

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Med Boudiaf  
(USTO MB)

Faculté d'Architecture et de Génie Civil  
Département de Génie Civil



**POLYCOPIE DE COURS**

The background of the title section is a close-up photograph of cracked concrete. The cracks are irregular and run across the surface. Overlaid on this background are several horizontal decorative lines. There are two sets of lines, one above and one below the main title. Each set consists of three parallel lines: a top blue line, a middle yellow line, and a bottom blue line.

# **PATHOLOGIES DES BETONS**

PREPARE PAR : DR SOUMIA KHEIRA SEBSADJI  
MAITRE DE CONFERENCES  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

DESTINE AUX ETUDIANTS EN LICENCE ET MASTER FILIERE GENIE CIVIL



# AVANT-PROPOS

Le présent document, photocopie de cours intitulé **PATHOLOGIES DES BETONS** est un support de cours destiné essentiellement aux étudiants filière Génie Civil, en Licence (3<sup>ème</sup> année) et Master (1<sup>ère</sup> année spécialité Structures, 2<sup>ème</sup> année spécialité Voies et Ouvrages d'Art). Il leur permettra de mieux assimiler et d'approfondir leurs connaissances de base sur le matériau béton et celles concernant la durabilité des ouvrages en béton armé, qui dépend de nombreux paramètres dont la durabilité du matériau béton armé utilisé. Dans ce photocopie on va passer en revue les pathologies qui peuvent affecter ce matériau, leurs causes, leurs conséquences sur la durabilité et la qualité de service des ouvrages en béton armé et les précautions recommandées contre ces pathologies.

Ce photocopie est structuré en 4 Chapitres :

Le premier chapitre intitulé les **Désordres dans les ouvrages en béton armé**, donne un aperçu sur les causes des dégradations dans les ouvrages en béton armé, qu'elles soient structurelles, en rapport avec le matériau béton (composition et mise en œuvre), l'environnement particulièrement agressif du béton mis en place, avec le sol d'assise de l'ouvrage, défauts d'entretien et de maintenance (surtout pour les ouvrages d'art), causes accidentelles....

Le deuxième chapitre intitulé **Durabilité du béton : Notions importantes**, présente les notions clés et quelques rappels utiles sur les propriétés physico-chimiques du matériau béton, notions nécessaires pour la compréhension du mécanisme de dégradation de chaque pathologie et le moyen de prévention adapté lors de la composition du béton.

Le troisième chapitre intitulé **Pathologies du béton armé**, présente les importantes pathologies du béton armé au sens des normes NF P 18-011 (ancienne) et NF EN 206-1 (nouvelle) qui définissent les classes d'exposition du béton armé. Ces normes sont complétées par des fascicules de recommandations. Les principales pathologies du béton armé présentées dans ce chapitre sont :

- Réactions pathologiques ciment-granulats : l'alcali-réaction
- Attaques par les sulfates (externes et internes)
- Attaques par l'eau de mer
- Attaques chimiques par les eaux et acides.
- La corrosion des aciers d'armatures résultant de l'exposition du matériau au dioxyde de carbone (carbonatation) ou aux chlorures présents dans l'environnement.
- Action des cycles du gel/dégel sur le béton armé.

Enfin, la réparation durable d'un ouvrage est un sujet vaste, de par sa complexité : spécificité de l'ouvrage ou son importance, le coût de la réparation, procédés et matériaux de réparation... Pour cette raison, le dernier chapitre intitulé **Réparations des ouvrages en béton**, présente un aperçu général sur les formes des dégradations des structures en béton armé et la méthodologie d'une réparation durable de ces structures.

# SOMMAIRE

<b>AVANT-PROPOS .....</b>	<b>3</b>
<b>SOMMAIRE .....</b>	<b>4</b>
<b>ABREVIATIONS ET NOTATIONS .....</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>6</b>
<b>CHAPITRE I : LES DESORDRES DANS LES OUVRAGES EN BETON ARME .....</b>	<b>7</b>
1. INTRODUCTION.....	8
2. FACTEURS IMPORTANTS AFFECTANT LA DURABILITE DES OUVRAGES EN BETON.....	8
3. MOYENS DE PREVENTION.....	12
4. CONCLUSION.....	14
<b>CHAPITRE II : DURABILITE DU BETON – NOTIONS IMPORTANTES .....</b>	<b>15</b>
1. INTRODUCTION.....	16
2. NOTIONS DE DURABILITE.....	16
3. CONCLUSION.....	26
<b>CHAPITRE III : PATHOLOGIES DU BETON ARME .....</b>	<b>27</b>
1. CONTEXTE NORMATIF.....	28
2. REACTION ALCALIS-GRANULATS.....	29
3. ATTAQUE SULFATIQUE DU BETON.....	41
4. ATTAQUE PAR L’EAU DE MER.....	49
5. ATTAQUES CHIMIQUES PAR LES EAUX ET ACIDES.....	57
6. CORROSION DES ARMATURES.....	61
7. ACTION DU GEL/DEGEL SUR LE BETON.....	71
<b>CHAPITRE IV : REPARATIONS DES OUVRAGES EN BETON.....</b>	<b>77</b>
1. FORMES DES DEGRADATIONS DES STRUCTURES EN BETON.....	78
2. METHODOLOGIE ET PROBLEMATIQUE D’UNE REPARATION DURABLE.....	79
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>83</b>
<b>ANNEXE 1 : NORME NF P18-011 .....</b>	<b>84</b>
<b>ANNEXE 2 : NORME NF EN 206-1 : Valeurs limites .....</b>	<b>88</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>89</b>

