

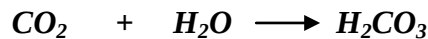
## Chapitre IV : Pathologie des bétons armé

### IV.1 La carbonatation

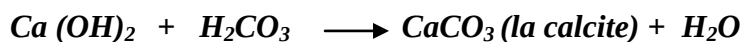
#### Qu'est ce que la carbonatation ?

La carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel des matériaux à base de liant minéral, qui conduit à la formation de carbonates de calcium par réaction entre les composés des ciments (principalement **la portlandite**) et **le dioxyde de carbone** atmosphérique ( $\text{CO}_2$ ), présent dans l'air à un taux moyen de 0,03 % en volume. Ce taux est plus important en milieu urbain qu'en milieu rural. Cette réaction entraîne la consommation de bases alcalines présentes dans la solution interstitielle des bétons aboutissant à une diminution du pH qui passe d'une valeur de 13 à une valeur inférieure à 9. D'un point de vue chimique cette réaction se présente ainsi :

Le gaz carbonique est inerte lorsqu'il est sec, et il se *dissout aisément dans l'eau* pour donner un acide faible ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ):



Et comme le béton est un matériau basique, alors il est vulnérable aux attaques acides, le  $\text{H}_2\text{CO}_3$  réagit avec la solution interstitielle basique du béton, surtout **la portlandite**  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  pour donner la carbonate de calcium en libérant de l'eau:



L'attaque commence à la surface et le  $\text{CO}_2$  pénètre par diffusion dans la phase liquide.

- La carbonatation du béton est un **phénomène progressif**, car elle atteint des couches plus profondes avec le temps, et avec une vitesse décroissante parce que le  $\text{CO}_2$  doit **diffuser** à travers le **réseau poreux** y compris la zone de surface du béton déjà carbonatée.
- La vitesse de la carbonatation est fonction de deux paramètres importants sont: la perméabilité et le taux d'humidité relative du milieu ambiant.
  - ❖ Dans les environnements **secs**, la quantité **d'eau est insuffisante pour dissoudre le  $\text{CO}_2$** .
  - ❖ Dans les environnements **très humides**, le béton est **saturé**, ce qui **ralentit** considérablement **la diffusion du  $\text{CO}_2$** .

#### 6.1/ Les facteurs qu'influencent à la carbonatation

Les principaux facteurs qui influencent la vitesse de carbonatation du béton sont résumés dans le tableau

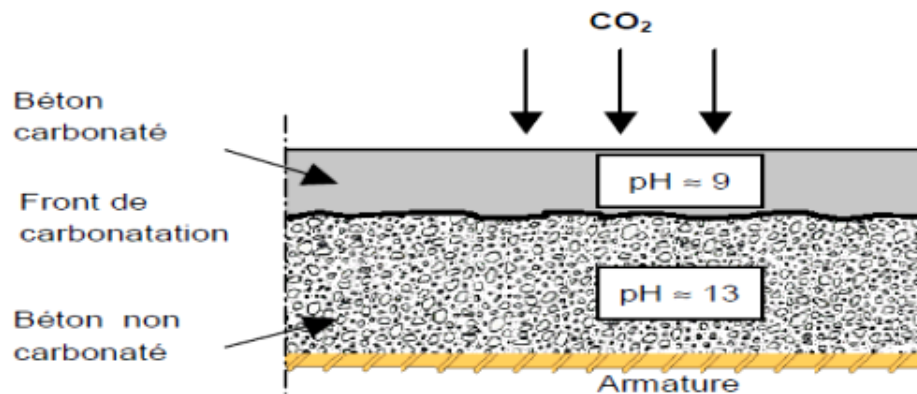
| facteur                     | influence                                                                                                                                                          |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| E/C (eau/ciment)            | Plus ce rapport est bas, plus la vitesse de carbonatation est faible                                                                                               |
| Dosage en ciment            | Une augmentation du dosage diminue la profondeur de carbonatation à un temps donné                                                                                 |
| Type de ciment              | les bétons de ciment avec des constituants secondaires (laitiers, cendres volantes, pouzzolanes) se carbonatent plus rapidement sur les bétons au ciment portland. |
| Résistance à la compression | la vitesse de carbonatation diminue si l'augmentation de résistance se traduit par une diminution de la porosité et une augmentation des produits                  |
| cure                        | Une bonne cure diminue la vitesse de carbonatation, car le béton sera plus compact et l'hydratation du ciment augmentée                                            |
| humidité                    | Vitesse de carbonatation maximum pour une humidité comprise entre 40% et 80%                                                                                       |
| Température                 | Une augmentation de la température augmente la vitesse de carbonatation                                                                                            |

