

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 (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 (H_2CO_3):



Et comme le béton est un matériau basique, alors il est vulnérable aux attaques acides, le H_2CO_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 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 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 CO_2** .
 - ❖ Dans les environnements **très humides**, le béton est **saturé**, ce qui **ralentit** considérablement **la diffusion du 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

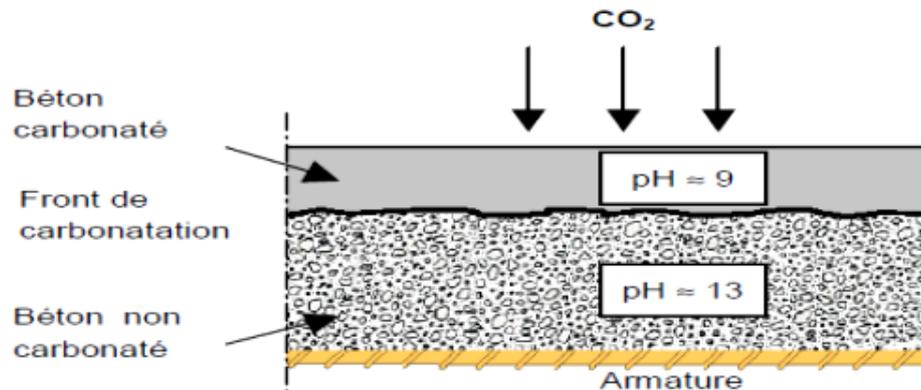
| facteur | influence |
|-----------------------------|--|
| E/C (eau/ciment) | Plus ce rapport est bas, plus la vitesse de carbonatation est faible |
| Dosage en ciment | Une augmentation du dosage diminue la profondeur de carbonatation à un temps donné |
| Type de ciment | les bétons de ciment avec 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 CaCO_3 occupe un volume plus important que le Ca(OH)_2 qu'il remplace;
 - L'hydratation du ciment anhydre par l'eau libérée par le 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:

- a) **Externe:** par pénétration du milieu ambiant (eau de mer, eau souterraine, sel de déverglaçage...).
- b) **Interne:** Il y a plusieurs provenances internes de chlorures comme:
 - Les adjuvants chlorurés incorporés lors du gâchage, comme le CaCl_2 pour accélérer la prise;
 - Certains granulats contiennent le 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 (C_3A)** 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 piqûre où le (Cl^-) est élevé (Figure 1).

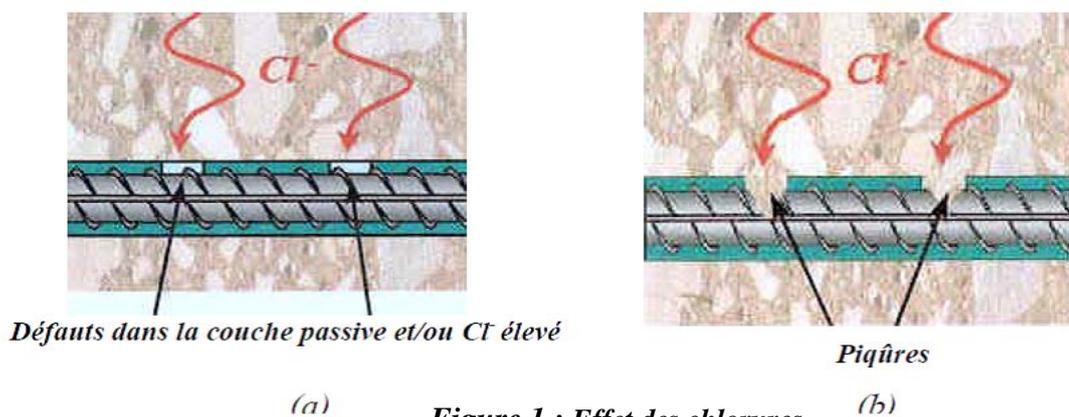


Figure 1 : Effet des chlorures

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**).

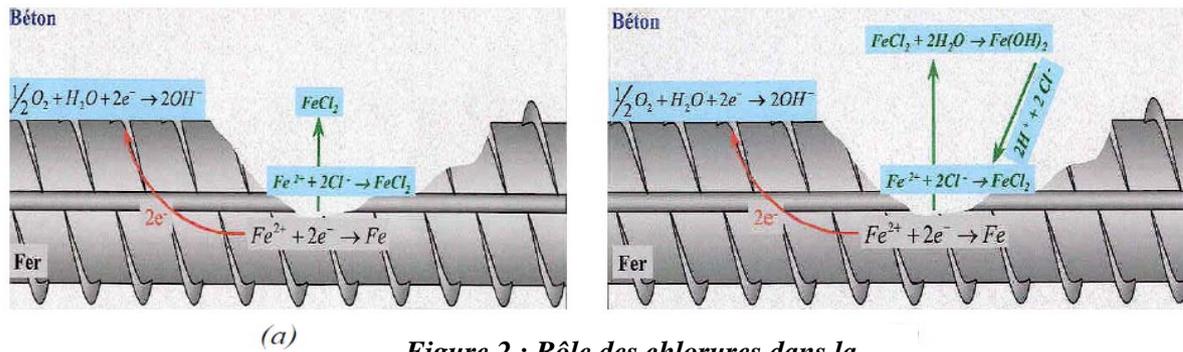


Figure 2 : Rôle des chlorures dans la corrosion par piqûre

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.