# ABREVIATIONS ET NOTATIONS

## NOTATION

BA	— Béton armé
BP	— Béton précontraint
C	— Dosage en ciment (kg/1 m <sup>3</sup> de béton)
D, d	— Dimension maximale, minimale des granulats respectivement
D/d	— Mélange granulaire de dimensions de grains allant de D à d
E/C	— Rapport massique Eau sur Ciment
RAG	— Réactions alcali-granat ou alcali-réaction
R <sub>c</sub>	— Résistance mécanique en compression
R <sub>t</sub>	— Résistance mécanique à la traction
R( $\phi$ )	— Refus cumulé au tamis d'ouverture $\phi$
T( $\phi$ )	— Tamisat cumulé au tamis d'ouverture $\phi$
$\phi$	— Dimension des granulats
$\rho$	— Masse spécifique (en général)
$\rho_F, \rho_G, \rho_C$	— Masse spécifique des fines, granulats et ciment respectivement

## NOTATION CONVENTIONNELLE DE LA CHIMIE DES CIMENTS

### Oxydes

C	— CaO (chaux)
S	— SiO <sub>2</sub> (silicium)
A	— Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (alumine)
M	— MgO (oxyde de magnésium)
F	— Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (hématite)

### Principaux constituants du clinker

C <sub>3</sub> S	— Alite
C <sub>2</sub> S	— Belite
C <sub>3</sub> A	— Aluminate
C <sub>4</sub> AF	— Ferrite

## ABREVIATIONS DANS LE TEXTE

Min, Max	— Minimum, maximum
$\propto$	— Proportionnel à
$\nearrow$	— Haut, fort, élevé
$\searrow$	— Bas, faible, réduit

# INTRODUCTION GENERALE

Le béton armé est le matériau de construction le plus utilisé car il présente de nombreuses qualités, économiques et mécaniques. Si le béton est correctement formulé et mis en œuvre, c'est un matériau durable. Mais le béton est susceptible de se dégrader sous l'influence de nombreux facteurs, qu'ils soient propres au matériau : compacité, dosage en ciment..., ou à son environnement : actions climatiques, environnement agressif, chocs...

Formuler un béton durable consiste à choisir les qualité et quantités de ses constituants en fonction de l'agressivité de l'environnement de l'ouvrage. Par conséquent, un béton mécaniquement résistant n'est pas nécessairement durable. De ce fait, en plus de la consistance et des résistances mécaniques, l'adaptation du béton à son environnement contribue fortement à déterminer sa composition. La durabilité d'un béton, caractéristique non mesurable, peut être définie comme étant le maintien de la qualité de l'ouvrage durant toute sa sur sa durée d'utilisation prévue.

Les problèmes liés à la durabilité du béton touchent diverses structures. La durabilité du béton est une caractéristique importante, surtout pour les ouvrages importants de génie civil tels que les ouvrages d'art. Ces ouvrages sont onéreux, qui nécessitent un entretien et une maintenance réguliers, car en cas de dégradations, les coûts de réparations (en plus d'autres conséquences) seront très élevés, et dans la majorité des cas, ces coûts viennent rapidement dépasser les coûts initiaux de construction, si le béton n'est pas initialement durable. A titre d'exemple, aux USA le coût de réparation des structures en béton suite à des dégradations dues au gel/dégel et à la corrosion des aciers sont de l'ordre de 16 à 24 milliards de dollars, auquel s'ajoutent chaque année 400 millions [1]. Au Canada, le coût annuel de réparation des stationnements multi étages urbains, affectés par les problèmes de corrosion est à peu près de 5 milliards de dollars [1].

Donc la conception d'un béton durable, peut contribuer fortement à augmenter la sécurité et la durée de vie des ouvrages, et à réduire considérablement les coûts de réparation induits par les dégradations. L'élaboration d'un tel béton doit passer obligatoirement par la maîtrise et la compréhension des causes et facteurs qui peuvent causer les dégradations et détérioration du matériau et de la structure en béton armé. Cette maîtrise permettra de situer les causes pour proposer des conceptions et des compositions de béton adaptées à chaque ouvrage, des précautions à prendre pour assurer cette durabilité (suivi, maintenance...), et en cas de dégradations, proposer les moyens et les matériaux les plus adaptés pour réparer les dégradations durablement. C'est le but de ce cours.

# **CHAPITRE I : LES DESORDRES DANS LES OUVRAGES EN BETON ARME**

# 1. INTRODUCTION

La durabilité des ouvrages en béton, qui peut être définie comme étant leur capacité d'assurer la tenue en service prévue [2]. C'est une caractéristique très importante, surtout pour les ouvrages importants de génie civil (ponts, silos, réservoirs, barrages...), car en cas de dégradation, les conséquences seront multiples et graves, surcoûts de réparation, limitation de la durée de vie de l'ouvrage, et dans des cas extrêmes la ruine partielle ou totale de l'ouvrage. Donc, la prise en compte préventive des facteurs qui peuvent affecter la durabilité des ouvrages, donc leur économie et leur sécurité, est impérative lors de la conception et de l'élaboration de ces ouvrages.

Ce chapitre est une synthèse, qui passera en revue les origines et les causes des désordres dans les ouvrages en béton jugées les plus importantes, et les niveaux de prévention à considérer lors de la conception et de la mise en œuvre, pour assurer la sécurité et la pérennité de ces ouvrages.

# 2. FACTEURS IMPORTANTS AFFECTANT LA DURABILITE DES OUVRAGES EN BETON

Les causes des dégradations du béton (béton et/ou acier des armatures) et des ouvrages en béton sont très diverses, et peuvent être liées à l'environnement de l'ouvrage, à la qualité des matériaux, aux défauts de conception et de mise en œuvre, aux problèmes de sol.... Ces facteurs et causes vont être détaillés dans ce qui suit (voir Figure 1).



Figure 1 : Origines des désordres et dégradations dans les ouvrages en Béton Armé (BA)



## 2.1. Facteurs liés à l'Environnement du Béton

C'est l'environnement dans lequel va se trouver le béton frais ou le béton durci tout au long de sa durée de vie. La notion d'environnement englobe l'ambiance climatique et atmosphérique, ou le milieu extérieur particulièrement agressif.

