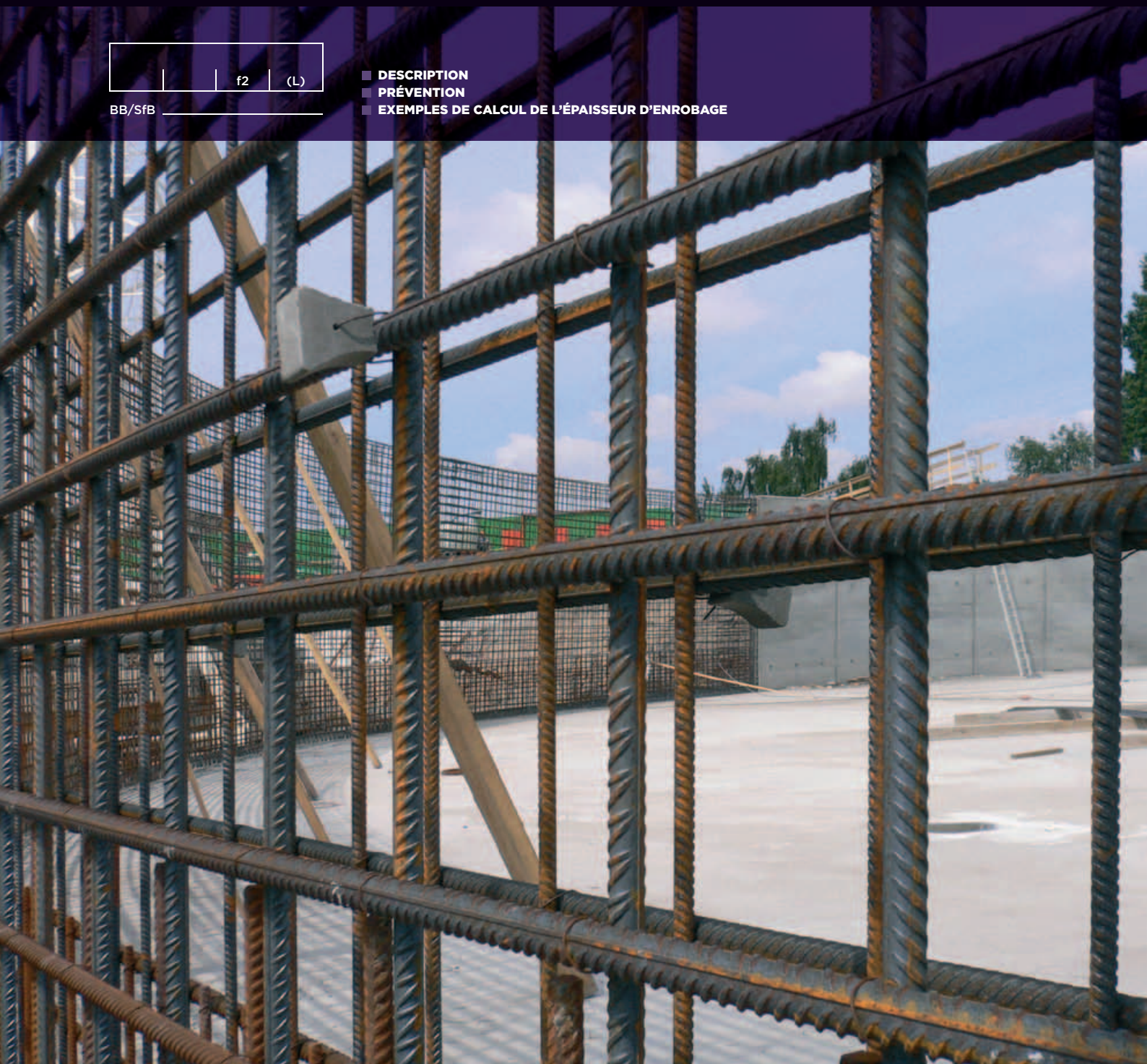
LA CORROSION DES ARMATURES DES BÉTONS ARMÉS ET PRÉCONTRAINTS

TECHNOLOGIE | NOVEMBRE 2008



f2 (L)

BB/SfB

- **DESCRIPTION**
- **PRÉVENTION**
- **EXEMPLES DE CALCUL DE L'ÉPAISSEUR D'ENROBAGE**

La corrosion regroupe l'ensemble des phénomènes chimiques et électrochimiques constituant la détérioration de matériaux, en général métalliques, sous l'action du milieu environnant. Il est bien connu que l'acier se dissout en présence d'eau et de nombreuses solutions aqueuses non oxydantes. Cette corrosion est très vive dans les solutions acides et diminue d'intensité au fur et à mesure que le pH de la solution augmente, et devient pratiquemment nulle aux pH voisins de 9 à 13. Pour des pH très élevés, supérieurs à environ 13, les solutions peuvent à nouveau être corrodantes.

Une armature dans un béton est protégée par celui-ci tant que le pH reste à une valeur comprise entre 9 et 13. Dans le cas contraire, comme pour un béton carbonaté, la dissolution de l'acier est susceptible de fissurer ou de faire éclater le béton d'enrobage si l'épaisseur ou la qualité de ce dernier n'est pas suffisante.

Il s'agit du défaut de durabilité le plus répandu du béton alors que les causes et les moyens de prévention en sont simples et parfaitement connus. Les réparations des dégradations sont toujours délicates et dispendieuses alors que le coût de la durabilité en la matière est négligeable lorsque les mesures sont prises dans les phases de conception, de réalisation et de contrôle du ferraillage des bétons armés et précontraints.

1. DESCRIPTION

Lorsqu'une armature est placée dans le béton frais, on obtient une combinaison de matériaux favorable à la durabilité. En fait, le béton, grâce à son pH élevé, protège l'acier de sa tendance naturelle à la dégradation en présence d'humidité. La tendance naturelle de l'acier est de se dissoudre dans l'eau. Il s'y produit une oxydation à un endroit ($Fe \rightarrow Fe^{n+} + ne^-$) de l'élément métallique et une réduction à un autre endroit ($O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ en présence d'oxygène et $2H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^- + H_2$ en l'absence d'oxygène). Entre ces 2 endroits, naît une différence de potentiel électrique qui agit comme force motrice. Si les produits formés étaient progressivement éliminés, le processus conduirait à la dissolution complète de l'acier. Heureusement, dans le cas de l'armature entourée par du béton, il y a passivation de l'acier : il s'agit de la création d'une couche protectrice par le dépôt d'oxydes stables. En effet, les réactions principales d'oxydoréduction sont suivies de réactions secondaires de formation des produits de corrosion à la surface du métal :

$$Fe^{n+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_n$$
$$2Fe(OH)_n \leftrightarrow Fe_xO_y + H_2O$$

Les oxydes Fe_3O_4 et Fe_2O_3 formés à la surface de l'armature ont pour effet de freiner les réactions de dissolution par un effet d'«écran». Ceci se produit pour autant que ces produits soient stables. Ils sont d'autant plus stables qu'ils sont entourés d'hydroxydes – en l'occurrence le $Ca(OH)_2$ du béton – et que le béton sert d'écran aux autres éléments agressifs de l'environnement (ion Cl^-...). Nous nous trouvons, ici, avec un béton dont le pH est nettement supérieur à 9.

