78
80	1	61
75	0.1	47
70	0	36
65	0	27
60	0	19
55	0	14
50	0	9

Un autre chercheur (Andrade et al., 1994) recommande d'utiliser les valeurs moyennes suivantes pour les vitesses de corrosion :

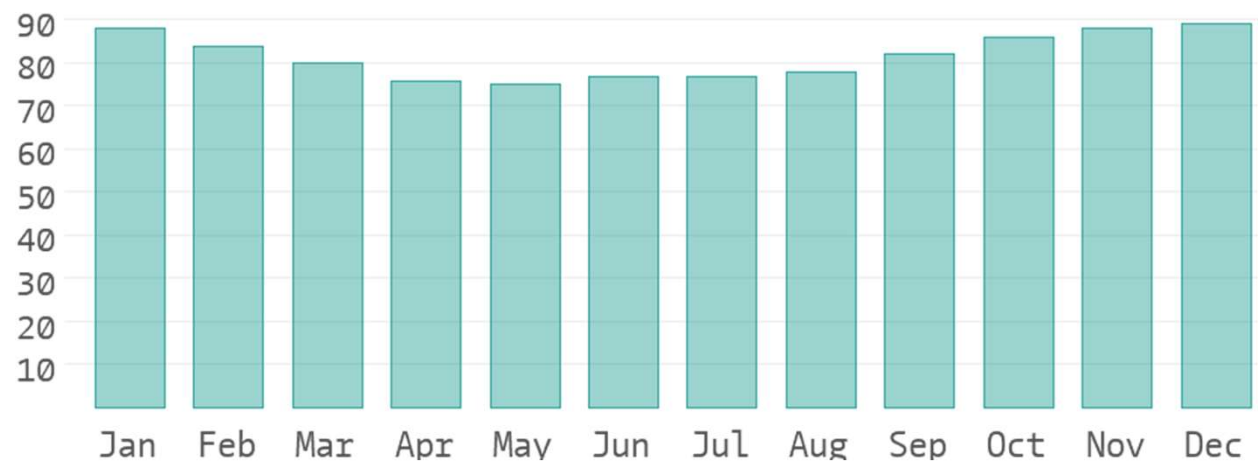
Lorsque la seule action agressive est la carbonatation :

- pour HR = 90-98%, vitesse de corrosion = 5-10 $\mu\text{m}/\text{an}$
- pour HR < 85%, vitesse de corrosion $\leq 2 \mu\text{m}/\text{an}$

Dans les environnements contaminés par le chlorure

- pour HR = 100 %, vitesse de corrosion $\leq 10 \mu\text{m}/\text{an}$
- pour HR = 80-95 %, vitesse de corrosion = 50-100 $\mu\text{m}/\text{an}$
- pour HR < 70 %, vitesse de corrosion $\leq 2 \mu\text{m}/\text{an}$.

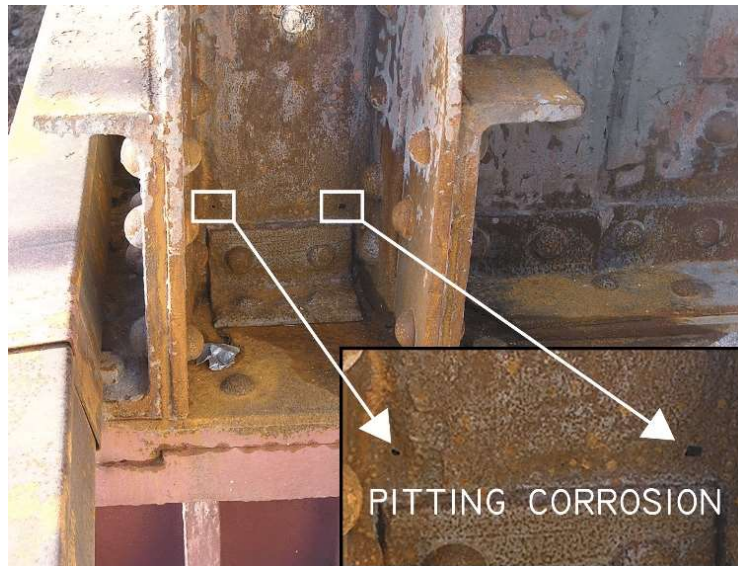
Humidité relative - Belgique



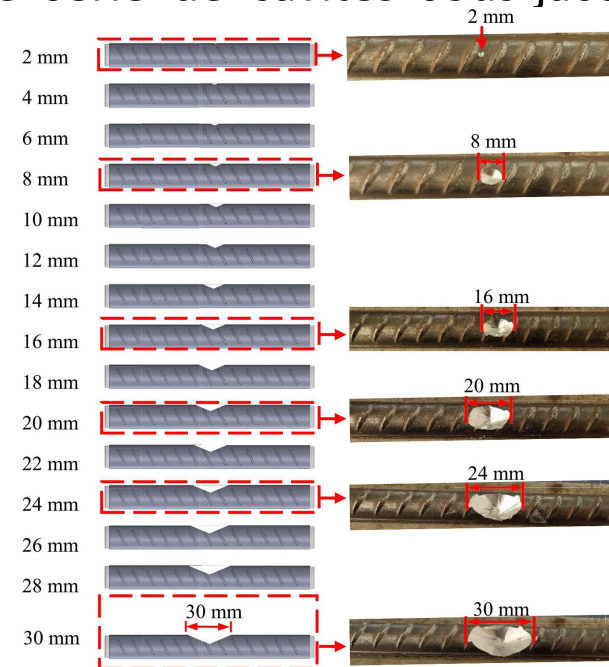
<https://www.donneesmondiales.com/europe/belgique/climat.php>

