

Chapitre 2. Choisir un béton durable

2.1 Conditions pour choisir un béton

1. Il doit avoir une résistance suffisante pour résister aux sollicitations (M, N, V).
2. Il doit assurer une durabilité suffisante à l'ouvrage qui est exposé à des conditions d'exposition (à un risque de dégradation du béton) données.

La condition 2 peut-être déterminante, il y a donc lieu de la vérifier pour commencer. Pour cela il faut tout d'abord connaître les différents risques de dégradation du béton.

2.2 Classes d'exposition.

Les différentes classes d'exposition sont représentés dans les normes européennes (NBN EN206-1) par deux lettres (la première d'entre elles étant X) et sont représentés sur la figure suivant. Elles correspondent à des risques de dégradation distincts. Un élément en béton d'une structure peut être exposé à plus d'un risque, donc appartenir à plusieurs classes d'exposition.



| | |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| X0 | Aucun risque de corrosion ni d'attaque (risque 0) |
| XC | Corrosion induite par <u>C</u>arbonatation |
| XD | Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine (<u>D</u>eicing salt) |
| XS | Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer (<u>S</u>eawater) |
| XF | Attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage (<u>F</u>rost) |
| XA | Attaques chimiques (Environnement <u>A</u>gressif) |

armature

béton

+ subdivisions -> 18 classes d'exposition

Comme nous allons le voir dans les paragraphes suivants, un béton compact, c'est-à-dire dont le rapport E/C est le plus bas possible et qui a été serré selon les règles de l'art, résistera plus longtemps aux diverses agressions. Les différentes agressions possibles sont la dégradation par la Carbonatation (XC), les chlorures (XD/XS : De-icing salts/Seawater), le gel/gel-dégel (XF : Frost), les attaques chimiques (XA : Agressive environment).

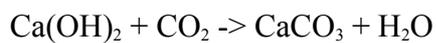
Tableau 4.1 : Classes d'exposition en fonction des conditions d'environnement, conformément à l'EN 206-1

| Désignation de la classe | Description de l'environnement : | Exemples informatifs illustrant le choix des classes d'exposition |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 Aucun risque de corrosion ni d'attaque | | |
| X0 | Béton non armé et sans pièces métalliques noyées : toutes expositions sauf en cas de gel/dégel, d'abrasion et d'attaque chimique Béton armé ou avec des pièces métalliques noyées : très sec | Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est très faible |
| 2 Corrosion induite par carbonatation | | |
| XC1 | Sec ou humide en permanence | Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est faible Béton submergé en permanence dans de l'eau |
| XC2 | Humide, rarement sec | Surfaces de béton soumises au contact à long terme de l'eau Un grand nombre de fondations |
| XC3 | Humidité modérée | Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est moyen ou élevé Béton extérieur abrité de la pluie |
| XC4 | Alternativement humide et sec | Surfaces de béton soumises au contact de l'eau, mais n'entrant pas dans la classe d'exposition XC2 |
| 3 Corrosion induite par les chlorures | | |
| XD1 | Humidité modérée | Surfaces de béton exposées à des chlorures transportés par voie aérienne |
| XD2 | Humide, rarement sec | Piscines Éléments en béton exposés à des eaux industrielles contenant des chlorures |
| XD3 | Alternativement humide et sec | Éléments de ponts exposés à des projections contenant des chlorures Chaussées Dalles de parcs de stationnement de véhicules |
| 4 Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer | | |
| XS1 | Exposé à l'air véhiculant du sel marin mais pas en contact direct avec l'eau de mer | Structures sur ou à proximité d'une côte |
| XS2 | Immergé en permanence | Éléments de structures marines |
| XS3 | Zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns | Éléments de structures marines |
| 5. Attaque gel/dégel | | |
| XF1 | Saturation modérée en eau, sans agent de déverglaçage | Surfaces verticales de béton exposées à la pluie et au gel |
| XF2 | Saturation modérée en eau, avec agents de déverglaçage | Surfaces verticales de béton des ouvrages routiers exposés au gel et à l'air véhiculant des agents de déverglaçage |
| XF3 | Forte saturation en eau, sans agents de déverglaçage | Surfaces horizontales de béton exposées à la pluie et au gel |
| XF4 | Forte saturation en eau, avec agents de déverglaçage ou eau de mer | Routes et tabliers de pont exposés aux agents de déverglaçage. Surfaces de béton verticales directement exposées aux projections d'agents de déverglaçage et au gel. Zones des structures marines soumises aux projections et exposées au gel |
| 6. Attaques chimiques | | |
| XA1 | Environnement à faible agressivité chimique selon l'EN 206-1, Tableau 2 | Sols naturels et eau dans le sol |
| XA2 | Environnement d'agressivité chimique modérée selon l'EN 206-1, Tableau 2 | Sols naturels et eau dans le sol |
| XA3 | Environnement à forte agressivité chimique selon l'EN 206-1, Tableau 2 | Sols naturels et eau dans le sol |