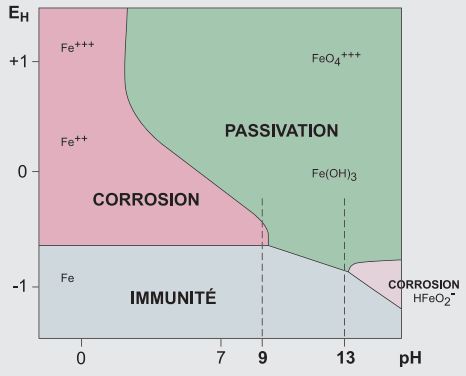
La corrosion des armatures survient lorsque la protection assurée par le béton n'est plus efficace. Ceci se produit dans les deux cas suivants :

- Lorsque le béton qui recouvre l'armature a été **carbonaté** (réaction du CO_2 de l'air avec le $Ca(OH)_2$ du béton $\Rightarrow$ formation de $CaCO_3$ et baisse du pH à une valeur inférieure à 9), la stabilité de l'écran n'est plus assurée et la dissolution du fer peut se produire. Cette dissolution du fer conduit à la formation de produits de corrosion (rouille) beaucoup plus volumineux que le volume initial de fer. Il en résulte une expansion et un éclatement du béton. L'élimination physique de la couche de protection en béton conduit à un accroissement de la vitesse de corrosion de l'armature.
- Lorsque des ions agressifs (comme des **chlorures**) ont traversé l'épaisseur du béton d'enrobage et entrent en contact avec l'armature.

Ces 2 phénomènes responsables de la corrosion des armatures sont expliqués plus en détail ci-après.

DIAGRAMME DE POURBAIX

du système Fe-H_2O à 25 °C



Dans un béton sain (pH de l'ordre de 13 et température de 25 °C), les armatures sont dans un état électrochimique qui empêche la corrosion (immunité ou création d'un film passif). Si le pH descend en dessous d'une valeur limite d'environ 9, la corrosion peut se déclencher selon le potentiel. Un béton sain est donc un milieu protecteur pour les armatures en acier, toute baisse de pH significative va rendre possible une corrosion des aciers.

1.1. LA CORROSION INITIÉE PAR LA CARBONATATION

a. Processus de carbonatation (phase d'initiation)

La réaction du dioxyde de carbone (CO_2) issu de l'air avec les substances alcalines du béton s'appelle la carbonatation. La combinaison du dioxyde de carbone avec l'hydroxyde de calcium -l'hydroxyde de calcium encore appelé portlandite est formé lors des réactions d'hydratation du ciment- donne lieu à un carbonate de calcium, comme le montre la réaction ci-après :

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \xrightarrow{H_2O} CaCO_3 + H_2O$$

Cette réaction ne se déroule qu'en milieu aqueux (*figure 1*). D'abord, il faut que le dioxyde de carbone se dissolve dans l'**eau des pores**, ce qui entraîne une chute du pH (d'environ 13 à 9). Par cette chute de pH, l'hydroxyde de calcium entre également en solution. Les deux produits réagissent et se précipitent sous la forme de carbonate de calcium.

L'humidité relative du milieu environnant qui détermine la teneur en eau du béton est un paramètre fondamental. En effet, pour que le processus se poursuive, il faut un apport de dioxyde de carbone frais. Or, la diffusion du dioxyde se déroule 10.000 fois plus rapidement dans l'air que dans l'eau. L'humidité relative doit donc être suffisamment faible pour que la diffusion du gaz carbonique soit possible mais elle doit aussi être suffisamment importante pour que la réaction de carbonatation proprement dite, qui ne peut être réalisée qu'en phase aqueuse, puisse avoir lieu.

La vitesse de carbonatation diminue avec le temps. Au fur et à mesure que la zone de carbonatation (front de carbonatation) progresse, le carbonate de calcium formé colmate progressivement les pores du béton. Le CO_2 doit parcourir une distance plus longue pour trouver les substances alcalines, et dès lors, le processus se ralentit.

La carbonatation est maximale lorsque l'humidité relative se situe entre 40 et 70 %, elle diminue, ensuite, rapidement. La *figure 2* donne l'ordre de grandeur de la profondeur de carbonatation à laquelle on peut s'attendre en fonction du rapport E/C du béton. Attention, avec un béton mal réalisé, à forte porosité, des profondeurs de carbonatation importantes (30 à 40 mm) sont observées.

Un béton constamment immergé dans l'eau ne présentera pour ainsi dire aucune carbonatation ; la résistance de l'eau à la diffusion du dioxyde de carbone est trop élevée.

Un béton exposé à un climat intérieur normal présentera une carbonatation rapide mais très superficielle par manque d'eau.

En ce qui concerne un béton exposé à un climat extérieur, il faut faire la distinction entre les situations où le béton est, soit abrité de la pluie, soit exposé à celle-ci. Pour la situation extérieure et non abritée, les pores sont régulièrement remplis d'eau, ce qui rend l'apport de dioxyde de carbone plus difficile. Pour la situation extérieure abritée, par contre, le processus de carbonatation se déroule plus rapidement, étant donné que les pores sont rarement saturés.

A noter que les silicates (CSH) et les aluminates (CAH) hydratés, ainsi que les composés du clinker sont aussi susceptibles de réagir avec le dioxyde de carbone pour former du carbonate de calcium.

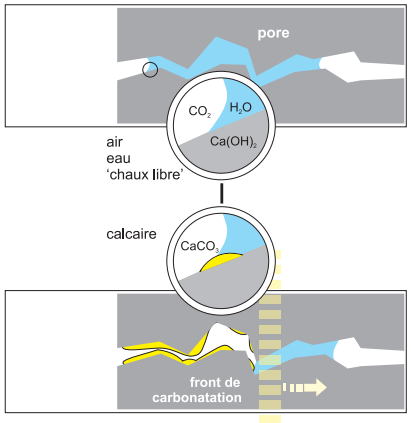


Figure 1 - Processus de carbonatation

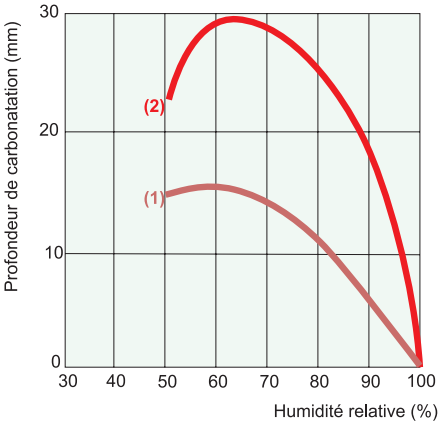


Figure 2 - Incidence de l'humidité relative de l'air sur la profondeur de carbonatation (courbe 1 : E/C = 0,60 ; courbe 2 : E/C = 0,80)
Source : Université d'Hanovre

b. Processus de corrosion (phase de propagation)

Dans le béton non armé, la carbonatation n'a pas d'influence négative sur la durabilité. Au contraire, la formation de $CaCO_3$ insoluble fait diminuer la porosité.