### 6.2/ Les conséquences de la carbonatation : sont

- ☐ La carbonatation peut être bénéfique, et parmi ses effets positifs on a :
  - La réduction de la porosité, puisque le  $\text{CaCO}_3$  occupe un volume plus important que le  $\text{Ca(OH)}_2$  qu'il remplace;
  - L'hydratation du ciment anhydre par l'eau libérée par le  $\text{Ca(OH)}_2$  lors de la carbonatation.
  - Une augmentation de la dureté de surface, alors une augmentation de la résistance de la surface ;
- ☐ Une réduction des mouvements d'humidité ;
- ☐ Une diminution de la perméabilité superficielle ;
- ☐ Une résistance accrue à la pénétration des agents agressifs qui dépend de la perméabilité.
- ☐ Si la carbonatation est plutôt favorable pour le béton, car referme la surface vis-à-vis des agressions extérieures (dépôts de calcaire), au contraire elle est très dommageable pour les armatures qui se retrouvent à un ( $\text{pH} \leq 9$ ) et qui ne sont plus passivées ce qui peut alors amorcer leur processus de corrosion.
- ☐ Dans des conditions normales, les armatures enrobées d'un béton compact et non fissuré sont protégées naturellement des risques de corrosion par **un phénomène de passivation** qui résulte d'une **couche protectrice par la chaux sur l'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{CaO}$ )** à la surface (dite couche de passivation). La présence de **chaux maintient la basicité** du milieu entourant les armatures.

Les armatures sont protégées tant qu'elles se trouvent dans un milieu présentant un pH compris entre 9 et 13,5. Deux principaux phénomènes peuvent dans certaines conditions détruire cette protection et causer la corrosion des armatures :

- La carbonatation du béton d'enrobage par l'adsorption du gaz carbonique contenu dans l'atmosphère;
- La pénétration des ions chlorures, jusqu'au niveau des armatures.



## IV.2 Les attaques des chlorures

L'action des chlorures est spécifique à certains environnements dans lesquels peut se trouver le béton comme les ouvrages soumis aux sels de déverglaçage ou situés en site maritime. Les ions chlorures sont les plus agressifs, vis-à-vis des armatures. Une teneur élevée en ion chlore provoque la corrosion si le béton est dans un environnement humide.

**IV.2.1/L'origine des chlorures :** La présence des chlorures peut avoir deux origines:

- Externe:** par pénétration du milieu ambiant (eau de mer, eau souterraine, sel de déverglaçage...).
- Interne:** Il y a plusieurs provenances internes de chlorures comme:
  - Les adjuvants chlorurés incorporés lors du gâchage, comme le  $\text{CaCl}_2$  pour accélérer la prise;
  - Certains granulats contiennent le  $\text{Cl}$ , comme le sable de mer;
  - L'eau de gâchage peut contenir des chlorures.

La concentration des chlorures est exprimée en % de la masse du ciment dans les normes.

## IV.2.2/ Le Phénomène

Les ions chlorures pénètrent dans le béton et réagissent soit:

- Avec le **silicate de calcium hydraté (CSH)** surtout par adsorption
- Avec les **aluminates tricalciques ( $\text{C}_3\text{A}$ )** selon la réaction suivante:  $\text{CaCl}_2 + \text{C}_3\text{A} + 10 \text{H}_2\text{O}$  et donne le **monochloroaluminates hydratés ( $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )** qui est relativement stable dans le béton.

Il permet de fixer des chlorures dans le béton, ce qui réduit la teneur en chlorures soluble et limite les risques de corrosion, pour cela les ciments riches en  $C_3A$  offrent une meilleure protection contre la corrosion des armatures.