### 2.1.1. Actions climatiques

Concerne le béton frais et le béton durci. La durabilité du béton peut être grandement affectée par :

- La température ambiante, les cycles thermiques et l'écart de température ;
- L'hygrométrie ambiante, la vitesse du vent et les cycles humidité/sécheresse ou vent ;
- Les cycles du gel/dégel ;
- Les agents atmosphériques chimiques : CO<sub>2</sub>, eau de pluie, embruns marins ...

Ces données doivent être considérées lors de l'élaboration et de la mise en œuvre du béton, au risque d'avoir des dégradations qui peuvent être préjudiciables surtout si elles se produisent au jeune âge quand le béton n'aurait pas atteint sa maturité. Quelques exemples de ces dégradations :

- Des variations dimensionnelles qui peuvent engendrer une fissuration pénalisante pour la durabilité du béton, causée par les grands écarts de température, par une ambiance sèche ou par le vent, par des cycles de température ou d'humidité relative...
- La fissuration interne du béton durci, causée par le gel sévère, où les dégâts seront accentués avec l'utilisation de sels de déverglaçage (écaillage du béton, corrosion de l'acier des armatures...).
- Dessiccation causant un arrêt d'hydratation du béton frais en surface, couche très importante dans la protection des aciers et du cœur du béton des agressions externes. Cette dessiccation peut être causée par un environnement sec ou par la vitesse du vent, par une température élevée...
- Accélération de certains processus chimiques de dégradation, causée par un taux d'humidité relative élevé et/ou par une élévation de la température [4].
- Érosion et réduction de la compacité du béton dues à l'action physique/chimique de la pluie.
- Corrosion des aciers d'armatures, causée par la carbonatation du béton (action du CO<sub>2</sub> de l'air), par les embruns marins contenant les chlorures, ou indirectement par la réduction de la compacité du béton ou sa microfissuration causées par l'un des facteurs précités [3].

### 2.1.2. Milieu extérieur agressif

Les ouvrages en béton peuvent se trouver dans des milieux, industriels ou naturels, agressifs pour le béton et/ou l'acier des armatures, dont on peut citer les plus courants :

- Environnement marin : l'eau de mer contient des éléments chimiques qui peuvent dégrader le béton et causer la corrosion des aciers par l'action des chlorures surtout. L'eau de mer peut avoir, hormis l'action purement chimique, des actions de dégradation physiques : action des vagues, action des cycles mouillage/séchage, du vent, des corps flottants...
- Milieux sulfatiques : sols et terrains chargés, eau de mer, milieux industriels... Les sulfates ont la possibilité de réagir en présence d'eau, avec les aluminates du béton, pour former de l'ettringite

différée dite secondaire, corps gonflant qui peut causer une expansion dans le béton durci, et qui à son tour peut engendrer des contraintes internes, pouvant causer la fissuration du béton.

- Milieux contenant des chlorures : milieux marins ou industriels, lors de l'utilisation des sels de déverglaçage... Les chlorures ont surtout la particularité de causer la corrosion de l'acier des armatures, en dépassivant leur couche superficielle protectrice, par baisse du pH du béton.
- Milieux acides, eaux pures et douces, ont une action d'érosion et de dissolution des constituants du béton, surtout la portlandite, causant ainsi la réduction de la compacité du béton, la chute de sa résistance mécanique, avec comme conséquence la mise en péril de la santé des armatures.
- Actions biologiques (micro-organismes, algues, bactéries) [4]. Les attaques bactériologiques se produisent par exemple en contact avec certains sols, ou en contact avec les eaux usées dans les ouvrages d'assainissement. Attaque du béton par des agents chimiques et organiques dans des milieux industriels : huiles, graisses, pétrole, solvants, eaux résiduaires, gaz....

## 2.2. Facteurs internes liés aux caractéristiques des matériaux

Ces facteurs concernent le matériau béton, la qualité de ses constituants et leur compatibilité entre eux. La qualité du béton conditionne considérablement la durabilité de l'ouvrage. Les critères importants de cette durabilité sont non seulement leurs résistances mécaniques, mais aussi la capacité à résister à la pénétration des agents agressifs et de l'humidité par deux cheminements :

- Par la porosité interconnectée du béton (perméabilité ou diffusion).
- Par la fissuration du béton, qui est préjudiciable surtout si elle est précoce (au jeune âge).

Pour contrer le premier type de pénétration, il faut fabriquer un béton compact, par un choix correct des matériaux et de la formulation du béton. Pour contrer le deuxième type de pénétration, il faut donner un soin particulier à la mise en œuvre du béton. Donc, les moyens importants pour obtenir un béton durable qui résiste aux agressions du milieu extérieur peuvent se résumer comme suit :

### (A) Le Choix des Matériaux

- Type du ciment : certains types de ciments, offrent de meilleures performances au béton en présence d'agents agressifs. Par exemple, un ciment à faible teneur en  $C_3A$  est indiqué dans un milieu sulfatique ou marin, un ciment ne libérant pas ou peu de portlandite dans un milieu acide, ou un ciment faible en alcalins s'il y a un risque d'alcali-réactions (réactions pathologiques entre des granulats dits réactifs et les alcalins du béton).
- Quantité du ciment : doit être suffisante pour intensifier le durcissement du béton, ce qui permettra la segmentation et la réduction du volume des capillaires par formation d'avantage d'hydrates, permettant d'avoir une plus grande compacité et de meilleures résistances mécaniques.
- Matériaux constituant le béton, qui doivent répondre aux exigences de qualité. Si par exemple il y a un risque d'alcali-réaction, les granulats, en plus des exigences classiques (propreté, granularité...) doivent être qualifiés pour déterminer leur réactivité, à considérer lors de la formulation du béton.
- Teneur optimale en fines pour permettre au béton frais de s'opposer au ressuage, d'avoir une plus grande cohésion et une homogénéité du béton.