Pour le béton armé, la carbonatation peut être néfaste par **l'abaissement du pH**. En effet, les substances alcalines disparaissent progressivement et l'acier n'est plus protégé. On dit qu'il n'est plus passivé.

La question qui se pose alors est de savoir si l'acier va se corroder et, dans l'affirmative, à quelle vitesse. L'acier ne peut se corroder que s'il est mis simultanément en **présence d'eau et d'oxygène** (figure 3).

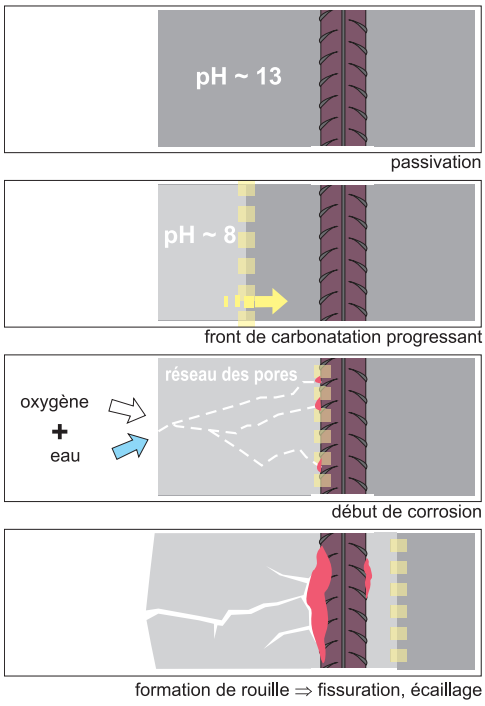


Figure 3 - Corrosion initiée par la carbonatation

Il existe une relation entre la vitesse de corrosion et l'humidité relative dans le béton carbonaté. L'expérience montre que la corrosion est le plus à craindre lorsque l'armature est régulièrement «humidifiée» (couverte d'eau) et que l'oxygène peut facilement pénétrer jusqu'à l'armature.

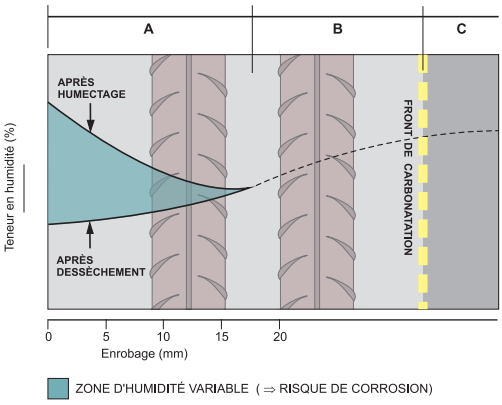


Figure 4 - Profil d'humidité et front de carbonatation

Dans un béton carbonaté, la probabilité d'une formation de rouille dépend donc des caractéristiques de l'environnement. Les armatures d'un béton exposé à un climat intérieur normal ne rouillent pas par manque d'eau. Pour les armatures d'un béton exposé à l'extérieur, la distinction doit être faite entre les 3 situations suivantes qui dépendent du profil d'humidité et du front de carbonatation.

- Présence d'armatures dans la zone carbonatée et plus particulièrement dans la **zone soumise à des variations d'humidité** (zone où s'alternent des phases de mouillage et de séchage – *zone A, figure 4* – Cette zone s'étend sur les 15 à 20 premiers millimètres à compter à partir de la surface du béton). Dans ce cas, l'armature va se corroder. Le fait que le béton soit abrité ou non détermine la vitesse de corrosion. La rouille se produira plus vite dans un endroit abrité (par exemple la face inférieure d'un balcon), car, dans pareil cas, l'oxygène pénètre relativement facilement dans les pores qui ne sont que partiellement remplis d'eau (*figure 5-5*). La rouille progresse lentement et uniformément.
- Présence d'armatures dans la **zone carbonatée mais en dehors de la zone sujette aux variations d'humidité** (*zone B, figure 4*). Dans une telle situation, la corrosion peut se produire lorsqu'il y a suffisamment d'humidité et d'oxygène. L'étude de cas pratiques démontre que la probabilité que cela se produise est plutôt faible. Dans la majorité des cas, il ne faut pas s'attendre à une détérioration notable due à la rouille pendant la durée d'existence de la construction.
- Présence d'armatures dans la **zone non carbonatée** (*zone C, figure 4*). Aucun danger de corrosion.

On notera que la corrosion initiée par la carbonatation est une corrosion généralisée de l'acier se traduisant par une diminution progressive de la section des armatures. L'accumulation des produits de corrosion volumineux au niveau des armatures génère des gonflements et fait alors éclater le béton d'enrobage (formation d'épaufrures sur les ouvrages).

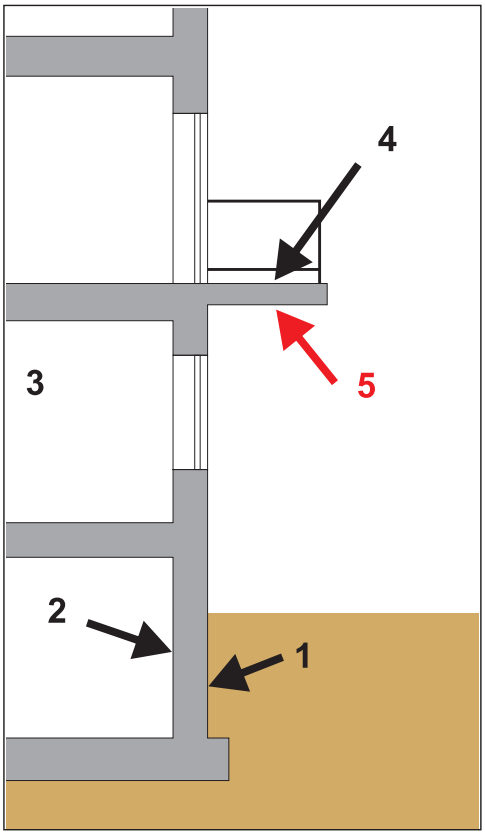


Figure 5 - Les probabilités d'une corrosion initiée par la carbonatation dépendent de l'environnement. Elles sont bien moindres sous le niveau du sol (1) ou à l'intérieur (2 et 3) qu'à l'extérieur. A l'extérieur, le risque d'une corrosion croît là où l'élément en béton est protégé (5) de la pluie (par exemple sous un balcon) et diminue là où le béton est soumis aux intempéries (4).