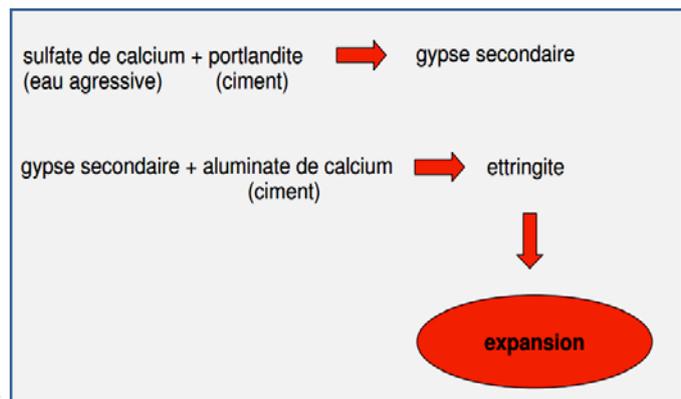
IV.2.4/ Les conséquences de la corrosion des armatures

- 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 C₃A anhydre, soit à partir des MSA (monosulfoaluminates de calcium 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

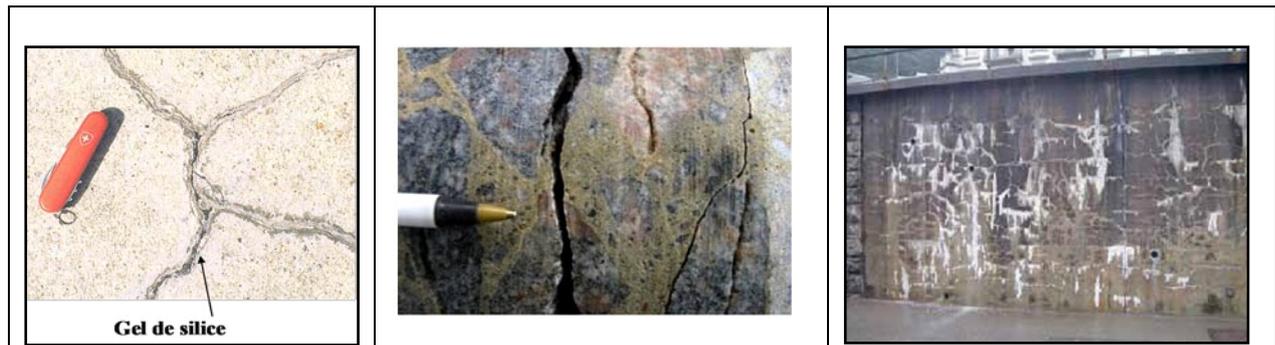
IV.4.1/Définition

Une pathologie du béton, souvent appelée « cancer du béton », fait intervenir les alcalins du ciment (le sodium Na^+ et le potassium 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**

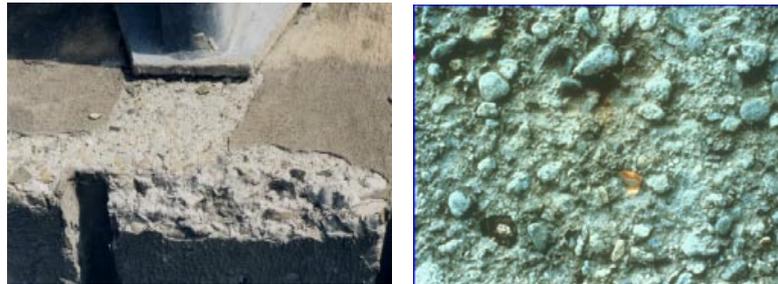
- Eclatement superficiel de la surface du béton exposée aux sels de déverglaçage, sous forme d'écailles

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

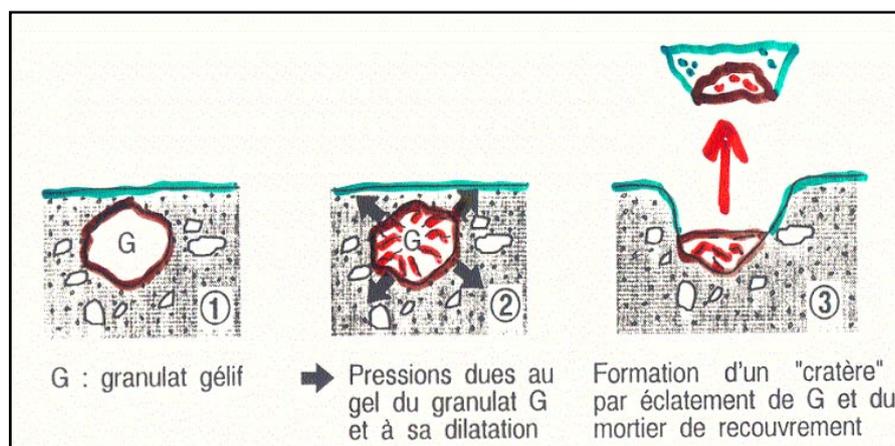
- Elévation rapide : risque d'éclatement (vapeur)
- Basse température : risque d'éclatement (glace)

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)

CHAPITRE III : La dégradation par fissuration

Se sont des ouvertures linéaires au tracé régulier dont la largeur est comprise entre 0.2 et 2 mm. Une fissure est une rupture entre deux parties du matériau qui ne sont plus liées et qui deviennent séparable. La nature des fissures varie en fonction des causes qui leur ont donné naissance, Il est possible de classer les fissures en trois catégories selon leur évolution.

- ❖ *Les fissures passives ou mortes*, pour les fissures dont les ouvertures ne varient plus dans le temps, quelles que soient les conditions de température, d'hygrométrie ou de sollicitation de l'ouvrage. Cependant, elles sont rares, car les matériaux alentours à la fissure varient selon température, c'est le phénomène de dilatation thermique. Les fissures stabilisées, lorsque leur ouverture varie dans le temps en fonction de la
- ❖ *Les fissures stabilisées*, lorsque leur ouverture varie dans le temps en fonction de la température.
- ❖ *Les fissures actives ou évolutives*, lorsque leur ouverture continue à évoluer indépendamment des cycles de température

III.1/ Les caractéristiques des fissures : elles se résument en :

- *L'âge et l'évolution*: une fissure risque avec le temps de se trouver partiellement bouchée par la formation de cristaux de calcite, la végétation ou la poussière. L'évolution d'une fissure est connue entre deux examens successifs et elle dépend de la variation de l'ouverture d'une fissure dans le temps.
- *Le tracé*: se définit par son **orientation** et **sa longueur** mesurable. L'orientation par rapport à certains directions (parallèles, obliques,...), l'orientation est souvent révélatrice de son origine, lorsque la fissure est continue sur l'axe de d'orientation, elle est dite **fissure franche** et si l'axe d'orientation est défini par plusieurs fissures successives, elle est dite **discontinue**;
- *L'ouverture*: On définit l'ouverture d'une fissure par **l'ouverture maximale relevée sur le tracé**, elle peut s'évaluer facilement à l'œil nu sur son tracé en prenant un repère sur un réglet ou avec le fissuromètre.
- *La profondeur*: Une fissure est dite **traversante**, lorsqu'elle est visible sur deux faces de la structure. Une fissure est dite **aveugle**, si elle est traversante mais bouchée sur la face non accessible de la structure, elle est souvent d'ouverture importante. Une surface est dite de **surface**, si l'ouverture est maximale en surface et s'annule au sein du matériau;

- **L'activité:** L'activité caractérise la variation dimensionnelle de l'ouverture de la fissure dans le temps.