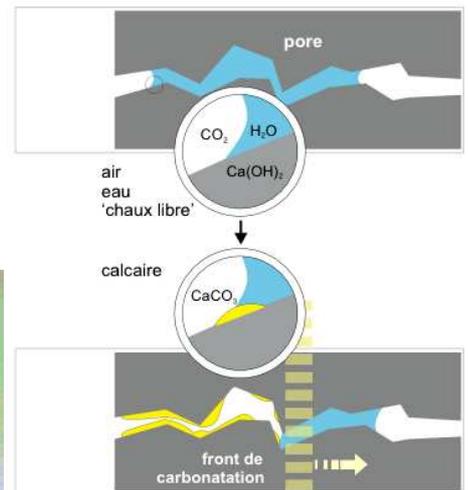
Note : la classe X0 n'est pas admise en Belgique

2.2.1 Dégradation par carbonatation : XC

La réaction du dioxyde de carbone (CO_2) avec les substances alcalines du béton s'appelle la carbonatation. Ainsi, la combinaison du dioxyde de carbone avec l'hydroxyde de calcium donne lieu à un carbonate de calcium comme le montre la réaction suivante :



L'effet « bouche-pores » causé par ces dépôts de CaCO_3 ralentit la progression de la carbonatation.



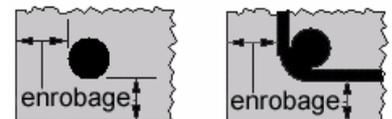
La pulvérisation de phénolphtaléine (indicateur coloré virant au rose vif lorsque le pH est supérieur à 9), permet de mettre en évidence le front carbonatation du béton (toutes les zones qui restent incolores sont carbonatées)

2.2.1.1 Corrosion des armatures due à la carbonatation

La pâte de ciment hydratée constitue un milieu fortement alcalin ($\text{pH} > 12$) qui agit comme passivant vis-à-vis de l'acier: l'armature ne rouillera pas, bien qu'elle soit en contact avec l'eau et l'oxygène pénétrant via les capillaires et les micro-fissures.

Dans un béton carbonaté, le pH descend sous 8. L'acier cesse d'être passivé, l'armature commencera à rouiller si elle est située dans une zone où humidification et dessèchement s'alternent.