MESURE DE LA PROFONDEUR DE CARBONATATION

La carbonatation du béton s'accompagne d'une diminution du pH. Afin de mesurer la profondeur de carbonatation, la profondeur à laquelle le pH atteint une valeur de l'ordre de 9 est mesurée. La technique la plus simple est le test à la phénolphtaléine qui consiste à examiner, quelques instants après pulvérisation, le changement de couleur de cet indicateur coloré (violet) en fonction du pH. Dans les zones carbonatées, l'indicateur devient incolore. Le virage de la phénolphtaléine est représentatif d'une zone de pH de l'ordre de 9,5. La mesure de la profondeur de carbonatation s'effectue de manière normalisée en faisant la moyenne des valeurs mesurées en différents points. Cette méthode est définie dans la norme NBN EN 14630.

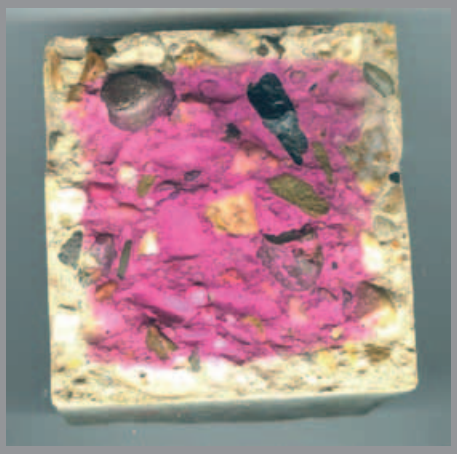


photo labo CRIC

1.2. LA CORROSION INITIÉE PAR LES CHLORURES

Des ions chlorures véhiculés par l'eau peuvent être présents dans le béton : ils peuvent être présents dans les composants du béton (granulats marins, ...), être incorporés au moment du malaxage (adjuvants accélérateurs de prise chlorés, ...) ou encore pénétrer dans l'ouvrage au fil du temps par diffusion à partir du milieu extérieur (eau de mer, sels de déverglaçage, ...).

A partir d'une teneur critique en chlorures, une armature peut se corroder localement pour autant qu'elle soit mise en présence d'eau et d'oxygène : des cratères de faible dimension affectent l'acier et s'agrandissent progressivement (*figure 6*). En effet, les ions Cl^- réagissent avec les ions Fe^{++} pour former du chlorure de fer. Celui-ci consomme les ions hydroxyle, migre et s'oxyde plus loin en déposant de la rouille. De là, les tâches de rouille en surface du béton, typiques d'une corrosion par les chlorures. Les réactions se déroulent comme suit :

$$Fe^{++} + Cl^- \rightarrow FeCl_2 \text{ (chlorure de fer)}$$

$$FeCl_2 + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2 + 2Cl^-$$

$$Fe(OH)_2 + O_2 \rightarrow \text{rouille}$$

On constate donc que les ions chlore, Cl-, sont recyclés, ce qui explique que la rouille ne contient pas de chlorures, même si des chlorures ferreux sont formés lors des étapes intermédiaires de la réaction. Ainsi, cette corrosion est susceptible de continuer au même endroit. La corrosion initiée par les chlorures est donc une corrosion localisée par piqûres de l'acier. Elle est extrêmement dangereuse car elle entraîne une réduction locale de la section d'armature. Lorsque celle-ci devient trop petite, elle se rompra brusquement, ce qui peut avoir des conséquences désastreuses.
En ce qui concerne la teneur critique en chlores, on a constaté qu'il n'existe pas de valeur limite unique. La corrosion des armatures s'amorce dès que la teneur en ions chlorures au niveau des armatures atteint un certain seuil de dépassivation. Ce seuil peut varier en fonction de nombreux facteurs (cation associé aux chlorures, teneur en oxygène, humidité relative, température, degré d'hydratation du ciment, teneur en C_3A, porosité, ajouts, composition de l'acier, ...). Toutefois, un rapport $[Cl^-]_{libre}/[OH^-]$ égal à 0,6 est souvent admis. Cette seule teneur en chlorures limite est insuffisante pour déterminer si la corrosion aura lieu. Comme elle dépend du pH, il y a un rapport indirect avec la carbonatation. La corrosion peut se produire dans un béton carbonaté à des teneurs en chlorures plus faibles que pour un béton non carbonaté.

Un rapport $[Cl^-]_{libre}/[OH^-]$ compris entre 0,6 et 1 conduit généralement à une concentration «critique» en ions chlorure totaux de l'ordre de 0,4 % de la masse de ciment pour un béton non carbonaté et donc à des concentrations «critiques» comprises entre 0,04 et 0,1 % par rapport à la masse de béton suivant la formulation.

CHLORURES LIBRES ET CHLORURES TOTAUX

- **Les chlorures libres se trouvent sous forme ionique dans la solution interstitielle. Ils sont extractibles à l'eau et sont de ce fait appelés également «chlorures solubles dans l'eau».**
- **Les chlorures totaux incluent, outre les précédents, ceux fortement adsorbés sur les C-S-H et ceux chimiquement liés dans la matrice cimentaire sous forme de composés tels que les chloroaluminates de calcium.**

Seuls les chlorures libres peuvent diffuser et jouer un rôle actif dans le processus de dépassivation et de corrosion des armatures.

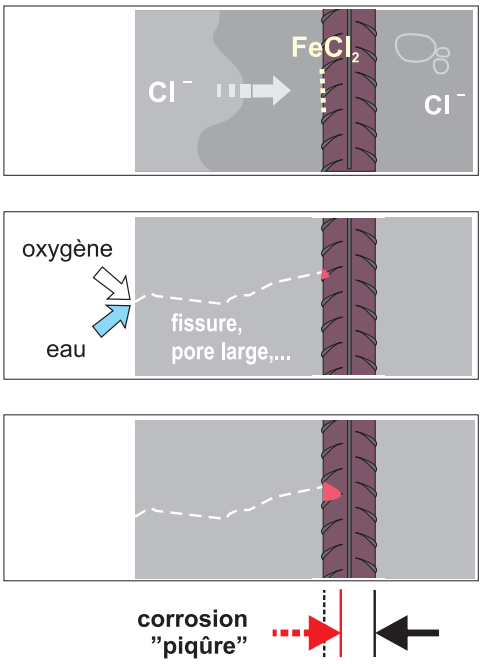


Figure 6 - Corrosion initiée par des chlorures

2. PRÉVENTION

La probabilité d'une dégradation due à une corrosion initiée par la carbonatation diminue au fur et à mesure que :

- le front de carbonatation met plus de temps pour atteindre l'armature. Cela implique un apport lent en CO_2 et en humidité et, par conséquent, une faible porosité du béton. D'une part, le facteur E/C du béton recouvrant les armatures doit donc être faible (< 0,55 voire 0,50), la teneur en ciment suffisante (≥ 340 kg par m^3 de béton) et la mise en œuvre optimale (diamètre maximal des grains en rapport avec l'enrobage des armatures, vibration, etc.). D'autre part, l'épaisseur d'enrobage doit également être suffisante.
- la phase de propagation est plus longue. Cela s'obtient en limitant l'apport d'eau et d'oxygène (donc par une faible porosité) et par un parcours aussi long que possible (donc par une épaisseur d'enrobage suffisante).