III.2/ Types de fissuration selon leurs causes d'apparition

a) *La fissuration fonctionnelle du béton armé*

En fonctionnement normal du béton armé, les éléments travaillant en traction ou en flexion se fissurent, mais ces fissures sont maîtrisées, ce qui signifie qu'elles sont limitées par des règles fixant la limite admissible d'ouverture des fissures en fonction de l'agressivité du milieu

b) *La fissuration accidentelle*

Les codes de calcul prennent en compte la fissuration accidentelle d'une manière globale grâce à la notion d'armature adhérente minimale intervenant dans la condition de non fragilité.

c) *La fissuration précoce*

Des problèmes de fissures entraînant souvent les pénétrations d'eau ou des agents agressifs surtout la **fissuration précoce** qui présente des ouvertures importantes et qui n'a rien à voir avec la fissuration fonctionnelle du béton armé. Les **fissures précoces** sont *préjudiciables à la durabilité* des ouvrages en béton. Les causes de ces fissures sont liées aux variations dimensionnelles du béton. Ces fissures n'apparaissent que sous certaines conditions particulières de fabrication ou de mise en œuvre.

Les principales causes de la fissuration précoce sont:

- *Le tassement qui accompagne le ressuage*
- *Le retrait plastique*
- *Le retrait thermique après prise*
- *Le retrait d'auto-dessiccation*

❑ Parmi les différents types de fissures, on distingue principalement trois catégories

- **Le faïençage:** c'est un réseau caractéristique de microfissures se présente sous forme d'un dessin géométrique à mailles irrégulières, qui peut dépasser 100 mm, affecte principalement la couche superficielle du béton (les dalles ou les murs).
- **Les microfissures,** ce sont des fissures très fines dont la largeur est inférieure à 0,2 mm.
- **Les fissures,** ce sont des ouvertures linéaires au tracé plus ou moins régulier dont la largeur est d'au moins 0,2 mm.

III.3/Causes probables de fissuration dans les bâtiments

Plusieurs phénomènes et défauts sont en cause dans les bâtiments, on trouve :

- *Le type de sol et la conception des fondations*
- *L'écoulement d'eau (canalisation, fuites, pompage....)*

III.3.1/Quel est le risque du mouvement du sol ?

A- Les mouvements courants des fondations

Les maisons individuelles sont habituellement fondées superficiellement par des semelles en béton armé. En présence d'un sol déformable, ces fondations peuvent subir des mouvements susceptibles d'engendrer des dommages importants. A titre d'exemple, un tassement différentiel de 1 cm, entre deux points d'appui distants de 5 m, suffit à provoquer la fissuration.

Les tassements différentiels entraînent principalement des dommages structurels : fissures de cisaillement en diagonale ou fissures de traction horizontales et verticales sur les murs extérieurs. Aussi ils entraînent des fissurations dans les dalles et des ruptures des canalisations.

❖ Trois conditions doivent être réunies pour déclencher la fissuration :

- 1) Un sol compressible sous le niveau d'assise des fondations ;
- 2) Des charges irrégulièrement réparties aux fondations. Ce déséquilibre des efforts sur le sol provoque un tassement différentiel ;
- 3) La fragilité de la superstructure. Les déformations différentielles du sol vont engendrer des efforts de traction et de cisaillement dans la superstructure. Les points faibles et notamment les joints de maçonnerie seront les 1er à ne pas résister à ces contraintes.

❖ Les autres causes de fissuration peuvent être :

- 1) l'implantation du bâtiment sur un sol hétérogène,
- 2) Présence de l'eau dans le terrain ;
- 3) l'implantation de la maison directement sur la terre végétale de surface ou à une si faible profondeur que le sol n'est pas à l'abri du gel ;
- 4) la présence juxtaposée de deux remblais d'âge différent sous les fondations un ancien, peu compressible, et un récent, mal compacté lors des travaux ;
- 5) Lorsque deux bâtiments sont construits à des époques différentes ;
- 6) la création ultérieure d'une plate-forme contre une façade du pavillon. Elle crée une surcharge parasite excessive au droit de la semelle de ce mur.

B- Les mouvements exceptionnels en sols sensibles

Les argiles dites « gonflantes » sont dangereuses pour les fondations : tassements en période de sécheresse, soulèvements quand l'eau revient.

Cette alternance de tassements et de soulèvements provoque des dégâts dans les murs.

Dans les cas graves, les fissures peuvent atteindre une largeur d'ouverture de l'ordre de 30 à 40 mm. : On parle alors de fractures ou lézardes.

Ces mouvements du sol ne sont pas uniformes sous les bâtiments. Des efforts différentiels importants apparaissent donc entre le centre du pavillon et sa périphérie, d'où l'apparition de fissures ou de lézardes.

❑ **Remarque :** *La nature même des argiles concernées peut donner naissance, lors d'une période ultérieure très pluvieuses, à un phénomène opposé de gonflement qui tend à refermer les fissures.*

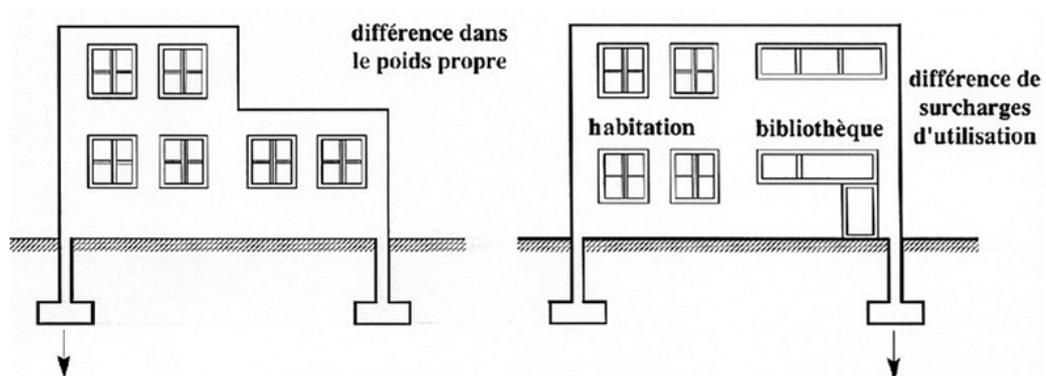
C- Le tassement de dallage

De nombreux terrains ne sont pas aptes à recevoir une dalle sur terre-plein. Ceci vise notamment :