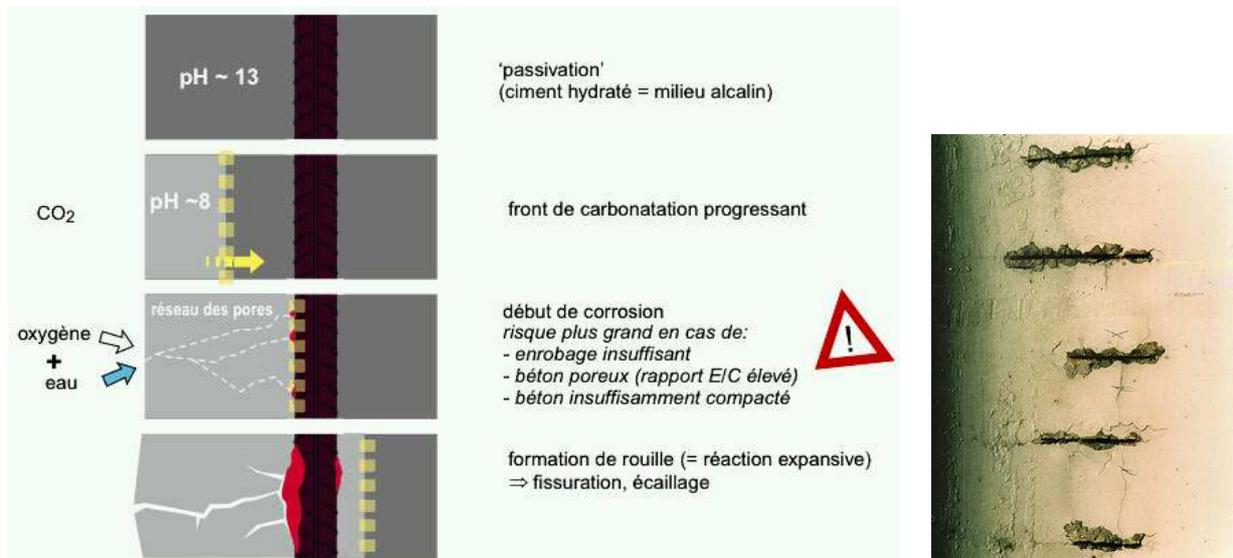
Il importe donc de tenir les armatures suffisamment éloignées des zones pouvant se carbonater pendant la vie de la structure. Il en résulte des enrobages (épaisseur de béton comprise entre l'armature et la surface de béton à l'air libre) minima à respecter.



2.2.1.2 Les étapes de la corrosion des armatures

La corrosion avec formation de rouille des armatures dans les bétons armés comporte deux phases :

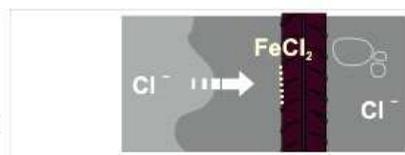
1. les éléments agressifs, tels que le dioxyde de carbone (CO_2) ou les chlorures (Cl^-), présents dans le milieu environnant, pénètrent dans le béton. C'est le stade d'incubation.
2. La seconde phase est celle dite de propagation qui commence lorsque ces corps agressifs se trouvent à des concentrations assez fortes au niveau des armatures. Elle correspond à la croissance de la rouille, qui peut ensuite faire éclater le béton d'enrobage.



2.2.2 Dégradation du béton due aux chlorures (XD/XS)

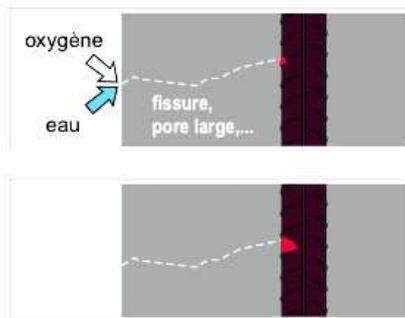
origines:

- de l'extérieur:
- eau de mer
 - vent marin
 - sels de déverglaçage
- de l'intérieur:
- granulats marins
 - accélérateurs



mesures de prévention / protection:

- E/C ↓
- surépaisseur (surenrobage)
- coating



corrosion "piqûre"



danger de rupture soudaine !

A partir d'une certaine teneur en chlorures, la couche de passivation de l'acier est attaquée. La corrosion due aux chlorures est un phénomène dangereux, parce qu'elle se produit localement et entraîne une réduction importante de la section d'armature.