Corrosion par piqûres (pitting)

La corrosion par piqûres est causée par une déchirure **très localisé** de la couche passive. Ce phénomène résulte de l'action d'éléments fortement activateurs tels que les **ions chlorure (Cl-)** ou **fluorure (F-)**. Le phénomène de piqûre est reconnaissable aux points (également appelés piqûres) qui se forment à la surface du matériau. Ces points sont caractérisés par un cratère (appelé zone anodique) entouré d'un halo (appelé zone cathodique). Elle se manifeste simplement en surface par de petits trous (parfois invisibles à l'œil nu) entourés d'un halo sombre et d'une série de cavités sous-jacentes qui se développent en profondeur.



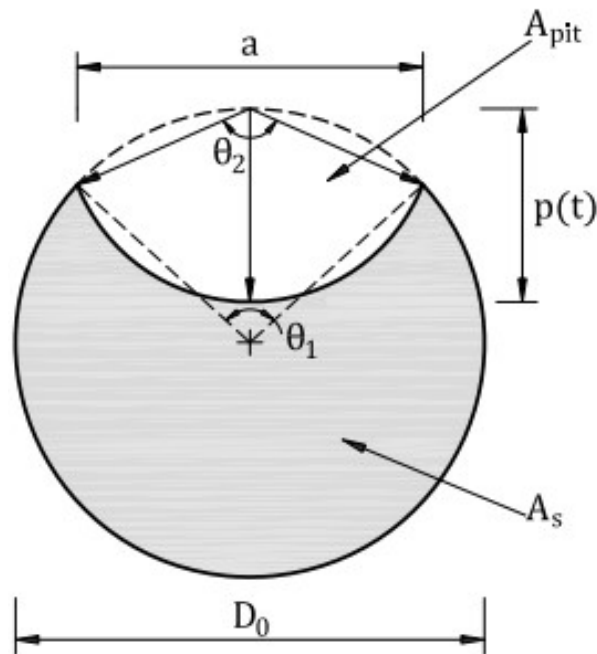
Kossakowski, Paweł. (2019). Modelling the Damage of Structural Components with Macrostructure Defects. Metals. 9. 1238.



Dodds, Wayne & Christodoulou, Christian & Goodier, Chris & Austin, Simon & Dunne, David. (2017). Durability performance of sustainable structural concrete: Effect of coarse crushed concrete aggregate on rapid chloride migration and accelerated corrosion. Construction and Building Materials. 155. 511-521.

Dans le cas de la corrosion par piqûres, la profondeur maximale d'avancement atteinte par la corrosion localisée dans une barre d'armature P_{\max} est normalement plus grande que dans le cas de la corrosion généralisée, c'est-à-dire :

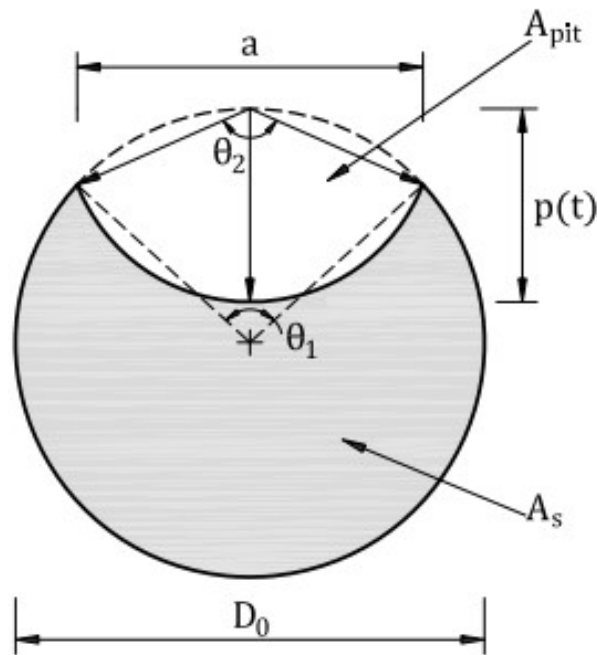
$$p(t) = d'(t) \cdot R$$



Pour la valeur de R (pitting factor), différentes indications sont données dans la littérature. Selon Gonzalez et al. (1995), ce paramètre varie entre **4 et 8**, tandis que selon Darmawan et Stewart (2007), la valeur varie entre **8 et 11**. Le paramètre R est donc assez incertain, en effet sa valeur peut varier dans une fourchette très large.