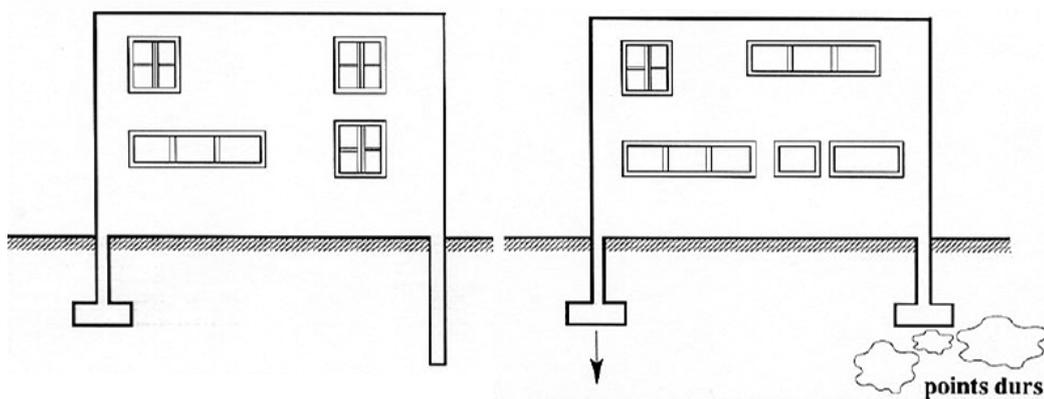
- Les sols meubles incluant des rognons rocheux aptes à constituer des points durs ;
- Les sols de natures différentes pouvant entraîner des tassements différentiels de la forme ;
- Les sols constitués de remblais non contrôlés.

❑ **Exemples de tassement différentiel des bâtiments qui peut engendrés des fissures**

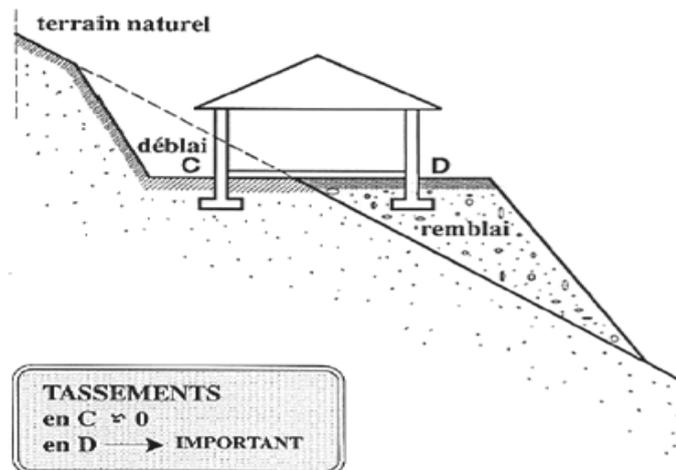
1/ Inégalité des charges supportées par les fondations



2/ Fondations différentes ou hétérogénéité de sol



3/ Déblais réutilisés en remblais



On peut distinguer des cas simples de fissures:

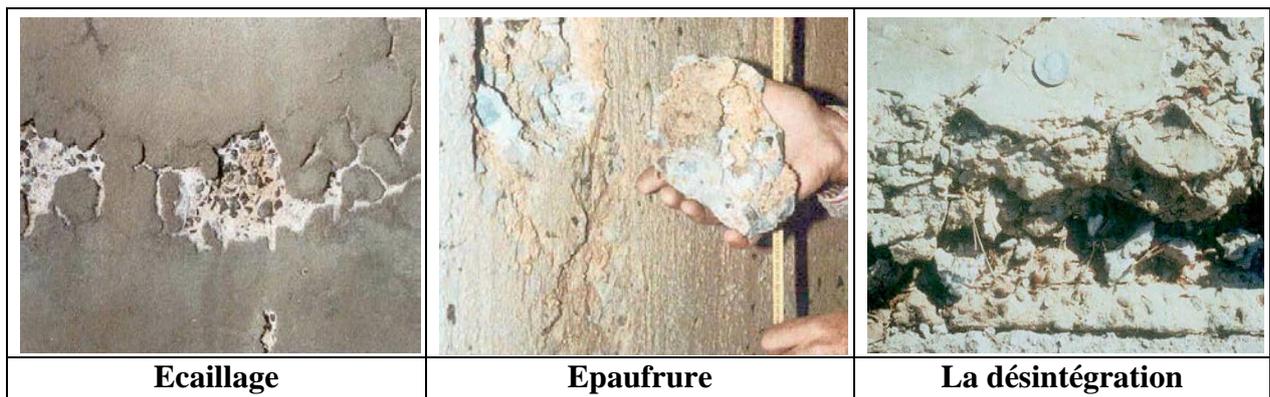
- Des fissures transversales dues à des contraintes de traction
- Des fissures longitudinales (parallèles de l'effort exercé) sont dues à des contraintes de compression;
- Des fissures inclinées (45°) aux niveaux des appuis dues un effort de cisaillement;
- Des fissures de dalles dues à un tassement de sols;
- Des fissures de cloisons dues à une flèche exagérée d'une poutre porteuse sous dimensionnée;

- Des fissures au droit ou à l'extrémité de dalles de plancher chauffant ou de dalles de terrasses insuffisamment protégées thermiquement.
- Des fissures au niveau des joints de la maçonnerie dues au retrait du mortier

III.4 Autres manifestation de dégradations

- **L'écaillage:** Décollement de la couche de mortier laissant les granulats à nu et pouvant se poursuivre par un délitage de la surface sous forme d'écaille, alors c'est un effet superficiel
- **Les épaufrures:** C'est des fragments de béton détachés de la masse de l'ouvrages
- **La désintégration:** désorganisation de la peau du béton pouvant se poursuivre par une destruction avancée du béton d'un élément de l'ouvrage, et parfois assimilable à un pourrissement du matériau

L'existence d'épaufrures ou de désintégration localisée du béton entraîne une redistribution de contraintes vers les parties saines de la structure.