A noter que la qualité du béton d'enrobage dépend directement des conditions de cure puisque le ciment cesse pratiquement de s'hydrater si l'humidité relative interne descend au-dessous de 80 %. C'est pourquoi la réduction des temps de cure accroît de façon significative la profondeur de carbonatation.

De même, la corrosion initiée par les chlorures a une probabilité moindre de donner lieu à des dégâts en limitant au maximum la quantité d'ions chlore introduit lors du malaxage du béton et la pénétration des ions chlore et de l'oxygène. Les paramètres importants sont aussi la qualité du béton (faible rapport E/C, teneur suffisante en ciment, mise en œuvre optimale) et l'enrobage. De plus, la norme NBN EN 206-1:2001 stipule que le chlorure de calcium et les adjuvants contenant des chlorures ne peuvent pas être additionnés au béton comportant des armatures, des armatures de précontrainte ou d'autres parties métalliques.

2.1 LA QUALITÉ DU BÉTON

La norme NBN EN 206-1:2001 définit quatre **classes d'exposition** concernant la corrosion initiée par la carbonatation désignée par XC. Selon que le béton est constamment sec ou humide (XC1), rarement sec (XC2), modérément humide (XC3) ou alternativement humide et sec (XC4), les exigences de durabilité sont plus rigoureuses. En ce qui concerne la corrosion initiée par les chlorures, la NBN EN 206-1 définit 6 classes d'exposition. Trois classes, désignées par XS, ont trait à des chlorures présents dans l'eau de mer et l'eau saumâtre : béton exposé à l'air véhiculant du sel marin, mais pas en contact direct avec l'eau de mer (XS1), béton immergé en permanence dans l'eau (XS2) et béton en zones de marées ou zones soumises à des projections ou des embruns (XS3). Trois classes, désignées par XD, concernent des chlorures ayant une autre origine, comme les sels de déverglaçage, les solutions contenant des chlorures, etc. : béton modérément humide (XD1), béton humide, rarement sec (XD2) et béton alternativement humide et sec (XD3). Les exigences de durabilité sont les plus rigoureuses pour le béton qui est alternativement humide ou sec.
Le complément national belge à la NBN EN 206-1, la norme NBN B15-001:2004 considère, quant à elle, un certain nombre d'environnements-types courants en Belgique. Ces **classes d'environnement** sont indissociables des classes d'exposition de la norme NBN EN 206-1. Le *tableau 1* ci-après définit les classes d'environnement et les classes d'exposition correspondantes qui permettent de prescrire les exigences de durabilité des bétons armés en termes de corrosion des armatures. Les exigences de durabilité sont traduites en types de béton. Un type de béton est défini par le rapport E/C maximal du béton, le dosage minimal en ciment et la classe de résistance minimale. Le *tableau 2* donne les types de béton relatifs à la corrosion des armatures et les exigences minimales de durabilité correspondantes.
Etant donné que des chlorures peuvent être introduits dans le béton lors de la confection du béton, la NBN EN 206-1:2001 définit des classes de teneurs en chlorures. Celles-ci sont désignées par 'Cl' suivi d'un nombre renvoyant à la teneur maximum admissible en ions chlores, calculée par rapport à la masse de ciment dans le béton. La NBN B 15-001:2004 donne les classes de teneurs en chlorures applicables dans le contexte belge (*tableau 3*) Lors de la spécification d'un béton, le prescripteur désignera le domaine d'utilisation du béton : béton non armé (BNA), béton armé (BA) ou béton précontraint (BP), la teneur maximale autorisée en ions chlore est ainsi implicitement définie.

Classes d'environnement			Classes d'exposition des bétons armés (BA) et précontraints (BP)
Classe	Description	Exemples	
EI	**Application intérieure**	Parois intérieures des habitations ou de bureaux	XC1
EE	**Application extérieure**		
EE1	Pas de gel	Fondations sous le niveau de gel	XC2
EE2	Gel, mais pas de contact avec la pluie	Garages ouverts couverts, vides sanitaires, passages ouverts dans un bâtiment	XC3
EE3	Gel et contact avec la pluie	Murs extérieurs exposés à la pluie	XC4
EE4	Gel et agents de déverglaçage (présence d'eau contenant des agents de déverglaçage provenant soit de sa fonte sur place, soit de projections, soit de ruissellements)	Eléments d'infrastructures routières	XC4, XD3
ES	**Environnement marin**		
	Pas de contact avec de l'eau de mer, mais bien avec de l'air marin jusqu'à 3 km de la côte et/ou avec de l'eau saumâtre [1]		
ES1	Pas de gel	Fondations sous le niveau de gel exposées à de l'eau saumâtre	XC2, XS2
ES2	Gel	Murs extérieurs de bâtiments exposés à la pluie en zone côtière	XC4, XS1
	Contact avec de l'eau de mer		
ES3	Eléments immergés		XC1, XS2
ES4	Eléments exposés aux marées et aux éclaboussures	Murs de quais	XC4, XS3

[1] Les eaux saumâtres se rencontrent en particulier dans la région côtière, les polders de la région de Dixmude, certains polders de Flandre orientale et aux alentours du port d'Anvers. La cote altimétrique de 6 m est acceptée comme limite pour ces zones.

Tableau 1 – Classes d'environnement et d'exposition des bétons relatives à la corrosion des armatures
A noter qu'il existe des classes d'environnement et d'exposition supplémentaires mais celles-ci ne concernent pas la corrosion des bétons armés.

Types de béton	T(0,65)	T(0,60)	T(0,55)	T(0,50)	T(0,45)
Classes d'exposition	XC1	XC2	XC3	XC4 XD1 XD2 XS1 XS2*	XD3 XS2* XS3
Classes d'environnement (BA ou BP)	EI	EE1	EE2	EE3 ES1 ES2	EE4 ES3 ES4
Rapport maximal eau/ciment	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45
Dosage minimal en ciment (kg/m^3)	260	280	300	320	340
Classe de résistance minimale	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45

XS2* : T(0,50) pour les bétons immergés dans des eaux saumâtres

Tableau 2 – Types de béton et exigences de durabilité correspondantes selon la norme NBN B15-001:2004

Domaine d'utilisation		Classe de chlorures	Teneur maximale en Cl^- en % de la masse de ciment (*)
Béton non armé (BNA)	Béton qui ne comporte pas d'armature ni d'autres parties métalliques	Cl 1,0	1,0 %
Béton armé (BA)	Béton comportant des armatures ou d'autres parties métalliques	Cl 0,40	0,40 %
Béton précontraint (BP)	Béton avec armature de précontrainte	Cl 0,20	0,20 %

(*) en cas d'utilisation d'additions de type II : en % de la somme de la masse de ciment et des additions

Tableau 3 – Domaine d'utilisation et teneur maximale en chlorures du béton selon la norme NBN B 15-001:2004