La pénétration des ions de chlore et d'oxygène dans le béton durci est limitée lorsque celui-ci est de bonne qualité, c'est-à-dire rapport E/C faible, teneur suffisante en ciment. L'enrobage des armatures doit être suffisant.

2.2.3 Dégradation du béton due au gel/gel-dégel (XF)

2.2.3.1 DOC3¹ : Cycles Gel/dégel (Freeze-thaw)

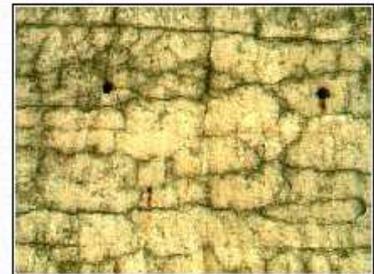
Vocabulaire : pavement : chaussée ; to crack : se fissurer

Freeze-thaw attack is particularly common on large flat areas such as road pavements, where the top surface becomes saturated, either from free water within, or from the outside (e.g. rain), or both.

As the temperature drops below zero the water freezes expansively, imposing internal stresses in the concrete. Repeated cycles of freezing and thawing lead to a 'ratcheting effect' that can eventually cause the concrete surface to crack and break up.

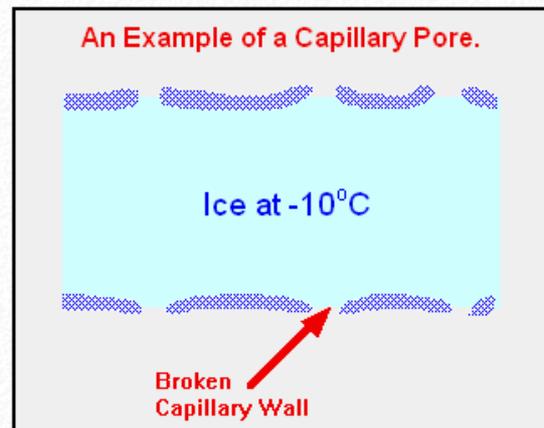


Note: many cycles are needed before deterioration occurs.



The mechanism is essentially two fold:

- 1** As the water in the capillary pores freezes there is a 9% increase in volume. If there is no room for the ice to expand into (i.e. the pores are full of water), the expansive forces will cause disruption of the pores.
- 2** The water within the pores contains dissolved salts in varying concentrations which means that not all the water will freeze at the same time. These differences in ionic concentrations lead to the creation of **osmotic pressures**.



Permeability

The severity of the damage depends to a large extent on the degree of saturation of the pores. If the pores are only partially full of water there will be room for expansion as the ice forms. Concrete with a **low permeability** is less likely to be fully saturated and will therefore suffer **less damage**.

¹ Source : logiciel Calcrete, module : "Concrete as a material", topic: "Durability", British Cement Association

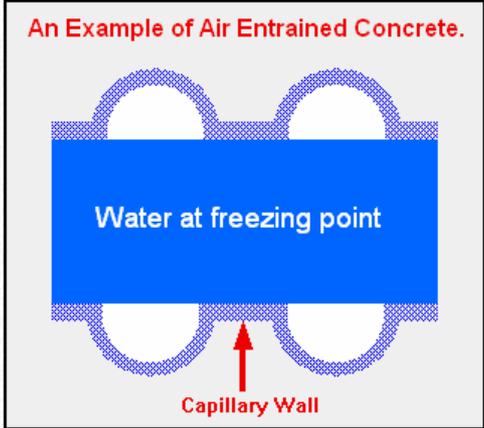
Air-entraining admixtures

The addition of **air-entraining admixtures** to the concrete results in the formation of small discrete air bubbles within the capillary network.

The bubbles act as reservoirs of air into which the ice can expand without causing disruption of the capillaries.

This is the most effective way of minimising the damage from freeze-thaw attack.