L'humidité, lorsqu'elle se forme sur la cloison intérieure d'une maison ou d'un appartement, peut revêtir diverses formes : taches d'humidité, champignon, moisissures, salpêtre, décollement des revêtements muraux.

- **Le Salpêtre :** est un dépôt constitué de sels minéraux. On le trouve en efflorescence sur les murs anciens et humides. Les efflorescences sont dues à la cristallisation de sels suite à l'évaporation de l'eau qui les contient, lors d'une période de séchage consécutive à une période d'humidification.



L'humidité peut se former sur tous les éléments constitutifs d'un ouvrage, allant du sol au plafond, comme par exemple une cloison intérieure, ce qui représente le danger pour le bâtiment, ainsi que pour la santé des habitants.

Les causes d'humidité sont :

- **Une mauvaise ventilation** : l'humidité ne s'évacue pas correctement entraînant entre autres de la condensation, des moisissures, etc.
- **Les infiltrations d'eau** : l'eau s'introduit par une fissure dans le mur ou par pression hydrostatique dans les fondations.
- **Les remontées capillaires** : l'eau contenue dans le sol remonte à travers les capillarités du mur.
- **Les causes accidentelles**, comme :
 - un dégât des eaux du à un problème de canalisations.
 - une inondation liée à une cause naturelle.

CHAPITRE II : Origines et causes de dégradation du béton

Avant de commencer par cité les origines de dégradation du béton on doit définir la dégradation,

C'est quoi la dégradation du béton ?

La dégradation du béton est sa perte de performance elle se manifeste par détérioration, déformation ou changement de ces propriétés. La fissure constitue le signe d'une première manifestation apparente de dégradation possible, comme elle peut prendre l'aspect des éclats ou couleurs de rouille.

II.1/ Dégradation d'origine physique :

II.1.1/ le retrait

Le retrait est en effet un phénomène physico- chimique qui existe de façon systématique au sein d'un béton et qui se développe sous diverses formes depuis la prise du béton jusqu'à son vieillissement.

- ❖ **Retrait plastique** : Causé par un manque d'humidité durant le mûrissement du béton.
- ❖ **Retrait du séchage** : La plus importante cause de fissuration du béton est le retrait au séchage sous contrainte. La perte humidité par la perte d'eau durant Le mûrissement cause le retrait de celui-ci de près de 1% par unité de longueur et, par conséquent, création de contraintes de traction.

II.1.2/ Tassement

On trouve aussi le tassement localisé des surfaces de coulage causé par la présence d'armature dans le béton engendrant ainsi des vides ou des fissures au voisinage de ces armatures. Une augmentation du diamètre ou un mauvais compactage favorisera l'apparition des fissures.

II.1.3/ Contraintes thermiques

Les variations de température à l'intérieur du béton durci entraînent des changements de forme et de volume. Ce changement de température est causé par:

- *la chaleur d'hydratation du ciment*
- *La variation de la température atmosphérique*

II.2/ Dégradation d'origine mécanique :

II.2.1/ Chocs

Les désordres de ce genre concernant beaucoup plus les ponts. Les chocs les plus fréquents sont ceux du poids lourds hors gabarit contre l'intrados des ponts; les chocs des bateaux ou d'objets flottants contre les piles en rivière, ainsi que les chocs de véhicules contre les barrières de retenue, ils peuvent créer des épaufrures, des éclats importants de béton.

II.2.2/ Abrasion, Erosion

Les phénomènes d'abrasion et d'érosion se rencontrent essentiellement dans des structures de génie civil en contact avec des circulations intenses d'eau comme les barrages (érosion des évacuateurs de crue) ou les galeries d'amenée d'eau, et dans les structures soumises à des charges mécaniques répétées comme les chaussées en béton.

II.2.3/ Délamination

L'action conjuguée des sollicitations climatiques, des sels anti-verglas et du trafic circulant directement sur le béton constitutif des hourdis de ponts provoque des délaminations du béton dans sur un nombre considérable d'ouvrage d'art.

II.3/ Dégradation d'origine chimique :

II.3.1/ L'écoulement des fluides dans le béton

La cause principale de toutes les dégradations d'origine chimique est la possibilité de pénétration ou d'écoulement des fluides dans le béton, qui dépend de la perméabilité et par suite de la porosité du béton. La porosité interne du béton et de la pâte du ciment hydraté gouverne la durabilité des ouvrages en béton car, plus la porosité diminue, plus la perméabilité diminue, cette faible perméabilité retarde la pénétration des fluides agressifs. Parmi les dégradations de béton d'origine chimique, on distingue :

La carbonatation ; L'attaque des chlorures ; Réaction d'alcalis-granulats ; La corrosion des armatures ; L'attaque des sulfates ; L'attaque des acides ; Les eaux pures et le gel dégel

II.4/ Facteurs d'influences sur la dégradation des ouvrages

Avant de procéder à toute réparation de béton dégradé, il est indispensable de procéder à un diagnostic et de rechercher les causes et les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages. Malheureusement on trouve trop de réparation qui échouent, parce que l'étape de diagnostic a été escamotée..... Les principaux facteurs d'influence sur la dégradation des infrastructures en béton peuvent être regroupés en quatre familles.

II.4.1/ Facteurs liées à la conception de la structure

Une structure mal conçue peut avoir une durabilité déficiente malgré l'utilisation d'un béton de bonne qualité. Les dégradations dues à une mauvaise conception (calcul et analyse) ou une

mauvaise supposition (disposition constructive), c- a- d des éléments mal conçus qui, tout en respectant les exigences du cahier de charges, ne donne pas satisfaction en cours d'application.

Parmi les principaux critères de conception qui contrôlent la durabilité d'une structure sont :

- Les aspects liés au système de drainage et d'évacuation des eaux ;
- Le calcul des aciers d'armatures et le choix de l'épaisseur de recouvrement des armatures;
- Les choix des enduits protecteurs ou des imperméabilisants ;
- Le choix d'une géométrie particulière de la structure qui permette de diminuer le stress environnemental.