‣ Ajouts minéraux (laitier, pouzzolane, cendres volantes, calcaire...) : peuvent améliorer la durabilité du béton, par leur caractère inerte en augmentant sa compacité, ou en lui conférant une capacité de résister à un milieu agressif particulier, par leur caractère chimique et minéralogique.

#### (B) La Formulation du Béton

Du point de vue formulation, la durabilité d'un béton peut être obtenue notamment par :

- Le rapport Eau/Ciment ( $E/c$ ). Ce rapport contrôle la plupart des propriétés du béton : sa compacité (clé de la durabilité d'un béton), sa perméabilité, ses performances mécaniques, son retrait...
- Un remplissage granulométrique garantissant une plus grande compacité possible à sec.
- La résistance mécanique du béton. La classe de résistance du béton doit être proportionnelle à l'agressivité du milieu, car l'action de quelques pathologies du béton crée des contraintes internes importantes, pouvant causer l'expansion et la fissuration du béton, si le béton n'a pas une capacité à résister mécaniquement à ces contraintes, surtout à la traction.
- Si le béton est soumis au gel sévère, on doit prévoir dans sa formulation un réseau de bulles (obtenu par l'adjonction d'adjuvants), avec des caractéristiques spécifiques, pour résister à l'action du gel/dégel.

#### (C) La Cure du Béton

La cure du béton est l'ensemble des précautions indispensables à prendre pour protéger le béton au jeune âge et favoriser son durcissement : brumisation, emploi de films plastiques ou de bâches humides... La cure du béton protégera le béton contre la dessiccation précoce et l'évaporation de son eau interne, et évitera ainsi l'arrêt du processus de durcissement surtout de la couche superficielle de recouvrement, permettant d'obtenir un béton plus compact avec moins de microfissures.

### 2.3. Facteurs liés à la mise en œuvre de l'ouvrage

Le béton est un matériau dont les composants sont généralement rassemblés sur site. Donc la possibilité qu'il y ait un maillon faible lors de la mise en œuvre est importante. Ainsi, beaucoup d'erreurs préjudiciables pour la durabilité de l'ouvrage peuvent survenir lors de cette étape, exemple :

- Mauvaises conditions de transport du béton frais : ségrégation, ou raidissement du béton causés par un départ d'eau (délais de livraison trop longs ou température extérieure élevée).
- Mauvaise vibration du béton : trop brève ou pas assez puissante, causant des défauts d'homogénéité du béton. Une vibration trop importante qui peut entraîner une ségrégation du béton et par conséquent une mauvaise répartition de ses constituants.
- Mauvaise exécution des coffrages, causant la fuite de laitance ou un manque de recouvrement des armatures. Mauvaise disposition des armatures et manque de soin pour l'exécution de certains détails (gousset, appuis, joints, pentes...).
- Décoffrage prématuré, méthodes de cure insuffisantes pour la protection du béton frais et jeune.

Ces erreurs peuvent affecter la durabilité du béton armé, car elles peuvent engendrer de graves désordres : réduction de la compacité du béton, retraits importants, défauts d'étanchéité, etc.

## 2.4. Facteurs liés à la conception de l'ouvrage

Une Structure mal conçue trouve sa durabilité déficiente malgré l'utilisation d'un béton de bonne qualité. Les défauts de conception peuvent être des erreurs de calcul, de mauvaises estimations des surcharges, une mauvaise conception comme la non prévoyance d'un drainage suffisant pour limiter les accumulations d'eau, un enrobage insuffisant des armatures, la non prévoyance de joints suffisamment espacés, une géométrie de l'ouvrage engendrant de fortes contraintes internes ...

## 2.5. Interaction Sol - Ouvrage

Des problèmes liés au sol de fondation, comme les mouvements de terrains, fondation sur terrain en pente, fondation sur sol hétérogène (présence de cavités, couches de fondation de natures différentes...), fondation sur sols argileux gonflants... peuvent créer de graves désordres dans les ouvrages s'ils ne sont pas pris en charge par une connaissance suffisante du sol de fondation. Ces désordres se traduisent par des tassements de l'ouvrage, ayant pour conséquences une fissuration ou un basculement de l'ouvrage, une rupture des canalisations... Il faut noter aussi que l'étude du sol est aussi importante pour la conception parasismique d'un ouvrage.

## 2.6. Défauts d'entretien et de surveillance de l'ouvrage

C'est un facteur très important, surtout pour les ouvrages importants, car les défauts constatés sur un ouvrage en service peuvent rapidement devenir très importants, s'il n'y a pas une intervention aussi rapide que possible afin d'éviter toute aggravation [5]. La surveillance et l'entretien de la structure comme par exemple, le scellement des fissures, le remplacement des membranes d'étanchéité détériorées, le nettoyage des conduits de drainage ou d'évacuation des eaux..., peuvent contribuer à prolonger significativement la durée de vie d'un ouvrage.

## 2.7. Vieillesse et usure

L'utilisation et l'usure d'un ouvrage sont des causes de dégradation du béton. Le vieillissement du béton est associé à une altération pathologique ou accidentelle de ses propriétés initiales.

Enfin, d'autres facteurs de dégradation, accidentels ou autres, tels que les incendies, les chocs, explosion, surcharges non prévus initialement...

# 3. MOYENS DE PREVENTION

L'élaboration d'ouvrages durables en béton armé, repose sur la prise en considération des facteurs importants affectant cette durabilité. La démarche préventive des dégradations doit être prise à tous les niveaux :

- Lors de la conception et du dimensionnement,
- A la réalisation et mise en œuvre de l'ouvrage.