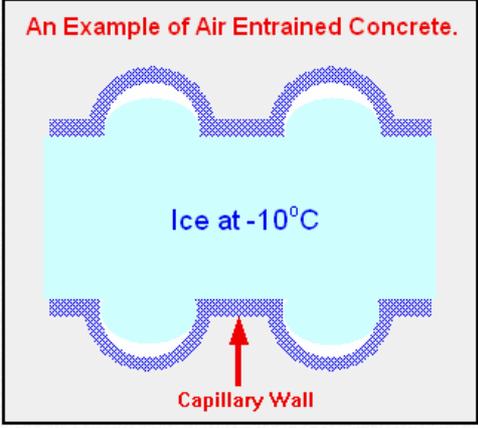
An Example of Air Entrained Concrete.



Water at freezing point

Capillary Wall

An Example of Air Entrained Concrete.



Ice at -10°C

Capillary Wall

- Normal air contents range from about 4 to 6%.
- The air bubbles range in diameter from 0.05 to 1.25mm.
- In the UK it is common practice for the concrete used in construction of road pavements to be air entrained.

2.2.3.2 Mécanisme de dégradation par le gel

Un béton en contact avec l'environnement extérieur contient toujours une grande quantité d'humidité. Lorsque la température extérieure descend au dessous de zéro, l'eau des pores dans les parties les plus froides du béton gèlera en premier lieu.

De surcroît, les forces d'adhésion capillaires abaissent le point de congélation. Il s'ensuit que l'eau contenue dans les pores les plus fins ne se transforme en glace qu'à une température loin au-dessous de 0°C !

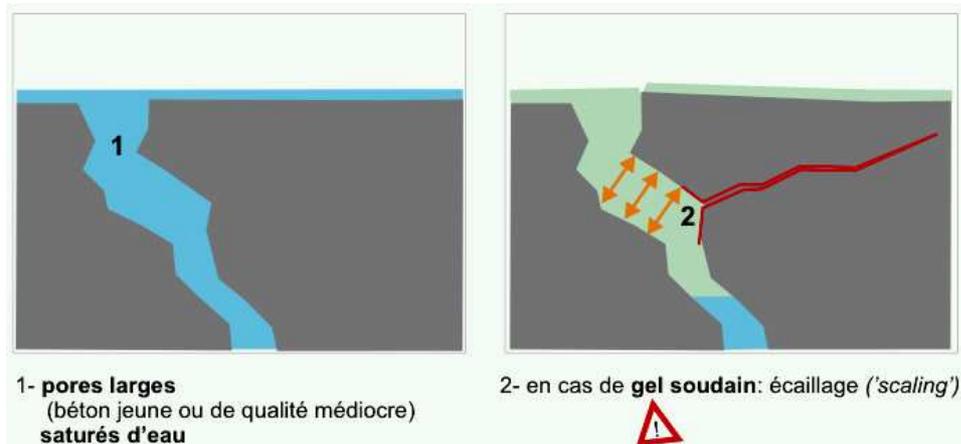
En conclusion:

- la glace se forme d'abord dans les pores les plus grands et ensuite, lors d'un abaissement plus poussé de la température, dans les plus petits,
- seule l'eau contenue dans les pores capillaires les plus larges est susceptible de geler dans notre climat,
- la résistance au gel augmente lorsque le nombre et la section des pores capillaires sont limités, ce que l'on obtient en adoptant un rapport E/C le plus faible possible (max 0.55 dans un environnement normal et 0.5 dans un environnement marin).