Ce n'est pas la teneur totale en chlorures qui influence la corrosion, car une partie des chlorures est liée chimiquement aux produits de l'hydratation du ciment, une autre partie est liée physiquement en étant adsorbée sur les parois des pores de gel, et seule la partie restante appelée chlorure libre (les ions de chlorures non fixés) qui est disponible pour les réactions agressives avec les armatures. Dans la norme européenne, les ions chlore sont limités à: - 1 % pour les bétons non armés;

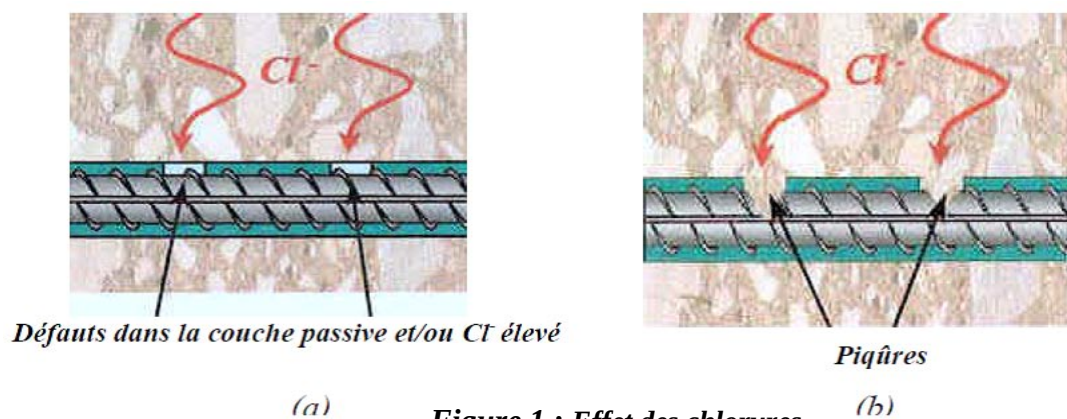
- 0.4 % pour les bétons armés;

- 0.10 % à 0.20 % pour les bétons précontraint selon la classe

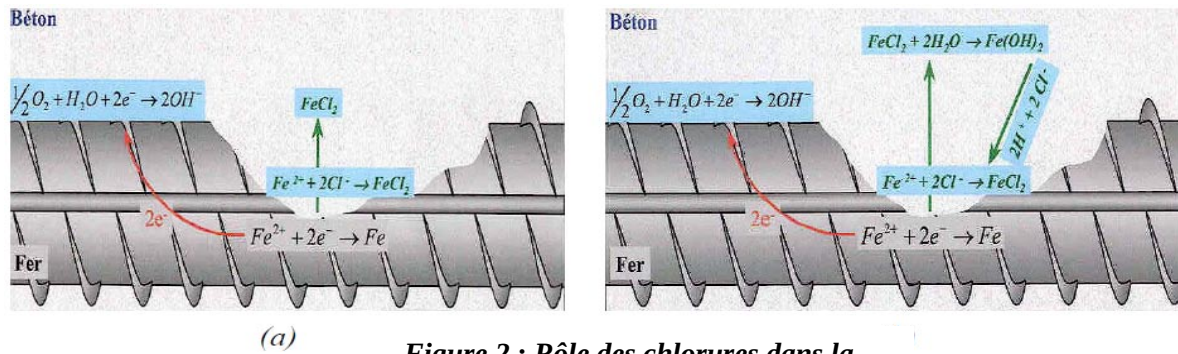
La vitesse de pénétration des chlorures dépend encore de **la porosité** de la pâte de ciment.

#### IV.2.3/ Les conséquences

L'attaque des chlorures se distingue par l'entraînement de la corrosion des armatures avec une présence suffisante de  $O_2$  et  $H_2O$  pour soutenir la réaction. Les chlorures sont en général distribués de manière hétérogène. **Ils s'introduisent dans la couche passive**, remplaçant un peu de l'oxygène et augmentant à la fois sa solubilité, sa perméabilité, et sa conductivité ionique. La dégradation de la couche passive est un phénomène local, ce qui conduit à une corrosion par piquûre où le  $(Cl^-)$  est élevé (Figure 1).