De ce fait, pour assurer la durabilité des ouvrages en béton, il faut respecter les règles suivantes :

- ▶ La connaissance des conditions du milieu et de l'environnement dans lequel va être implanté l'ouvrage, ce qui permettra :
  - Choix des matériaux pour concevoir un béton durable à l'égard du milieu environnant agressif.
  - De prévoir des moyens de mûrissement et de cure suffisants.
  - De calculer l'exothermie du béton en fonction des températures ambiantes, surtout pour les ouvrages massifs. Si l'écart de température risque d'être important entre le cœur du béton, dû à l'exothermicité des réactions d'hydratation et le milieu environnant, réduire cet écart par un traitement de cure adéquat, utiliser un ciment à faible chaleur d'hydratation..., pour réduire le retrait thermique et de ce fait le risque de fissuration du béton.
  - S'il y a un risque de gel sévère, prévoir une formulation adaptée du béton.
- ▶ Confectionner un béton selon les règles de l'art, qui en plus doit répondre aux exigences suivantes :
  - La clé d'un béton durable est sa compacité et sa faible perméabilité, pour empêcher le plus possible le cheminement de l'humidité et des substances chimiques nuisibles dans le béton. Cette compacité est assurée par un faible rapport E/C, un dosage suffisant en ciment, une mise en œuvre soignée, l'ajout d'additions minérales et la cure du béton.
  - Assurer un dosage optimal en éléments fins, on augmentera ainsi la compacité et l'homogénéité du béton, et on réduira le risque de fissuration par tassement du béton frais et le ressuage excessif de l'eau de gâchage.
  - Choix d'un type de ciment adapté à la nature de l'agression, ou l'ajout de certaines additions minérales secondaires (pouzzolane, laitier, cendres volantes...) dans des proportions étudiées.
  - Il y a plusieurs degrés d'agressivité du béton qui sont définis par les normes. Un niveau élevé de dangerosité du milieu environnant, peut nécessiter une protection supplémentaire externe (enduits, peintures...) pour contrer la pénétration de l'humidité et des agents agressifs, ou interne (inhibiteurs de corrosion, armatures galvanisées...).
  - Exercer un bon contrôle de la qualité des matériaux, et donner un soin au choix et à la qualification des granulats, pour prévenir des réactions nuisibles ultérieures entre les granulats et les constituants du béton.
  - Garantir un béton de recouvrement ou de peau de qualité, étant la première barrière face aux agressions extérieures, car ce béton garantit la protection de l'acier des armatures de la corrosion, considérée comme étant la plus grave pathologie qui touche les ouvrages en béton [2].
  - Garantir des résistances mécaniques suffisantes pour résister aux contraintes internes induites par les réactions pathologiques du béton (attaque sulfatique, alcali-réaction, corrosion...).
- ▶ Les erreurs de réalisation sont responsables à plus de 50% de la plupart des endommagements des structures [6], il faut donc pour une mise en œuvre correcte, donner un grand soin à cette étape, exercer un bon contrôle des techniques de construction et un suivi rigoureux à tous les niveaux de la réalisation et de la mise en œuvre.
- ▶ Un soin particulier doit être donné à la conception de l'ouvrage. La conception doit aussi prévoir des dispositifs pour la durabilité d'un ouvrage : joints, de pentes suffisantes et des dispositifs d'évacuation et de drainage efficaces pour empêcher l'accumulation de l'eau...

- La reconnaissance du sol d'assise pour éviter les problèmes liés au sol d'assise, et pour le choix et le dimensionnement corrects du type de fondation.
- Les opérations de surveillance et d'entretien des ouvrages sont nécessaires pour retarder ou éviter certains types de dégradations. Elles doivent être obligatoires pour les ouvrages importants et les ouvrages d'art. Ces opérations doivent être entreprises par un personnel qualifié.

## 4. CONCLUSION

Les causes qui affectent la durabilité des ouvrages en béton sont très diverses, et concernent toutes les étapes : la conception, la réalisation, la mise en œuvre et la surveillance et l'entretien des ouvrages.

Cibler ces causes correctement, permettra, d'un côté, la conception de structures durables et sûres, et plus économiques sur le long terme. D'un autre côté, cette connaissance peut avoir l'avantage de permettre de faire un diagnostic correct des désordres affectant les structures, condition impérative pour réparer durablement.

Les connaissances actuelles nous permettent de proposer quelques solutions de prévention, qui peuvent être simples, et se réduisent à la nécessité de respecter les règles élémentaires de l'art de construction et de réalisation, les plus importantes sont :

- Une formulation de béton en adéquation avec son environnement,
- Une conception de l'ouvrage qui doit garantir la protection des armatures et qui évite les fortes contraintes internes dans le béton,
- La maîtrise de la production du béton : son élaboration, son transport, sa mise en œuvre...,
- La protection du béton frais et jeune, par des traitements suffisants de mûrissement et de cure, en adéquation avec son environnement.
- L'étude du sol de fondation doit être considérée sérieusement par les connaisseurs du domaine,
- La surveillance et l'entretien et la maintenance des ouvrages.

# **CHAPITRE II : DURABILITE DU BETON – NOTIONS IMPORTANTES**

# 1. INTRODUCTION

Le béton est un matériau poreux, multiphasique et vieillissant, et peut être le siège de réactions chimiques et électrochimiques à l'origine de différents types de dégradations des structures de génie civil. Mais le béton peut être un matériau durable, qui offre une résistance à la pénétration des agents extérieurs et aux agressions chimiques et physiques, s'il a été bien formulé et correctement mis en œuvre.

La durabilité du béton et sa résistance à la pénétration des agents agressifs sont liées à ses propriétés de transfert donc de sa porosité interconnectée et sa perméabilité. Mais il y a une autre voie de pénétration possible pour ces agents : les fissures, les plus préjudiciables sont celles précoces provoquées par les différents retraits au jeune âge.

La connaissance des causes qui augmentent ces moyens de transfert, c'est-à-dire la **porosité**, la **perméabilité** et la **fissuration précoce**, permettra de proposer des moyens de prévention, et d'élaboration d'un béton durable.