II.4.2/ Facteurs liées à la construction de la structure

Un certain nombre de dégradations du béton sont provoquées par une mauvaise exécution qui peut commencer dès la fabrication du béton et se poursuivre jusqu'à la mise en place de l'étanchéité. Les principaux défauts d'exécution rencontrés sont :

- **Mauvaise formulation du béton** : qui engendre une porosité trop élevée (surdosage en eau ou d'un sous dosage en ciment).
- **Mauvaise exécution du coffrage** : l'absence d'écarteur de coffrage peut entraîner des nids de cailloux ou des défauts de bétonnage.
- **Mauvaise disposition des armatures** : le manque de recouvrement des armatures mène vers la corrosion qui crée des fissures parallèles aux armatures, des épaufrures et de éclats.

II.4.3/ Facteurs liées à la nature des matériaux

La composition d'un béton peut être l'origine de dégradation d'un ouvrage. Il faut que les matériaux employés doivent répondre à trois objectifs : ils doivent pouvoir être mis en œuvre, présentés une fois en place, les propriétés mécaniques que l'on attend d'eux, résister dans toute la mesure du possible, aux agressions du milieu environnant.

Dans le choix des matériaux (ciment, granulats, ajout minéraux....etc.), il faut penser à la stabilité chimique interne de la pâte de ciment hydraté. En effet la pâte de ciment hydraté peut se dégrader dans sa masse par suite de certaines incompatibilités telles que la présence de sulfate, l'utilisation des granulats réactifs (réaction alcalis granulats).

II. 4.4/ Facteurs liées aux conditions climatiques et environnementaux

Les différents mécanismes à la source des dégradations sont très souvent en fonction des conditions climatiques et du type d'exposition du béton. l'ouvrage va subir au cours de sa vie l'action du milieu extérieur : cycle d'humidification et de séchage – cycle de chaud et de froid,

ou ses variations thermiques trop importantes font fissurer le béton si des dispositifs n'ont pas été prévus pour éviter les contraintes qui en résultent.

❖ *On peut citer d'autres facteurs secondaires comme*

- **Les facteurs liés aux méthodes d'entretien** : des programmes d'entretien ou de protection sont nécessaires afin de reconstituer, améliorer ou maintenir la sécurité structurale pour éviter ou retarder certains types de dégradations des structures. (exemples : étanchéité, revêtement, nettoyage des joints dilatation....etc)
- **Les facteurs liés aux conditions d'exploitation** : On a des effets multiples d'exploitation des ouvrages telles que les routes les ponts ...etc, d'où des effets pondéraux, des effets dynamiques ou abrasifs résultants de la circulation des engins lourds et par les efforts de freinage, et les effets de répétition entraînant la fatigue.

5/ Les symptômes et manifestation de dégradations

La pathologie des ouvrages en béton nous enseigne qu'il existe une multitude de symptômes de dégradations.

Chapitre I : Durabilité du béton

I.1 Notions de durabilité des bétons

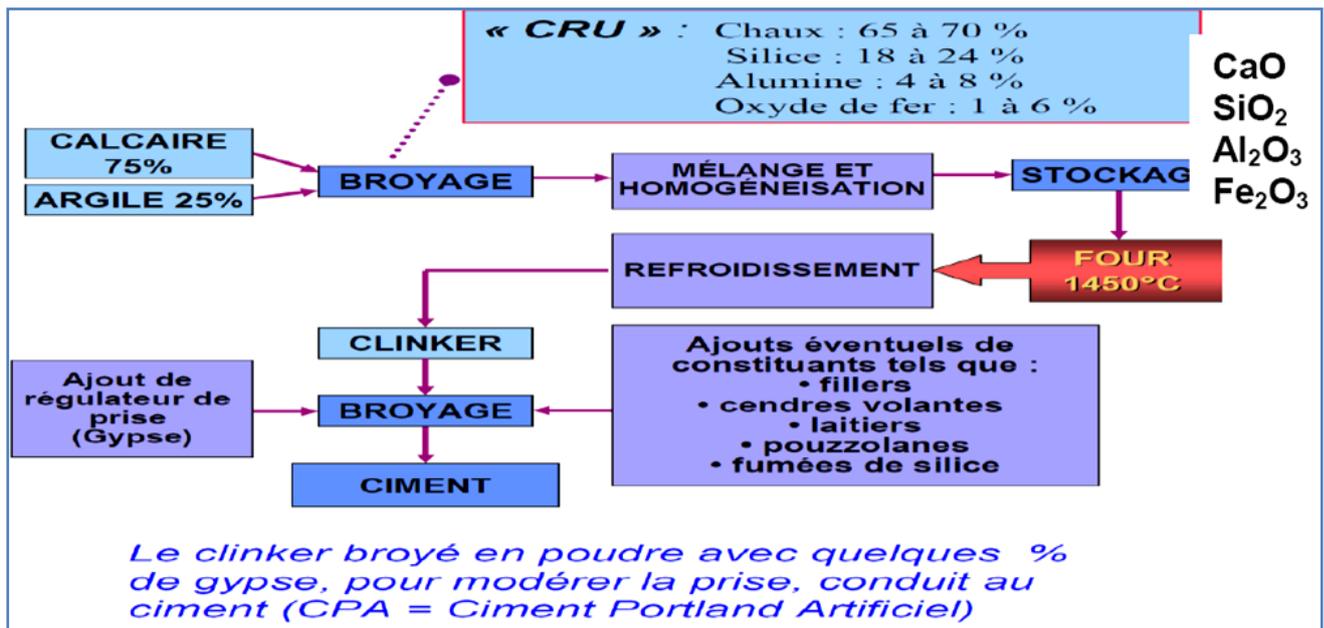
Un ouvrage **doit résister** au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques...) c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant... tout en conservant son esthétisme. Il doit satisfaire, avec un niveau constant, les besoins des utilisateurs au cours de sa durée de service.

La durabilité de l'ouvrage caractérise **sa capacité à conserver les fonctions d'usage**, pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers), et **à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans son environnement**, avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible.

La seule durabilité intrinsèque du béton ne suffit plus à garantir la durée de service de l'ouvrage. Prescrire un béton durable nécessite donc d'apprécier, dès sa conception, l'ensemble des contraintes environnementales, des agressions et des attaques potentielles, qu'il aura à subir pendant toute sa durée de service, et de respecter et mettre en œuvre les recommandations en vigueur. Il convient de ne pas assimiler la durabilité d'un produit de construction à celle de l'ouvrage. En effet, il est inutile de formuler un béton intrinsèquement durable, si sa mise en œuvre au sein de la structure n'est pas conforme aux règles de l'art et si les diverses sollicitations auxquelles il est soumis n'ont pas été correctement appréciées, ce qui conduirait à ce que l'ouvrage ne remplisse pas durablement sa fonction pendant sa durée de service requise.