La présence de chlorures favorise également la formation de **chlorure ferreux ( $FeCl_2$ )**, qui est soluble dans le faible pH qui existe à l'anode, empêchant par conséquent la fabrication d'ion  $Fe_{2+}$  qui pourrait freiner le processus de corrosion (**figure 2.a**). A quelques distances de l'anode, où la concentration de PH et **d'oxygène ( $O_2$ )** est plus élevée, le chlorure ferreux ( **$FeCl_2$** ), se dégrade, le  **$Fe(OH)_2$**  précipite, le  **$Cl^-$  et  $H^+$**  retournent à l'anode (**Figure 2.b**).



**Figure 2 : Rôle des chlorures dans la corrosion par piquûre**

### 7.3/Les facteurs influant sur la corrosion des armatures

- ✓ **L'enrobage:** Lorsqu'une structure en béton armé se trouve dans un environnement agressif, la première partie critique de toute la structure est l'enrobage qui est la première défense pour la protection des armatures contre la corrosion, cette capacité de protection offerte par le béton aux armatures dans le béton armé s'évalue par:
  - La qualité du béton d'enrobage, en particulier la porosité ;
  - L'épaisseur d'enrobage qui dépend du niveau d'agressivité du milieu d'exposition.
- ✓ **L'humidité:** Le taux de corrosion le plus élevé est observé dans les couches superficielles des pièces en béton soumises à des alternances régulières de sécheresse et d'humidité.
- ✓ **La teneur en chlorure:** Lorsque la teneur en chlorure dépasse la valeur critique, la couche d'enrobage ne peut plus protéger l'acier.
- ✓ **L'oxygène:** L'oxygène dissous joue un rôle primordial dans la réaction dite cathodique de la corrosion des aciers, ainsi plus la teneur en oxygène est élevée, plus la vitesse de dissolution du métal est grande.

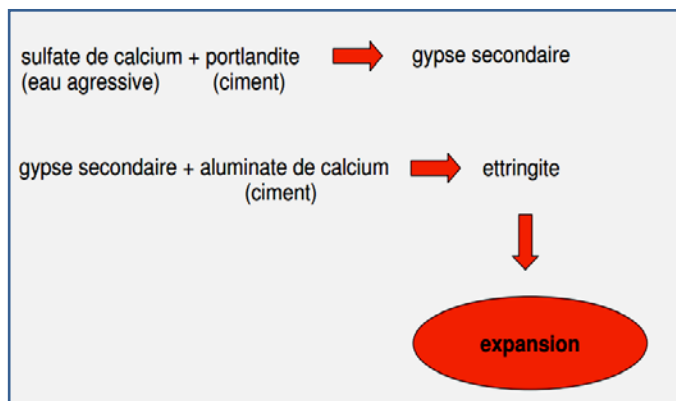
### IV.2.4/ Les conséquences de la corrosion des armatures

- ☐ La corrosion de l'acier provoque la réduction de la section de l'armature (partiellement, localement ou en totalité).
- ☐ De plus, la réaction chimique de formation de la rouille (mélange d'oxydes et d'hydroxyde de fer) s'effectue avec une expansion (le volume de l'acier devient 3 à 4 fois supérieur). Ce gonflement provoque dans le béton des contraintes d'expansion importantes.
- ☐ La manifestation visuelle qui en résulte se présente sous forme de fissures en surface qui s'amorcent à partir de l'acier.

### IV.3/ Les attaques Sulfatiques

Les attaques sulfatiques sont un problème majeur de durabilité des bétons. Ces attaques détruisent le béton en dégradant ses propriétés mécaniques. Il s'agit notamment des réactions sulfatiques qui provoquent des gonflements dans le béton et des réseaux de fissures.