## 2. NOTIONS DE DURABILITE

### 2.1. Introduction

Tout d'abord, il faut distinguer entre la durabilité du matériau et celle de la structure. La durabilité du matériau ne suffit pas à assurer la durabilité de la structure. Un béton durable est un béton compact (faible porosité et fissuration) dont les constituants sont de qualité et choisis conformément aux normes. La durabilité de l'ouvrage est liée à sa capacité à conserver les fonctions d'usage pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers. Durabilité d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres : qualité de sa conception - qualité des matériaux utilisés - qualité de la réalisation de l'ouvrage et de la mise en œuvre - conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance....

Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations. La durabilité d'un 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 ses conditions d'environnement, avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible, pendant la durée de d'utilisation de projet, temps minimal pour lequel l'ouvrage est conçu [2].

Notons que la durabilité du béton peut concerner le matériau béton et/ou les aciers d'armatures. La durabilité du béton peut s'expliquer par la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans le réseau poreux du béton.



Porosité réduite  $\Rightarrow R_{\text{mécanique}} \nearrow \Rightarrow \text{Durabilité} \nearrow + \text{Perméabilité} \searrow$

Béton durable  $\Rightarrow$  Béton compact

Il y a deux voies pour la pénétration d'agents agressifs :



Chemins faciles pour l'humidité et les agents agressifs

La porosité est le rapport du volume des vides sur le volume total d'un matériau. La porosité intervient par le biais de la taille, espacement entre pores et l'interconnectivité entre les pores. A porosité égale, les agents pénètrent difficilement si les pores sont plus fins. La perméabilité et la porosité sont deux propriétés positivement corrélées.

La fissuration précoce est généralement évitable, cette fissuration précoce est essentiellement due aux différents retraits.

La plupart des propriétés du béton et plusieurs aspects de sa durabilité sont directement liés aux caractéristiques de la pâte de ciment durcie, qui représente de 25% à 40% du volume du béton. Il est donc important de comprendre la structure de cette phase dans de qui suit.

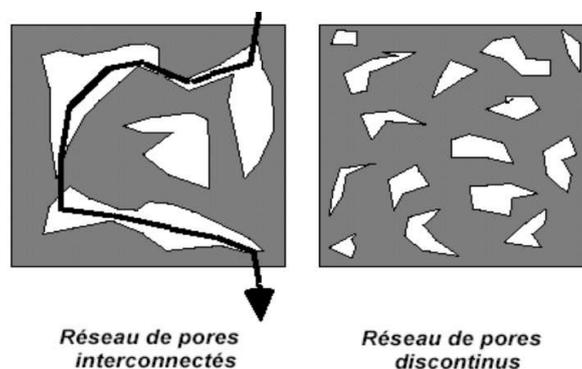


Figure 2 : Influence du degré d'interconnectivité sur la perméabilité de la pâte de ciment [3]

## 2.2. Pâte du Ciment Hydraté

### 2.2.1. Production du Ciment :

On distingue plusieurs types de ciments : ciments courants (NF P15-301) les plus utilisés, ciment d'aluminates de calcium (NF P 15-315), ciment prompt naturel (NF P 15-314), ciments blancs...

Les ciments courants, offrent une gamme très large de possibilités, tant en résistance mécanique (par le choix de leur classe) qu'en adaptation à l'environnement (par le choix de leur type).

Les ciments Portland contiennent au moins 95% de clinker. Le clinker est obtenu par cuisson à 1450°C, de matières premières constituées de calcaire (~80%), d'argile (~20%) et d'ajouts. Le calcaire apporte la chaux, les argiles apportent : l'alumine, la silice et l'oxyde de fer.

Le clinker obtenu après cuisson, est broyé pour obtenir une farine. Pour réguler la prise de cette farine, on ajoute ~5% de gypse, on obtient alors le ciment Portland.

La chimie des ciments adopte la notation conventionnelle suivante pour les oxydes : **C** : CaO – **S** : SiO<sub>2</sub> – **A** : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – **F** : Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – **H** : H<sub>2</sub>O. Selon cette notation, les principaux constituants du clinker sont :

<b>C<sub>3</sub>S</b> :	silicate tricalcique	----	ALITE
<b>C<sub>2</sub>S</b> :	silicate bi calcique	----	BELITE
<b>C<sub>3</sub>A</b> :	aluminat tricalcique	----	CELITE
<b>C<sub>4</sub>AF</b> :	aluminoferrite tétracalcique	----	FERRITE
<b>Autres</b>	(sulfates, alcalins...)		

Pour déterminer la composition du clinker en minéraux principaux C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A et C<sub>4</sub>AF, on peut se baser sur la méthode de Bogue [1]. Dans un ciment Portland on trouvera des proportions de :

**50%-65%** de C<sub>3</sub>S qui donne au ciment une résistance rapide et élevée.

**15%-20%** de C<sub>2</sub>S qui permet au ciment d'atteindre des résistances élevées à moyen et à long terme.

**5%-15%** de C<sub>3</sub>A qui contribue à la prise de la pâte de ciment, mais assez peu à la résistance finale.

**5%-10%** de C<sub>4</sub>AF qui a un rôle mineur dans la réaction de durcissement.

**3%-5%** de gypse (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O).

Le ciment Portland contient aussi des constituants mineurs, les plus importants sont :

**La magnésie MgO**, qui provient de la dolomite souvent présente avec le calcaire. Elle peut causer un gonflement du béton si sa teneur est élevée.

**Les oxydes alcalins K<sub>2</sub>O et Na<sub>2</sub>O** proviennent en général de l'argile et des feldspaths.

**L'anhydride sulfurique (SO<sub>3</sub>)** dans le clinker provient des matières, telles que la pyrite (FeS<sub>2</sub>), mais aussi du calcaire ou de l'argile et surtout des combustibles utilisés pour la cuisson [1].

Les normes NF 15 300 et NF 15 301 définissent les différentes catégories de ciments, ceci en fonction de leurs compositions et de leurs résistances, comme le montre le Tableau 1.