Donc pour qu'il y ait détérioration de béton par le gel, il faut donc simultanément:

- des capillaires larges et saturés d'eau
- un gel brusque

La figure suivante montre le mécanisme de dégradation par le gel :



2.2.3.3 Exemples de dégradation due à l'action gel-dégel



Problème si:

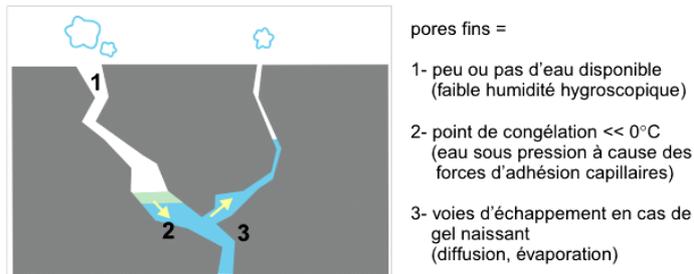
- Béton normal saturé d'eau, gel très brutal
- Béton de mauvaise qualité ou béton jeune
- Défaut de conception (photo de droite ci-dessus : trous pour fixation des potelets du garde-corps -> ruissellement des chlorures sur les poutres qui, en principe, ne devaient pas être en contact avec ceux-ci)



Altération par le gel et des armatures par les chlorures.

2.2.3.4 Mesures de prévention:

- Ne pas bétonner par temps froid ($\geq +5^{\circ}\text{C}$ pendant les premières 72h)
- Utiliser un ciment des classes 42,5R ou 52,5N ou 52,5R
- Réaliser un béton à pores fins (E/C faible):



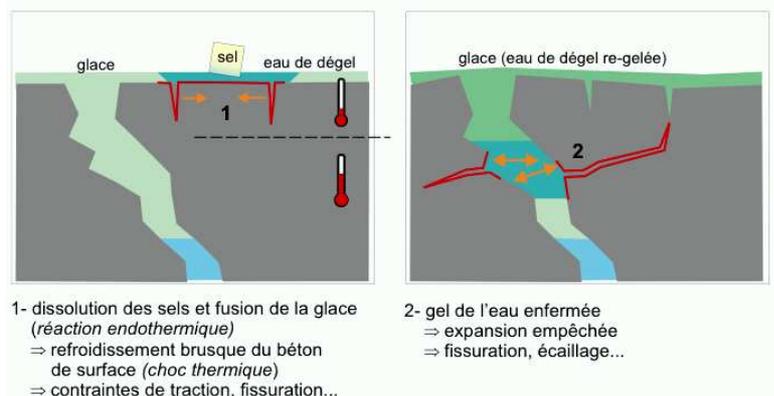
Plus les pores sont fins, plus la quantité d'eau susceptible de geler diminue, et plus le point de congélation baisse.

D'où la règle de base: lors de la fabrication du béton, maintenir eau-ciment le plus bas possible (max 0,55 dans un environnement normal et max 0,5 dans un environnement marin), et prévoir un dosage suffisant en ciment.

2.2.4 Effet des sels de déverglaçage ou de l'eau de mer sur le béton (XD/XS)

Pour dégager des surfaces horizontales (routes, ponts, ...) de verglas et de neige, on épand des sels de déverglaçage. Leur utilisation a les effets suivants:

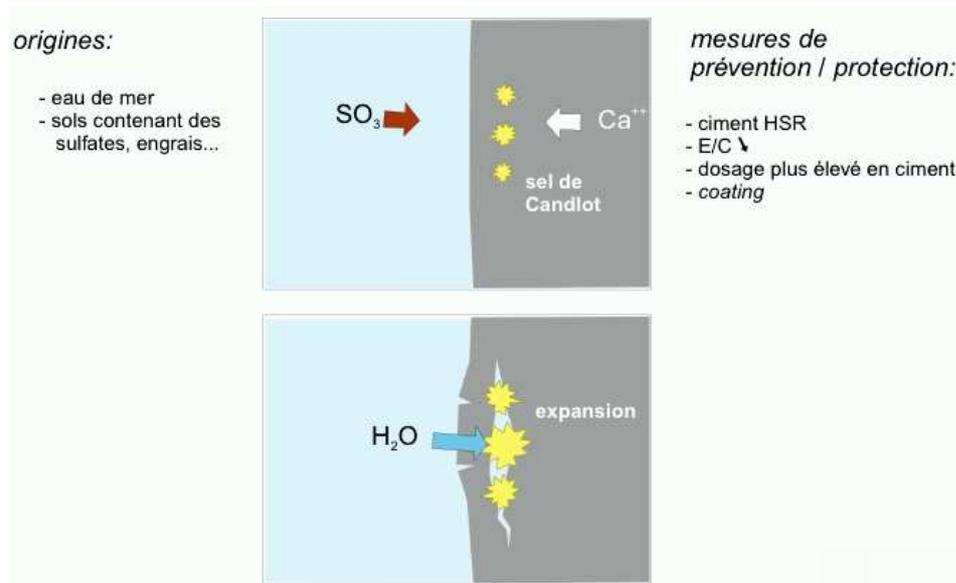
- La chaleur nécessaire pour faire fondre la glace et la neige provient de la couche superficielle du béton. La température y chute brutalement et la couche en question subit un choc thermique. La différence de température entre la couche superficielle et le reste du béton entraîne des **contraintes internes** qui peuvent donner lieu à une fissuration de la zone superficielle.
- Après le dégel, on obtient une eau à **forte concentration en chlorures**. Ceux-ci sont alors entraînés par l'absorption capillaire. La présence du sel abaisse le point de congélation et cela d'autant plus que la concentration augmente. La combinaison point de congélation/température du béton peut être telle que deux couches gelées soient séparées par une couche intermédiaire non gelée (voir schéma ci-dessous). Si suite à un abaissement supplémentaire de la température, l'eau de cette couche vient à geler, elle ne trouve pas d'espace d'expansion et repousse de ce fait la couche supérieure. Cet effet s'appelle 'écaillage' ou 'scaling'.



Remarque : Certaines constructions à l'abri des intempéries sont quand même exposées à l'agression des sels de déverglaçage (ex. : les parkings à étages)

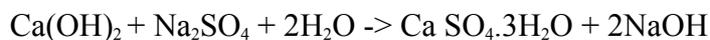
2.2.5 Dégradation due à l'attaque chimique (XA)

2.2.5.1 dégradation due aux sulfates



Le sol et les eaux souterraines peuvent contenir des sulfates. Leur présence peut également être la conséquence de diverses activités industrielles ou de l'utilisation d'engrais.

Les ions de sulfate pénètrent à l'intérieur du béton soit par diffusion, soit par absorption capillaire et y réagissent de la manière suivante:



Dans cette réaction chimique, un des produits qu'on obtient est le gypse ou le sulfate de calcium.

Le sulfate de calcium réagit uniquement avec les aluminates de calcium hydraté et forme ainsi un sulfo-aluminate de calcium (appelé ettringite) dont la propriété est de gonfler. Les contraintes internes qui en résultent peuvent donner lieu à une **fissuration** du béton et même à sa **destruction**.



An Example of a cube suffering from sulfate attack compared with a normal cube. ²