- Les réactions sulfatiques sont provoquées par l'action des sulfates qui attaquent la portlandite (CH) pour former du gypse secondaire qui réagit avec les aluminates pour former le sel de Candlot (l'ettringite).
- La formation de l'ettringite secondaire s'effectue soit à partir des résidus de  $C_3A$  anhydre, soit à partir des MSA (monosulfoaluminates de calcium e hydratés



#### IV.3.1 /Types d'attaque sulfatique : On distingue :

- ✓ l'attaque sulfatique interne, qui fait intervenir des sulfates déjà présents dans les constituants de béton (DEF).
- ✓ l'attaque sulfatique externe qui se produit dès lors que les conditions externes sont réunies et au contact direct avec une source de sulfate (sols, eaux, atmosphère).

**RSI** = Réaction sulfatique interne. **DEF** = Formation différée d'ettringite.

- ❑ **L'ettringite** est une espèce minérale contenant des sulfates. Cette espèce est un trisulfoaluminate de calcium hydraté issu **de la réaction entre les aluminates de calcium et le gypse**. Une couche d'ettringite se forme alors autour des grains de ciment anhydres.

#### IV.3.2/Condition de RSI (DEF):

Trois conditions doivent être remplies pour déclencher cette pathologie

- L'humidité environnementale.
- La température élevée.
- La nature du ciment

#### IV.3.3 /Symptômes :

- ✓ **Gonflement du béton à cœur**

le béton subi un échauffement au jeune âge, la formation différée d'ettringite peut avoir lieu sans apport d'ions sulfate externes. Ces réactions sont susceptibles de provoquer un gonflement du béton.

- ✓ **Fissuration / faïençage du parement**

Les réactions internes sulfatiques sont caractérisées par des fissures en surface qui apparaissent après plusieurs années d'exposition à des conditions sévères caractérisées par une forte humidité.



Ce phénomène peut se trouver dans des pièces massives en béton coulées en place en période estivale ou sur des pièces de béton ayant subi un traitement thermique.

#### **IV.3.4/ Attaque sulfatique externe**

Elle se produit lorsqu'un matériau cimentaire se trouve en contact direct avec une source de sulfate, comme dans les sols, les eaux souterraines, les eaux d'infiltrations, etc.

#### **IV.3.5 /Symptômes :**

L'expansion est provoquée par la formation d'ettringite

- l'expansion se traduit par une fissuration et un éclatement superficiel du béton
- les fissures facilitent la pénétration des agents agressifs et accélèrent le processus de dégradation

#### **IV.3.6 / Facteurs influent aux attaques sulfatiques :**

- ☐ Une teneur élevée en sulfates provenant du ciment et/ou des granulats.
- ☐ Un environnement humide favorise les échanges et le transport des ions.
- ☐ Un taux important d'alcalins dans le béton contribue également à enrichir le milieu en sulfates.

### **IV.4.Les réactions Alkali-granulats**

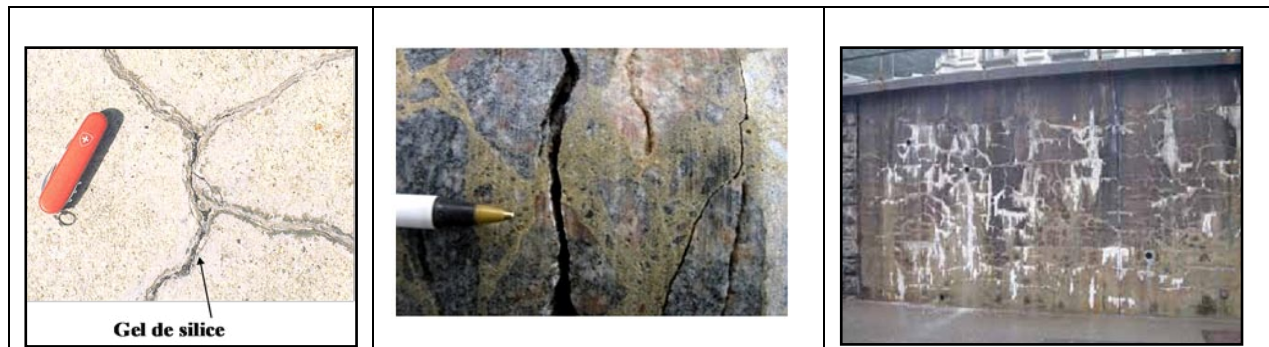
#### **IV.4.1/Définition**

Une pathologie du béton, souvent appelée « cancer du béton », fait intervenir les alcalins du ciment (le sodium  $\text{Na}^+$  et le potassium  $\text{K}^+$ ) et la silice de certains granulats pour former des produits gonflants (un gel). Cette réaction se produit surtout à l'interface granulat-pâte de ciment, C'est pourquoi on l'appelle l'alcali-réaction-granulats.