La désignation normalisée des ciments courants et les indications complémentaires sont données dans l'ordre (exemple : **CPA-CEM I 42,5** ; **CPJ-CEM II/A 32,5R** ; **CHF-CEM III/B 42,5 PM ES**)

- **Le type** ;
- **La classe de résistance normale** ;
- **La classe de résistance au jeune âge (2 jours), ciment appartenant à la classe élevée R** ;
- Éventuellement, les **notations complémentaires**, pour ciments adaptés à des usages spécifiques : **PM** (ciment pour travaux à la mer), **ES** (ciment pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates), **CP** (ciment à faible chaleur d'hydratation initiale et à teneur en sulfures limitée), cette dernière avec indication de la classe de teneur en sulfures, **CP1** ou **CP2**.

Tableau 1 : Les cinq types de ciments courants et leur composition (NF P 15-301) [4]

NOTATION DU TYPE DE CIMENT	DESIGNATION	CLINKER (K) (% EN POIDS)	COMPOSANTS PRINCIPAUX (% EN POIDS)	NATURE	COMPOSANTS SECONDAIRES (% EN POIDS)
CEM I	Ciment Portland	95 – 100	0	-	0 – 5
CEM II/A	Ciment Portland Composé	80 – 94	6 – 20	Calcaire (L) Laitier granulé (S) Fumée de silice (D, max.10%)	0 – 5
CEM II/B		65 – 79	21 – 35	Pouzzolanes (P, Q) Cendres volantes (V, W) ou schiste carbonisé (T)	
CEM III/A	Ciment de Haut Fourneau	35 – 64	36 – 65	Laitier granulé	0 – 5
CEM III/B		20 – 34	66 – 80		
CEM III/C		5 – 19	81 – 95		
CEM IV/A	Ciment Pouzzolanique	65 – 90	10 – 35	Pouzzolanes, cendres volantes	0 – 5
CEM IV/B		45 – 64	36 – 55		
CEM V/A	Ciment au Laitier et aux Cendres	40 – 64	18 – 30	Laitier granulé et pouzzolanes et/ou cendres volantes	0 – 5
CEM V/B		20 – 39	31 – 50		

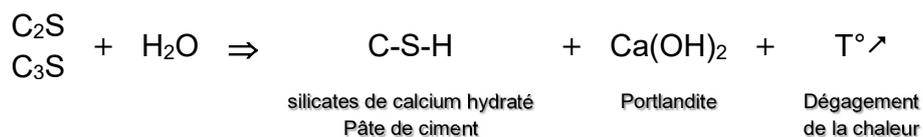
## 2.2.2. Hydratation du ciment

Le ciment Portland est un liant hydraulique, qui se solidifie en réagissant avec l'eau. L'hydratation du ciment fait intervenir des réactions chimiques très diverses avec l'eau. Les produits de cette hydratation sont appelés hydrates, composés insolubles. La pâte de ciment occupe 25-40% du volume du béton. La plupart des propriétés du béton sont liées aux caractéristiques de la pâte du ciment durci. Les hydrates les plus importants sont :

- Silicates de calcium hydratés C-S-H, issus de l'hydratation du  $C_2S$  et  $C_3S$  et qui participent le plus au développement de la résistance, ce sont les hydrates les plus importants.
- Chaux hydratée ou portlandite C-H.
- Aluminates hydratés.
- Impuretés + eau adsorbée par certains cristaux.

### 1) Silicates de calcium hydraté (C-S-H) - Chaux hydratée (CH ou portlandite) :

Au contact de l'eau, les silicates tricalciques  $C_3S$  et les silicates bicalciques  $C_2S$  se dissolvent sous forme d'ions qui interagissent entre eux et forment des silicates de calcium hydraté (C-S-H) et de l'hydroxyde de calcium ou de la portlandite ( $Ca(OH)_2$ ). Ces réactions sont exothermiques.



- Les C-S-H sont des composés très peu cristallins, ils ont les caractéristiques d'un gel amorphe et possèdent une composition variable. Les C-S-H constituent 60 à 70% d'une pâte de ciment hydratée.

- La portlandite qui constitue 20 à 30% d'une pâte de ciment hydratée et 90% de son alcalinité.

Les C-S-H participent le plus au développement des résistances mécaniques et influencent la plupart des propriétés de la pâte de ciment. Les fibres des C-S-H ont la propriété de se souder à elles-mêmes et aux parois environnantes par des ponts d'ions calcium ou des ponts hydrogène très solides. Ils réalisent ainsi une véritable colle dans la matrice ciment.

Les C-S-H sont poreux, les pores contiennent de l'eau fortement retenue sur les feuillets des C-S-H par des forces de surface. Cette eau permet à l'hydratation de se poursuivre, elle est relativement stable et difficile à extraire par séchage. Il existe plusieurs variétés de C-S-H, le type le plus connu dans la pâte de ciment, est le type fibreux formé de particules fibreuses d'une longueur  $\sim 0,5$  à  $2 \mu\text{m}$  [1].

La portlandite forme des amas de cristaux entre les grains du C-S-H. Elle contribue peu au développement des résistances mécaniques du béton, elle participe au développement des résistances à très jeune âge [1]. La portlandite est instable si le  $\text{pH} < 12,5$ .

2) **Aluminates hydratés** : représentent 15 à 20% d'une pâte de ciment hydratée.

L'aluminate tricalcique  $\text{C}_3\text{A}$  est le composé du ciment le plus réactif avec l'eau. C'est parce que l'hydratation des aluminates est très rapide que les cimentiers ajoutent du gypse au clinker pour contrôler ces réactions. Les réactions avec les aluminates s'effectuent en plusieurs étapes :

**Étape 1** : Formation d'ettringite (hydratation du  $\text{C}_3\text{A}$  et du sulfate de gypse). La formation de l'ettringite diminue l'hydratation du  $\text{C}_3\text{A}$  en formant une barrière de diffusion (période dormante) autour du  $\text{C}_3\text{A}$ , de façon analogue à celle qui est formée autour des grains de  $\text{C}_3\text{S}$  par le C-S-H.