La durabilité d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres dont la qualité de sa conception, la qualité des matériaux et des produits utilisés, la qualité des dispositions constructives, de la réalisation de l'ouvrage et de la mise en œuvre des produits ainsi que des diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance.

Pour s'assurer de cette durabilité, pendant longtemps, les bétons ont été spécifiés en considérant les performances mécaniques requises à 28 jours associées éventuellement à un dosage minimum en ciment. Pour la construction d'une structure, seules les exigences de résistance et de comportement en service étaient prises en compte. Un béton performant ayant en principe un dosage correct en ciment et une bonne compacité, ces deux prescriptions pouvaient effectivement garantir une certaine durabilité du matériau béton.



I.3.1 Constituants du clinker

Les principaux composants anhydres obtenus lors du refroidissement rapide du clinker sont:

- Le silicate tricalcique $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_3S) .
- Le silicate bicalcique $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_2S)
- L'aluminate tricalcique $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A)
- L'alumino-ferrite tétracalcique (Ferro-aluminate tétracalcique) $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF)
-

I.3.2 L'hydratation du ciment

L'hydratation du ciment est la réaction chimique entre l'eau et le ciment qui donne comme résultat la pâte de ciment hydratée. Il s'agit des séquences réactionnelles des principaux composés du ciment avec une dominance pour le C_3S et le C_3A à court terme.

Le C_3S est la phase la plus importante du ciment. La chaleur dégagée par cette phase est l'une des plus élevée. La majeure partie de son hydratation se passe dans les 28 premiers jours. La réaction complète peut prendre jusqu'à une (1) année.

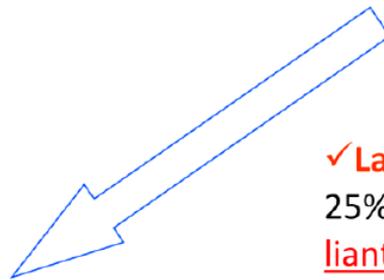
La vitesse d'hydratation de C_2S est beaucoup plus faible que celle du C_3S . Le C_2S va surtout participer au développement des résistances après 28 jours et dégage une très faible chaleur.

Les produits d'hydratation sont le silicate de calcium hydraté (C-S-H) et l'hydroxyde de calcium ou portlandite.

❖ Hydratation des silicates C₂S et C₃S

Les deux silicates s'hydratent immédiatement en présence de l'eau

L'hydratation des silicates conduit à 2 types d'hydrates :

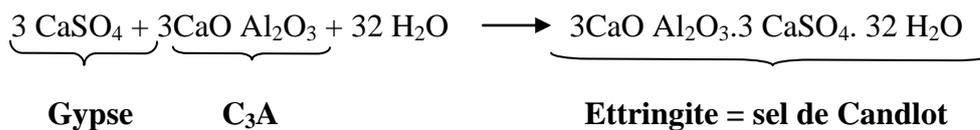


✓ La portlandite occupe de 20 à 25%. Structure cristallisée. (non-liant)

✓ Les C-S-H : peu cristallisés ("gel") et liants, ce sont les hydrates les plus importants. (50% à 60% du volume de pâte de ciment hydratée)

❖ Hydratation des Aluminates C₃A et C₄AF

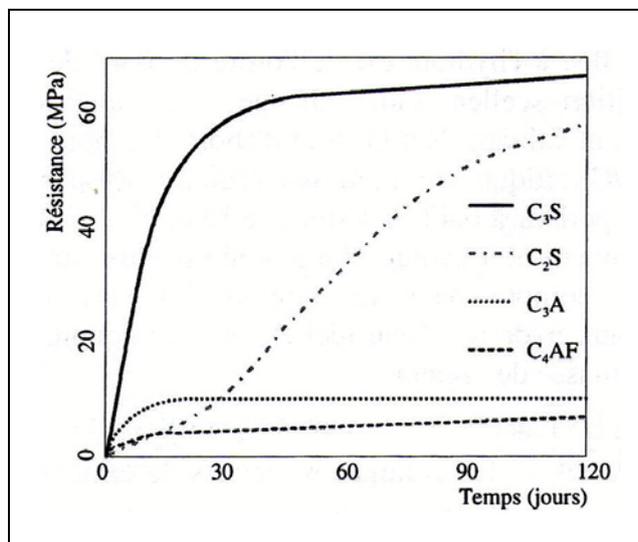
- L'hydratation de l'aluminate tricalcique C₃A est très rapide et violente surtout en absence des sulfates et donne des aluminates hydratés qui bloquent l'hydratation des autres composants et résultent un mauvais béton, ce qui mène à utiliser le gypse comme régulateur de prise.



- L'alumino ferrite tétracalcique (C₄AF): Il possède une séquence réactionnelle proche de celle de C₃A avec une vitesse plus faible et il dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance.

• Les mécanismes d'hydratation du ciment transforment un milieu fluide en un corps solide, par développement de la microstructure car la porosité de pâte diminue au fur et à mesure de l'avancement des réactions d'hydratation, ce qui développe les performances mécaniques, en particulier la résistance en compression.

- le C_3A est un indésirable dans le ciment, car si la pâte durcie est attaquée par des eaux sulfateuses, il peut y avoir formation de sulfoaluminates et la pâte risque d'éclater. Mais d'autre part, l'alumine est nécessaire dans le ciment car elle facilite les réactions dans le four rotatif.
- Une pâte de ciment hydratée contient: 50 à 70% de **C-S-H** et 25 à 27% de **Ca (OH)₂**.
- Le **Ca (OH)₂** est l'hydrate qui joue le rôle principal sur la durabilité car la chaux passive les armatures du béton armé, et elle permet de mobiliser une réaction pouzzolanique avec certains fines réactives, en formant des **C-S-H** secondaires
- La portlandite et les C-S-H remplissent peu à peu les pores, et le matériau devient dense et solide
- L'élément chimique le plus important pour le développement de la résistance mécanique du ciment est le C3S



Evolution de la résistance en compression des composants du ciment

I.4 L'eau de gâchage :

Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher du béton, car parfois elles contiennent un excès d'impuretés qui dégrade les propriétés physiques et mécaniques du béton et menacer sa durabilité.