2.2 L'ENROBAGE DES ARMATURES

Pour tous les bétons armés avec des armatures classiques, la compacité et l'épaisseur du béton d'enrobage (distance entre le nu de l'armature et la surface de béton la plus proche) doivent être proportionnelles aux risques potentiels de corrosion, fonction de la classe d'exposition ou d'environnement. L'enrobage et la compacité ont un impact immédiat sur la durée de la phase d'initiation et du développement de la corrosion des armatures.
A titre d'exemple, il est couramment reconnu que l'augmentation de l'enrobage minimal d'une valeur de 10 mm permet de porter la durée de service de l'ouvrage de 50 ans à 100 ans. L'enrobage est défini dans la norme NBN EN 1992-1-1:2005 (Eurocode 2) et son Annexe Nationale. Il doit satisfaire en particulier aux exigences de bonnes transmissions des forces d'adhérences et aux conditions d'environnement. L'Eurocode 2 prévoit aussi la possibilité de réduire l'enrobage quand la résistance du béton atteint un niveau spécifié.

- Une distinction doit tout d'abord être faite entre l'enrobage nominal et minimal. L'enrobage nominal (c_{nom}) est mentionné sur les plans et correspond à la hauteur des écarteurs des armatures. Il est défini comme l'enrobage minimal (c_{min}) majoré d'une tolérance (Δc_{dev}) nécessaire pour tenir compte de certains écarts dimensionnels dont il est difficile de se prémunir (défaut de rectitude des armatures, déplacements liés au mode de mise en place du béton, ...).

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

- L'enrobage minimal (c_{min}) n'est jamais inférieur à 10 mm et est la valeur maximale :
  - de $c_{min,\,b}$: enrobage minimal vis-à-vis des exigences d'adhérence ;
  - de $c_{min,\,dur} + \Delta c_{dur,\,\gamma} - \Delta c_{dur,\,st} - \Delta c_{dur,\,add}$ avec :
  - → $c_{min,\,dur}$: enrobage minimal vis-à-vis des conditions d'environnement ;
  - → $\Delta c_{dur,\,\gamma}$: marge de sécurité (la valeur $\Delta c_{dur,\,\gamma}$ = 0 mm est normative) ;
  - → $\Delta c_{dur,\,st}$: réduction de l'enrobage en cas d'utilisation d'aciers dont la résistance à la corrosion est éprouvée (certains aciers inoxydables par exemple) (la valeur $\Delta c_{dur,\,st}$ = 0 mm est à utiliser sauf justification spéciale – voir article 4.4.1.2 (7) de l'Annexe Nationale) ;
  - → $\Delta c_{dur,\,add}$: réduction de l'enrobage dans le cas de protection supplémentaire comme un revêtement par exemple (la valeur $\Delta c_{dur,\,add}$ = 0 mm est normative).

Pour les exigences vis-à-vis de l'adhérence béton/armature, $c_{min,\,b}$, est égal :
- au diamètre de la barre dans le cas d'une armature individuelle ;
- au diamètre équivalent dans le cas d'un groupe d'armatures

et est majoré de 5 mm si le diamètre du plus gros granulat du béton est supérieur à 32 mm. Dans le cas d'enrobage d'armatures de précontrainte, les valeurs de $c_{min,\,b}$ sont égales à 2 fois le diamètre du toron ou du fil lisse et 3 fois le diamètre du fil cranté.

Pour chaque classe d'exposition, l'enrobage minimal ($c_{min,\,dur}$) est mentionné en tenant compte de la durée de vie escomptée des constructions. La durée de vie escomptée est divisée en **'classes structurales'**, désignées par un chiffre. Plus le chiffre est bas, plus la durée de vie escomptée de la construction est basse et plus le $c_{min,\,dur}$ requis est faible. La classe S4 correspond à une durée de vie escomptée de 50 ans.

Les *tableaux 4 et 5* donnent les valeurs de $c_{min,\,dur}$ respectivement pour le béton armé et le béton précontraint. **Les valeurs minimales pour la classe structurale S4 sont recommandées.** A partir d'une classe de résistance à la compression minimale supérieure donnée, il est possible de prendre une classe structurale plus basse d'une unité. Pour une durée de vie de 100 ans, il est nécessaire d'augmenter la classe structurelle de 2. Le *tableau 6* détaille ces considérations.
A noter que pour le béton armé ou précontraint exposé à un environnement chimiquement agressif (classes XA et EA), la plus grande valeur $c_{min,dur}$ exigée pour les autres classes d'exposition et d'environnement auxquelles le béton est exposé est d'application.
De plus, un enrobage minimum est nécessaire pour des structures spécifiées avec une **résistance au feu**. De plus amples informations à ce sujet sont données dans la NBN EN 1992 1-2:2005.

Classe structurale	Classes d'exposition et d'environnement					
	XC1	XC2, XC3	XC4	XD1, XS1	XD2, XS2	XD3, XS3
	EI	EE1, EE2	EE3	ES2	ES1, ES3	EE4, ES4
S1	10	10	15	20	25	30
S2	10	15	20	25	30	35
S3	10	20	25	30	35	40
S4	15	25	30	35	40	45
S5	20	30	35	40	45	50
S6	25	35	40	45	50	55

Tableau 4 – Valeurs de l'enrobage minimal $c_{min, dur}$ (mm) requis vis-à-vis de la durabilité dans le cas des armatures d'un béton armé (selon prNBN EN 1992-1-1-ANB:2007, en cours d'adaptation)

Classe structurale	Classes d'exposition et d'environnement					
	XC1	XC2, XC3	XC4	XD1, XS1	XD2, XS2	XD3, XS3
	EI	EE1, EE2	EE3	ES2	ES1, ES3	EE4, ES4
S1	15	20	25	30	35	40
S2	15	25	30	35	40	45
S3	20	30	35	40	45	50
S4	25	35	40	45	50	55
S5	30	40	45	50	55	60
S6	35	45	50	55	60	65

Tableau 5 – Valeurs de l'enrobage minimal $c_{min, dur}$ (mm) requis vis-à-vis de la durabilité dans le cas des armatures de précontrainte (selon prNBN EN 1992-1-1-ANB:2007, en cours d'adaptation)

Critère (1)	Classes d'exposition et d'environnement					
	XC1	XC2, XC3	XC4	XD1	XD2, XS1	XD3, XS2, XS3
	EI	EE1, EE2	EE3		ES1, ES2	ES3, EE4, ES4
Durée d'utilisation de projet de 100 ans	majoration de 2 classes	majoration de 2 classes	majoration de 2 classes	majoration de 2 classes	majoration de 2 classes	majoration de 2 classes
Classe de résistance	≥ C30/37 minoration de 1 classe	≥ C35/45 minoration de 1 classe	≥ C40/50 minoration de 1 classe	≥ C40/50 minoration de 1 classe	≥ C40/50 minoration de 1 classe	≥ C45/55 minoration de 1 classe
Elément préfabriqué assimilable à une dalle et coulé horizontalement (2)(3)	minoration de 1 classe	minoration de 1 classe	minoration de 1 classe	minoration de 1 classe	minoration de 1 classe	minoration de 1 classe
Elément préfabriqué avec maîtrise particulière de la qualité de production (2)	minoration de 1 classe	minoration de 1 classe	minoration de 1 classe	minoration de 1 classe	minoration de 1 classe	minoration de 1 classe