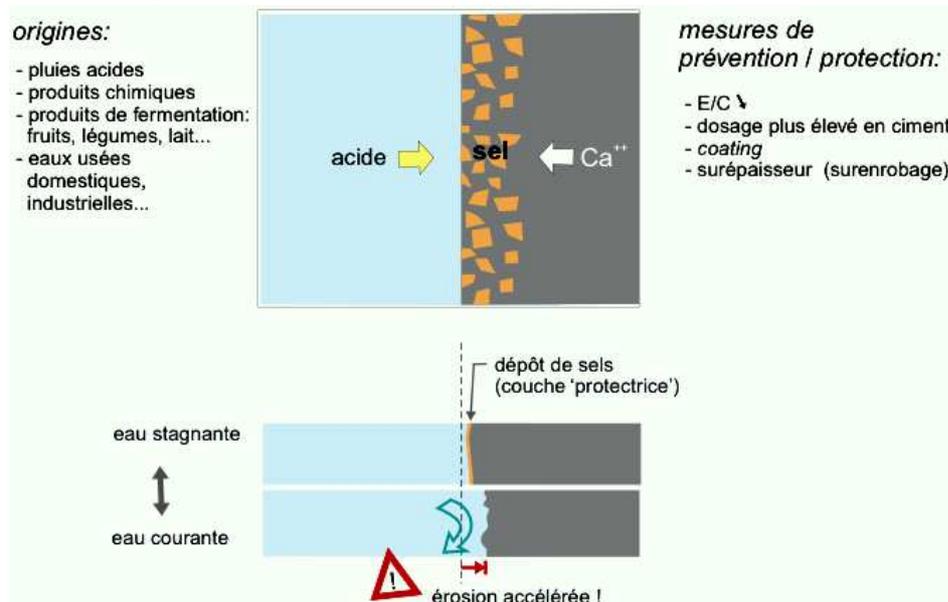
2.2.6 Mesures de préventions:

Pour éviter une attaque due aux sulfates, on fera les choix suivants:

² Source : logiciel Calcrete, module : "Concrete as a material", topic: "Durability", British Cement Association

- Utiliser un ciment HSR (High Sulfate Resisting). Un ciment CEM I HSR (ciment Portland à haute résistance aux sulfates) donne un béton avec une teneur en aluminates de calcium fort réduite.
- Réaliser une perméabilité limitée. Selon la teneur en sulfates à laquelle le béton est exposé, il faut respecter des valeurs minimales pour la teneur en ciment et maximales pour le rapport eau/ciment.

2.2.7 Dégradation due aux acides



Le béton est un matériau basique et se voit donc attaqué par les acides. Ceux-ci réagissent avec les **corps composés à base de calcium** du ciment durci: l'hydroxyde de calcium, les silicates et aluminates de calcium hydratés. La réaction mène à la formation de **sels de calcium de l'acide corrodant** ainsi que de la **silice (SiO₂)**. Ainsi, l'attaque des silicates de calcium hydratés par l'acide chlorhydrique donne le **chlorure de calcium** très soluble.

L'acide carbonique est dangereux aussi pour le béton. Même la faible quantité d'acide carbonique présente dans une eau de ruissellement pure (comme l'eau de dégel) parviendra à dissoudre très lentement le Ca(OH)₂ que l'on trouve en surface des éléments en béton, délavera cette surface et entraînera une **érosion** superficielle.

Dans le **secteur agricole** et dans **l'industrie chimique**, le béton se trouve régulièrement en contact avec des acides organiques comme les **acides acétiques et lactiques**. On les trouve par exemple dans le "jus" qui se forme dans les silos lors de la fermentation du fourrage vert. Les aliments pour animaux en contact avec de l'eau (par exemple lorsque la nourriture tombe à côté de l'auge) surira et attaquera le sol de l'étable ou de la porcherie.

2.2.8 Mesures de prévention

Les mesures à prendre pour ralentir la corrosion sont fonction du degré d'acidité. La corrosion est inévitable à moins d'appliquer une couche protectrice (coating). Lorsque la structure des pores est fermée, l'attaque du béton se fait **de l'extérieur**. Pour un **rapport eau/ciment élevé**, la solution acide peut être absorbée par capillarité: la corrosion se fait alors aussi **de l'intérieur**.

Donc pour tenir compte de l'attaque due aux acides, on peut prévoir une **épaisseur sacrifiée**, dimensionnée sur la base de la durée de vie envisagée pour la construction d'une part et de la vitesse de corrosion d'autre part.

2.3 Bibliographie

- Technologie du béton, Edition 1994, Groupement Belge du Béton
- Technologie du béton, Edition 1998, Groupement Belge du Béton
- ABC du ciment et du béton, FEBELCEM.