L'eau est nécessaire pour l'hydratation du ciment. Il Donne au béton une *consistance suffisamment fluide* pour qu'il puisse être utilisé.

- Départ de l'eau en excès \Rightarrow présence de vides dans le béton durci (porosité) \Rightarrow deux conséquences majeures:

1/diminution des résistances mécaniques des bétons

2/ détérioration de leur durabilité car les bétons, plus poreux (donc plus perméables), sont plus accessibles aux agents extérieurs agressifs.

Selon la norme européenne **EN 1008**, évaluation de l'aptitude d'une eau à être employée, différents critères sont à satisfaire:

a) *Critères sensoriels*: (voir le tableau 1)

- Odeur: une eau malodorante doit être suspectée de contenir des matières organiques en décomposition.
- La vue: après la décantation, si l'eau garde une couleur foncée, doit être considérée comme douteuse

Tableau 1: Conditions pour qu'une eau soit utilisable (critères sensoriels)

| Type d'essai | Méthode d'essai | Utilisable si | Renvoi aux conditions du tableau 3 |
|----------------------------------|---|--|---|
| Couleur | Inspection visuelle dans un cylindre de mesure placée devant un arrière-plan blanc (laisser se décanter les matières en suspension) | Incolore, voire légèrement jaunâtre | Foncé ou coloré (rouge, vert, bleu) |
| Huile ou matières grasses | Inspection visuelle | Trace uniquement Emulsion d'huile | Pellicules d'huile |
| Détergents | Agiter vigoureusement l'échantillon d'eau dans un cylindre | Légère formation de mousse, stabilité de la mousse < 2 min | Formation importante de mousse, stabilité de la mousse > 2 min. |
| Matières en suspension | Cylindre de mesure de 80 cm ³ | ≤ 4 cm ³ | > 4cm ³ |
| Odeur | Ajouter HCl | Aucune odeur, voire pas plus d'une légère odeur | Forte odeur (par exemple, sulfure d'hydrogène) |
| Valeur de pH | Papier indicateur / indicateur liquide | ≥ 4 | < 4 |
| Substances humiques | Dans une éprouvette verser 5 cm ³ de soude caustique à 3 ou 4 %. Agiter. Procéder à l'inspection visuelle au bout de 3 min | Plus pâle que brun jaunâtre | Plus foncé que brun jaunâtre |

b) **Critères chimiques:** il s'agit du dosage de l'eau en chlorures, sulfates, phosphates, nitrates,...etc (Tableau 2).

Tableau 2: Conditions pour qu'une eau soit utilisable (critères chimiques)

| Ions à considérer | Utilisable si | Renvoi aux conditions du tableau 3 | Impropre à l'utilisation si |
|---|--|------------------------------------|--------------------------------|
| Chlorures (Cl ⁻) : - Béton précontraint/coulis - Béton armé - Béton non armé | ≤ 600 mg/l ≤ 2 000 mg/l ≤ 4 500 mg/l | > 4 500 mg/l | > 600 mg/l * > 2 000 mg/l * |
| Sulfates (SO ₄ ²⁻) | ≤ 2 000 mg/l | > 2 000 mg/l | |
| Sucre: - Glucose - Saccharose | ≤ 100 mg/l ≤ 100 mg/l | > 100 mg/l > 100 mg/l | |
| Phosphates (P ₂ O ₅) | ≤ 100 mg/l | > 100 mg/l | |
| Nitrates (NO ₃ ⁻) | ≤ 500 mg/l | > 500 mg/l | |
| Zinc (Zn ²⁺) | ≤ 100 mg/l | > 100 mg/l | |
| Sulfures (S ²⁻) ** | ≤ 100 mg/l | > 100 mg/l | |
| Sodium (Na ⁺) *** Potassium (K ⁺) | Au total ≤ 1 000 mg/l | | > 1 000 mg/l |

* L'eau peut néanmoins être acceptée si la teneur maximale en chlore (Cl⁻ du béton est inférieure à 0,2 % par kg de ciment pour le béton précontraint, 0,4 % par kg de ciment pour le béton armé, 1 % par kg de ciment pour le béton non armé).
** N'est exigé que pour les bétons et les coulis en contact direct avec les aciers précontraints.
*** N'est exigé qu'en cas de risque de réaction des granulats avec les alcalins (granulats potentiellement réactifs).

c) **Critères mécaniques (Tableau 3):** L'aptitude d'une eau considérée comme douteuse se vérifie sur deux types d'essai :

- Un essai de prise sur mortier,
- Un essai de résistance mécanique à 7 jours sur mortier ou béton.

Une eau douteuse peut être utilisée comme eau de gâchage si elle n'altère pas la prise et la résistance au-delà de certaines valeurs limites précisées dans la norme (Tableau 4)

Tableau 3: Conditions pour qu'une eau soit utilisable (critères mécaniques)

| Type d'essai | | Sur le résultat | Par rapport au témoin* |
|---------------------------------------|-------|-----------------|------------------------|
| Temps de prise | Début | ≥ 1h ** | ± 25 % ** |
| | Fin | ≤ 12 h | ± 25 % |
| Résistance à la compression à 7 jours | | | ≥ 90 % |

* Le mortier témoin est gâché avec de l'eau potable.
** Supposons que le mortier témoin ait un temps de début de prise de 100 min. L'eau pourra être utilisée si le temps de début de prise reste compris entre 75 et 125 min (condition par rapport au témoin). En aucun cas il ne peut être inférieur à une heure (condition sur le résultat).

I.5 Les granulats : 70% du volume du béton

I.5.1 Critères de qualité pour les granulats à béton (NF EN 12620)

Sensibilité au gel : Le critère de non-géivité des granulats dépend principalement:

- du coefficient d'absorption d'eau des granulats ainsi que de leur résistance mécanique LA.
- géivité des granulats :

-peu d'influence sur la stabilité au gel des bétons, par contre, influence importante sur la résistance à l'écaillage des bétons soumis au gel en présence des sels fondants.

Éléments chimiques nocifs : limites sur la teneur de certains éléments. Les principaux : chlorures et sulfates (et sulfures).

- sulfates : risque de gonflement (ettringite secondaire),
- chlorures : corrosion du béton armé,
- silice réactive : risque de gonflement (alcali-réaction).