Les structures les plus touchées sont celles qui sont en contact avec l'eau ou celles qui se situent dans des environnements humides ; ce sont donc essentiellement les ouvrages de génie civil et certaines pièces humides de bâtiments.

**Les mécanismes de l'alcali - réaction** consistent, généralement, en la dissolution de **la silice** par la solution interstitielle **alcaline** du béton suivie de la formation d'un **gel gonflant**.

**Il en résulte de l'alcali-réactions des expansions à l'intérieur du béton qui engendre des tensions, puis des gonflements et des fissures.**



### Dégâts d'alcali-réaction dans des murs de soutènement

#### IV.4.2/ Types d'alcali-réaction

Il existe 3 types de réactions alcali-granulats, les suivants

- ❑ **Les réactions alcali-carbonate:** C'est la réaction impliquant les silicates. Elle est créée avec des granulats composés de dolomite argileuse et de calcaire à grains fins avec inclusion de minéraux argileux, le mécanisme de gonflement est lié à l'absorption d'eau des argiles.
- ❑ **La réaction alcali- silice:** C'est la réaction la plus fréquente qui fait intervenir les alcalins du ciment et la silice de certains granulats. en général, elle se produit dans un délai de quelques années après la fabrication de l'élément en béton.
- ❑ **La réaction alcali- silicate:** Elle est semblable à la réaction alcali-silice mais de cinétique plus lente, elle est très rare et va se produire en général quelques décennies après la fabrication de l'élément en béton.

**Remarque :** Le développement des phénomènes d'alcali-réaction dans les bétons nécessite la conjugaison de trois principaux facteurs :

- ❑ **Une teneur suffisante en alcalins**

Dont la plus grande part est contenue dans le ciment mais que l'on peut également retrouver dans certains granulats (les feldspats et les Micas), dans les ajouts (les laitiers et les cendres volantes) et comme les adjuvants

- ❑ **Des granulats réactifs**

Dont le type peut faire varier la réaction. Certains granulats ont une composition minéralogique plus réactive que d'autres. Un granulat concassé sera plus réactif qu'un granulat roulé car ses parties fraîchement mises à nu par le concassage présentent plus de matière réactive qu'un granulat roulé qui aura été poli.

- ❑ **Une humidité constante du béton :**



De 70 à 80% qui va permettre le transport des alcalins vers les phases réactives. On entend par là que seuls les ouvrages en béton qui sont constamment en contact avec de l'eau (les piscines, les murs de soutènement, les tunnels, les barrages ect ). On a aussi, tous les éléments en béton qui ne sont pas en contact avec l'eau, mais qui ont une grande épaisseur, dont l'humidité ne descend pas en général en dessous de 70%

□ D'autres facteurs pourront influencer la réaction comme des hausses de température qui peuvent largement l'accélérer ou des charges alcalines externes dues aux eaux souterraines, aux eaux sulfatées et aux eaux issues des sels de déverglaçages.

#### VI.4.3/ Désordres dus à l'alcali - réaction

En général les désordres apparaissent à des échéances variables de deux à dix ans ou plus. On peut relever plusieurs types de désordres

- **Influence sur les propriétés mécaniques** : peuvent se voir ainsi diminuer de 30 –50 %.
- **La fissuration en réseau** : C'est le dégât le plus fréquemment rencontré sur les parements des ouvrages atteints par les réactions. Cette fissuration est généralement irrégulière et peut prendre la forme de :
  - ✓ Un faïençage avec des mailles de petites dimensions (20 à 50 mm).
  - ✓ Un réseau de fissures de dimension plus grande (30 à 40 cm).