(1) Les minorations de classe suivant les différents critères sont cumulables

(2) La minoration n'est possible que dans le cas où les 3 conditions ci-dessous sont remplies simultanément :

- le système d'assurance qualité et l'autocontrôle industriel sont en conformité avec le § 6 de la NBN EN 13369:2004 et sont évalués par une tierce partie et sous sa surveillance continue ;
- la validation par tierce partie de la procédure et des modalités pratiques d'application du § 4.2.1.3. de la NBN EN 13369:2004 (cure – protection contre la dessiccation) ;
- le système d'assurance qualité et l'autocontrôle industriel incluent des mesures de l'enrobage des armatures et le rejet des éléments non conformes.

(3) Il peut s'agir d'une partie de l'élément préfabriqué,

Tableau 6 – Modification de la classe structurale

L'enrobage minimal doit être majoré pour tenir compte des tolérances pour écart d'exécution (Δc_{dev}) :

$$\Delta c_{dev} = 10 \text{ mm}$$

Selon la NBN EN 1992-1-1:2005, il peut être dérogé de cette valeur selon le système de contrôle de qualité sur le chantier.

- Si ce système de contrôle qualité comporte le contrôle des dimensions de l'enrobage des armatures, il est possible de réduire la marge de calcul pour tolérance d'exécution Δc_{dev} de telle sorte que 10 mm ≥ Δc_{dev} ≥ 5 mm.
- Pour des éléments préfabriqués, la tolérance d'exécution Δc_{dev} peut être diminuée de telle sorte que 10 mm ≥ Δc_{dev} ≥ 0 mm. Cette diminution ne peut être appliquée que si les trois conditions ci-dessous sont remplies simultanément :
  - le système d'assurance qualité et l'autocontrôle industriel sont évalués par une tierce partie et sous sa surveillance continue ;
  - le système d'assurance qualité et l'autocontrôle industriel incluent des mesures de l'enrobage des armatures et rejettent les éléments non conformes ;
  - des dispositions appropriées et approuvées par la tierce partie sont mises en œuvre au cours de la production afin de garantir que la tolérance déclarée par le producteur n'est pas dépassée.

Dans le cas d'un béton coulé au contact de surfaces irrégulières, il convient encore de majorer l'enrobage en prenant une marge plus importante. Il convient de choisir une majoration en rapport avec la différence causée par l'irrégularité. L'enrobage nominal (c_{nom}) devant être au moins égal à 40 mm pour un béton coulé au contact d'un sol ayant reçu une préparation (y compris béton de propreté) et 75 mm pour un béton coulé au contact direct du sol.

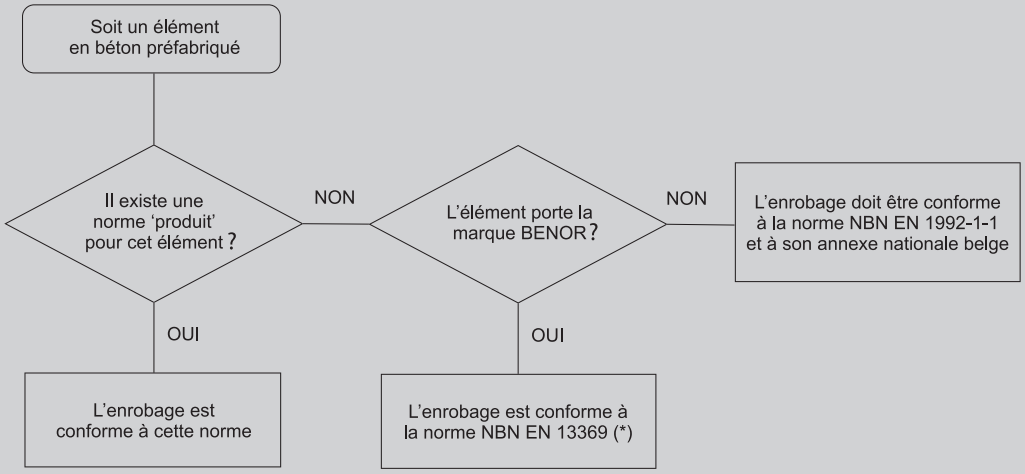
Il convient également de majorer d'au moins 5 mm l'enrobage minimal des armatures pour toute surface présentant des irrégularités, telle que surface striée ou béton à granulats apparents (béton dénudé), afin de tenir compte de l'irrégularité de la surface.

photos PHA

ENROBAGE DES ARMATURES DES ELEMENTS PREFABRIQUES EN BETON

Les usines de préfabrication offrent des possibilités techniques de production particulières en matière de caractéristiques de durabilité du béton. Il est donc logique que les spécifications valorisent ces possibilités. Les spécifications techniques pour les éléments préfabriqués en béton et donc les enrobages minimum des armatures font l'objet de la norme européenne NBN EN 13369:2004 (règles communes pour les produits préfabriqués en béton) ainsi que de son complément national, actuellement sous forme de projet, le projet de norme prNBN B 21-600:2007.
De plus, certains produits préfabriqués ont leur propre norme de référence et donc leurs propres spécifications. Ces dernières contiennent entre autre des prescriptions d'enrobage minimum.

L'industrie du béton préfabriqué respecte scrupuleusement les normes nationales et internationales. Le prescripteur peut donc être certain que s'il prescrit un élément préfabriqué en béton avec sa norme correspondante parallèlement à une classe d'environnement, l'élément fourni présentera des caractéristiques d'enrobage normalisées et conformes.
Le site www.febe.be - menu produits, indique, pour chaque type de produit, la norme de référence à prescrire. Dans le cas où il n'y a pas de norme pertinente pour le produit à prescrire, il y a lieu d'exiger le respect des spécifications communes de la norme NBN EN 13369:2004 et de son complément national.



* L'enrobage selon la NBN EN 13369:2004 est de 5 mm plus faible que celui prescrit dans la norme NBN EN 1992-1-1 ainsi que dans son annexe nationale belge (classe structurale S4) mais la qualité de la production du béton est, ici, maîtrisée et contrôlée dans le cadre de la marque BENOR.

1. VOILE EN CONTACT AVEC DES SELS DE DÉVERGLAÇAGE

Soit un voile en béton armé avec une double nappe d'armatures de 12 mm de diamètre et soumis à la projection de sels de déverglaçage. Le béton est de classe de résistance C35/45. Il n'y a pas de système d'assurance qualité ou d'autocontrôle incluant des mesures de l'enrobage des armatures. La durée d'utilisation projetée est de 50 ans.

photo PHA

$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$

c_{min} est supérieur ou égal à 10 mm et est la valeur maximale :

- $c_{min,\,b}$ (enrobage minimal vis-à-vis des exigences d'adhérence), $c_{min,\,b}$ est égal au diamètre de la barre dans le cas d'une armature individuelle ou au diamètre équivalent dans le cas d'un groupe d'armatures et est majoré de 5 mm si le diamètre du plus gros granulat du béton est supérieur à 32 mm.