Pour l'évaluation de la surface effective d'une barre soumise à une corrosion localisée, le modèle dont la géométrie est décrite à la figure est supposé valide. Les relations géométriques permettent d'obtenir les éléments suivants :

Formules pour modéliser la corrosion par piqûres

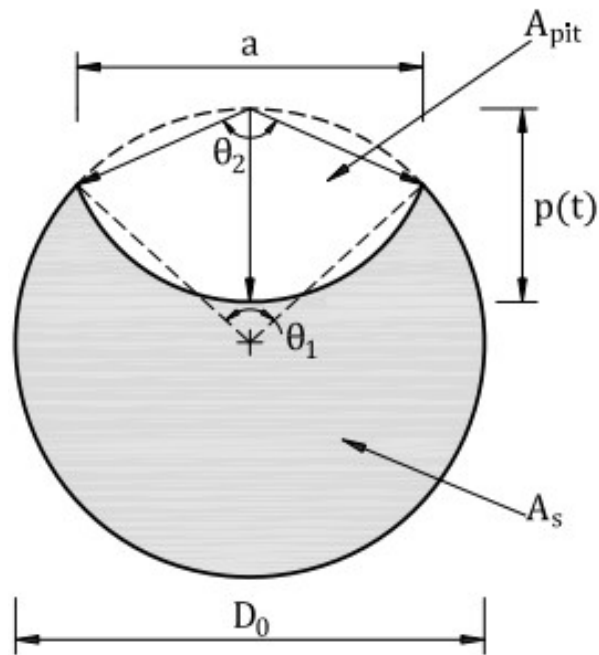


$$A_{pit}(t) = \begin{cases} A_1 + A_2 & \text{si } p(t) \leq \frac{D_0}{\sqrt{2}} \\ \frac{\pi \times D_0^2}{4} - A_1 + A_2 & \text{si } \frac{D_0}{\sqrt{2}} < p(t) \leq D_0 \\ \frac{\pi \times D_0^2}{4} & \text{si } p(t) > D_0 \end{cases}$$

$$\theta_1(t) = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{a(t)}{D_0}\right)$$

$$a(t) = 2 \cdot p(t) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{p(t)}{D_0}\right)^2} \quad \theta_2(t) = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{a(t)}{p(t)}\right)$$

Formules pour modéliser la corrosion par piqûres



$$A_1(t) = 0,5 \cdot \left[\theta_1(t) \cdot \left(\frac{D_0}{2} \right)^2 - a(t) \cdot \left| \frac{D_0}{2} - \frac{p(t)^2}{D_0} \right| \right]$$

$$A_2(t) = 0,5 \cdot \left[\theta_2(t) \cdot p(t)^2 - a(t) \cdot \frac{p(t)^2}{D_0} \right]$$

$$A_s(t) = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} - A_{pit}(t)$$

Bibliographie

Boulfiza M., Sakai K., Banthia N. and Yoshida H. (2003), "Prediction of Chloride Ions Ingress in Uncracked and Cracked Concrete", *ACI Materials Journal*, Vol. 100, No. 1, pp. 38-48.

Darmawan M. S. and Stewart M. G. (2007), "Effect of Pitting Corrosion on Capacity of Prestressing Wires", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 59, No. 2, pp. 131-139.

Gonzales J. A., Andrade C., Alonso C. et Feliu S. (1995), "Comparison of Rates of General Corrosion and Maximum Pitting Penetration on Concrete Embedded Steel Reinforcement", *Cement and Concrete Research*, vol. Embedded Steel Reinforcement", *Cement and Concrete Research*, Vol 25, No. 2, pp. 257-264

Sarja A. and Vesikari E. (1996), *RILEM Report 14: Durability Design of Concrete Structures*, E & FN Spon, London.

Vesikari, E. (1988). *Service life of concrete structures with regard to corrosion of reinforcement*. VTT Technical Research Centre of Finland. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Tutkimuksia - Research Reports No. 553

Consignes pour le devoir

Consignes pour le devoir

- Reprenez les sections aux points où vous avez effectué les vérifications structurelles aux ELU du moment de flexion et du cisaillement. Définissez l'enrobage en béton pour chaque barre considérée.
- Pour chaque barre, prévoir le temps d'initiation de la carbonatation ($K = 7$)
- Pour chaque barre, prévoir le temps d'initiation de la corrosion par le chlorure ($C_s = 0,15 \%$, $D = 5 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$)
- A partir du temps d'initiation, évaluer la réduction des diamètres des différentes armatures au cours du temps ($v_{\text{corr}} = 2 \text{ } \mu\text{m}/\text{an}$ si carbonatation seule ou $40 \text{ } \mu\text{m}/\text{an}$ si carbonatation + chlorure).
- Revérifier chaque année d'analyse jusqu'à ce que la vérification ne soit plus satisfaite.
- Refaire l'analyse avec 1 cm en moins de enrobage. 2cm en moins. Etc.
- Résumer les analyses dans des graphiques. Explorer et commenter l'importance de l'enrobage, du changement climatique, de l'effet non-linéaire de W.