Une fissuration orientée (plus rare) qui reproduit sur le parement du béton le tracé des contraintes régnant au sein de l'élément.

### VI. 5. Gel-dégel

La détérioration par le gel ne se produit qu'en régions froides, Les cycles de gel-dégel provoquent une expansion de la masse du béton jusqu'à fissurer le matériau s'il est de mauvaise qualité. Car la transformation de l'eau en glace se traduit par une augmentation de volume de 9 % qui provoque une expulsion de l'eau hors des capillaires.

- Les risques de dégradation par le gel n'existent que lorsque le béton est en contact de l'eau, dans un état saturé ou voisin de la saturation.
- On distingue deux types de dégradation :
  - ✓ **Le Gel interne : dans la masse**
    - Fissuration interne
    - Gonflement du **béton**
  - ✓ **L'écaillage : en surface**

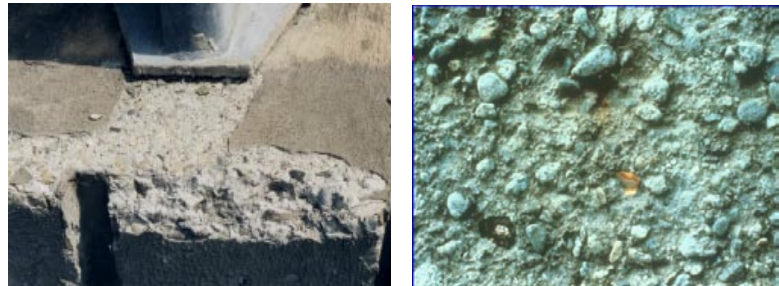
- Eclatement superficiel de la surface du béton exposée aux sels de déverglaçage, sous forme d'écailles

❖ **L'effet de la variation de température sur le béton engendre :**

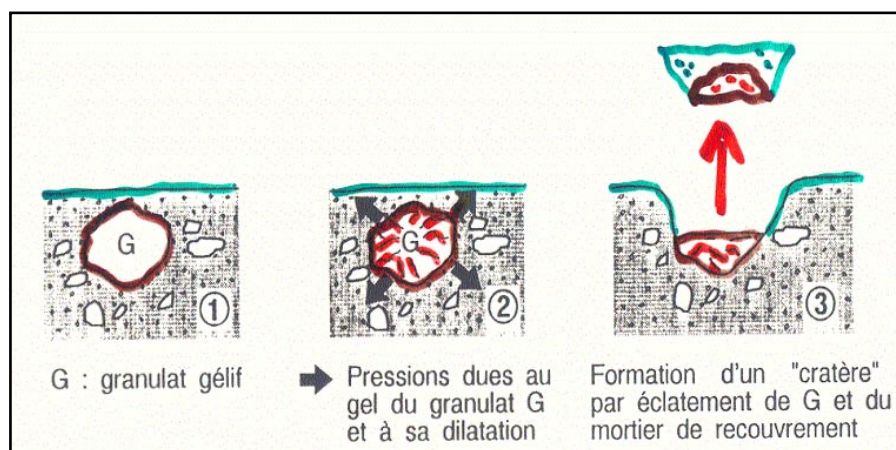
- Elévation rapide : risque d'éclatement (vapeur)
- Basse température : risque d'éclatement (glace)

### VI. 5.1/ Manifestations

- Gonflements
- Fissures (en réseau)
- Ecaillage en surface
- Désagrégation du béton



**Ecaillage en surface**



### VI. 5.2/La gélivité des granulats

Autre facteur responsable de la gélivité d'un béton

- Le rôle de la porosité d'un granulat (volume et distribution des pores) est essentiel pour expliquer son caractère gélif.
- Les granulats gélifs ont généralement une forte porosité, formée de pores très fins

### VI. 5.3/Prévention Vis-à-vis gel interne,

- Obtenir un réseau de petite bulle d'air fine et bien répartie :
- Formulation du béton adaptée, par exemple pour bétons classiques : introduction d'un adjuvant entraîneur d'air dans le béton frais
- Choix des granulats : non gélifs (mais attention au risque décollement interface pâte granulats si trop poreux)