$\Rightarrow c_{min,\,b} = 12$ mm

- $c_{min,\,dur} + \Delta c_{dur,\,\gamma} - \Delta c_{dur,\,st} - \Delta c_{dur,\,add}$ avec :
  - $c_{min,\,dur}$: enrobage minimal vis-à-vis des conditions d'environnement (EE4 : gel et contact avec la pluie $\Rightarrow$ tableaux 4 et 6, classe structurale S4, $c_{min,\,dur} = 45$ mm) ;
  - $\Delta c_{dur,\,\gamma}$: marge de sécurité ($\Delta c_{dur,\,\gamma} = 0$ mm);
  - $\Delta c_{dur,\,st}$: réduction de l'enrobage en cas d'aciers inoxydables ($\Delta c_{dur,\,st} = 0$ mm);
  - $\Delta c_{dur,\,add}$: réduction de l'enrobage dans le cas de protection supplémentaire comme un revêtement par exemple ($\Delta c_{dur,\,add} = 0$ mm).

$\Rightarrow c_{min} = 45$ mm

Il n'y a pas de système de contrôle de qualité sur le chantier $\rightarrow$ $\Delta c_{dev} = 10$ mm

$\Rightarrow$ **c_{nom} = 55 mm**

2. DALLE DE SOL D'UNE ZONE DE STOCKAGE DE PRODUITS CHIMIQUEMENT AGRESSIFS

Soit une dalle de sol pour un silo à maïs coulée directement sur le terrain naturel après enlèvement des terres végétales. Le béton est prescrit de la manière suivante :

- béton conforme aux normes NBN EN 206-1 et NBN B15-001 ;
- classe de résistance : C35/45 ;
- classes d'environnement : EE3 et EA3 ;
- classe de consistance : S3 ;
- diamètre maximal du granulat : 20 mm ;
- exigences complémentaires : minimum 375 kg de ciment LA par m^3 de béton.

L'armature utilisée est un treillis à maille carrée de 100 mm de côté et de 8 mm de diamètre.

photo CLP

$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$

c_{min} est supérieur ou égal à 10 mm et est la valeur maximale :

- $c_{min,\,b}$ (enrobage minimal vis-à-vis des exigences d'adhérence), $c_{min,\,b}$ est égal au diamètre de la barre dans le cas d'une armature individuelle ou au diamètre équivalent dans le cas d'un groupe d'armatures et est majoré de 5 mm si le diamètre du plus gros granulat du béton est supérieur à 32 mm.

$\Rightarrow c_{min,\,b} = 8$ mm

- $c_{min,\,dur} + \Delta c_{dur,\,\gamma} - \Delta c_{dur,\,st} - \Delta c_{dur,\,add}$ avec :
  - $c_{min,\,dur}$: enrobage minimal vis-à-vis des conditions d'environnement
    (EE3 : gel et contact avec la pluie
    $\Rightarrow$ tableaux 4 et 6, classe structurale S4;
    $c_{min,\,dur} = 30$ mm) ;
    EA3 : environnement à forte agressivité chimique = attaque acide du béton $\Rightarrow$ aucune incidence sur les armatures et l'enrobage;
    béton coulé horizontalement mais non préfabriqué $\Rightarrow$ pas de minoration de 1 classe,
  - $\Delta c_{dur,\,\gamma}$: marge de sécurité ($\Delta c_{dur,\,\gamma} = 0$ mm);
  - $\Delta c_{dur,\,st}$: réduction de l'enrobage en cas d'aciers inoxydables ($\Delta c_{dur,\,st} = 0$ mm) ;
  - $\Delta c_{dur,\,add}$: réduction de l'enrobage dans le cas de protection supplémentaire comme un revêtement par exemple ($\Delta c_{dur,\,add} = 0$ mm).

$\Rightarrow c_{min} = 30$ mm

Il n'y a pas de système de contrôle de qualité sur le chantier $\Rightarrow \Delta c_{dev} = 10$ mm

$\Rightarrow c_{nom} = 40$ mm pour l'enrobage supérieur, mais l'enrobage inférieur est de 75 mm puisque le béton est coulé directement sur le sol

FEBELCEM

Ce bulletin est publié par :
FEBELCEM
Fédération de l'Industrie Cimentière Belge
Boulevard du Souverain 68 - 1170 Bruxelles
tél. 02 645 52 11 – fax 02 640 06 70
www.febelcem.be
info@febelcem.be

Auteur :
Ir C. Ployaert

Dépôt légal :
D/2009/0280/03

Ed. resp.: A. Jasienski

infobeton.be

BIBLIOGRAPHIE

[1] NEVILLE A., Propriétés des bétons, Paris : Eyrolles, 2000

[2] Technologie du béton , Bruxelles : GROUPEMENT BELGE DU BETON (GBB), 4e édition, 2006

[3] OLLIVIER J.P. ; VICHOT A., La durabilité des bétons, Paris : ATHIL, Ecole française du béton. Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, 2008

[4] POURBAIX M., Atlas d'équilibres électrochimiques à 25 °C, Paris : Gauthier-Villars & Cie Editeur, 1963

[5] NBN B 15-001:2004 : Supplément à la NBN EN 206-1:2001 - Béton – Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité, Bruxelles : NBN, 2004

[6] NBN EN 206-1:2001 : Béton – Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité, Bruxelles : NBN, 2001

[7] NBN EN 1992-1-1:2005 : Eurocode 2 : Calculs des structures en béton- Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments, Bruxelles : NBN, 2005

[8] prEN 1992-1-1-ANB:2007 - Eurocode 2 : Calculs des structures en béton- Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments, Bruxelles : NBN, 2007

[9] APERS J. ; DE BLAERE B., Restauration des édifices construits en béton, A + Architecture n° 159, 4/1999

[10] WIERIG X., Longtime studies on the carbonation of concrete under normal outdoor exposure, Rilem Seminar on the durability of concrete structures under normal outdoor exposure, Hanovre, 1984

[11] Inzicht in duurzaamheid van beton, 's-Hertogenbosch : ENCI, 2003

[12] NBN EN 14630:2007 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton, Méthodes d'essais – Mesurage de la profondeur de carbonatation d'un béton armé par la méthode, phénolphtaléine, Bruxelles : NBN, 2007

[13] NBN EN 13369:2004 : Règles communes pour les produits préfabriqués en béton, Bruxelles : NBN, 2004

[14] NBN B 21-600:2008 : Règles communes pour les produits préfabriqués en béton – Complément national à la NBN EN 13369:2004, Bruxelles : NBN, 2008