**Étape 2** : Transformation de l'ettringite en monosulfate de calcium hydraté.

**Étape 3** : Hydratation des aluminates résiduels  $\text{C}_3\text{A}$  et  $\text{C}_4\text{AF}$  (au bout de quelques semaines). La réaction d'hydratation du  $\text{C}_4\text{AF}$  dégage peu de chaleur, et participe peu au développement des résistances mécaniques.

Notons que l'hydratation du ciment est accompagnée de changements de volume :

- La réaction produisant du C-S-H se fait avec diminution de volume, ce qui produit une contraction de la pâte proportionnelle (contraction LeChatelier).
- La consommation de l'eau des pores capillaires par la réaction d'hydratation produit l'auto dessiccation de la pâte, ce qui conduit à une contraction, elle peut être évitée si le béton est immergé dans l'eau, amplifiée par la déshydratation.
- La croissance cristalline d'hydrates massifs comme la portlandite exerce une pression sur les parois des pores capillaires, produisant un gonflement.
- A ces variations se superposent des variations d'origine thermique, liées à la chaleur d'hydratation et à sa dissipation selon la géométrie de l'ouvrage.

Il y a un risque de gonflement excessif dans le béton dû à la présence de la chaux libre  $\text{CaO}$  et du magnésium libre  $\text{MgO}$ . Des limites sont imposées pour ces deux composés (un max de 2% et de 5% respectivement).

La Figure 3(a) montre une représentation d'une pâte de ciment hydratée, on y retrouve :

- Des grains de ciment partiellement hydratés et recouverts d'une couche d'hydrates.
- Des capillaires remplis ou partiellement remplis d'eau.
- Des hydrates les C-S-H et la chaux qui remplissent graduellement les espaces entre les grains.
- Les pores de gel (très petits) et les bulles d'air (très grands) ne sont pas représentés.

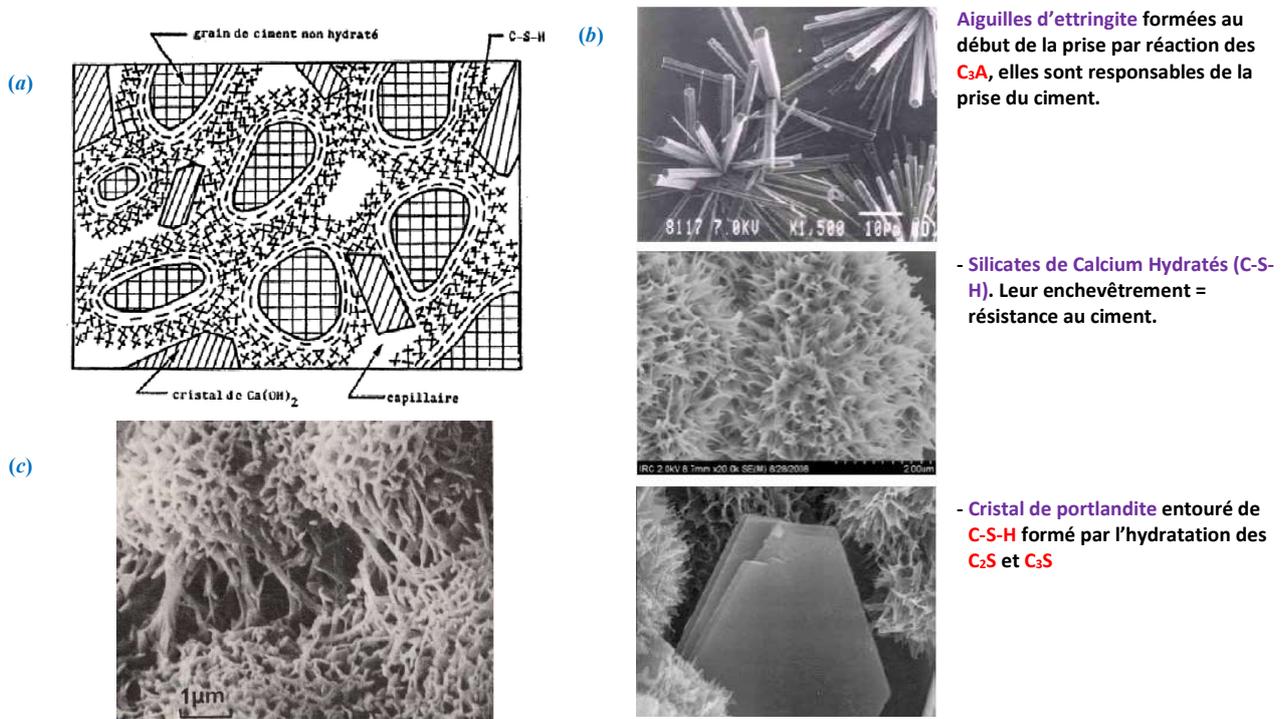


Figure 3 : (a) Représentation schématique de la pâte de ciment hydratée [1], (b) Principaux produits de réaction d'hydratation du ciment Portland (vues au MEB <sup>(1)</sup>) (c) Enchevêtrement d'hydro-silicates de chaux formant un gel (CSH)

<sup>(1)</sup> <http://www.amaco.org/spiral-files/download?mode=inline&data=1105>

<sup>(2)</sup> : <https://lemondeetnous.cafe-sciences.org/2014/07/quel-lien-entre-les-romains-et-l'exploitant-d'une-centrale-au-charbon/>

### Remarque :

L'hydratation du ciment passe par les périodes suivantes [5] : Période dormante - Période de prise - Période de durcissement. En détail, l'hydratation du ciment passe par les étapes suivantes :

- 1- Période dormante : pendant une à deux heures les réactions d'hydratation se poursuivent lentement, la pâte reste maniable : formation de la portlandite ensuite de C-S-H.
- 2- Période de prise : hydrates en abondance qui vont donner une consistance élevée à la pâte. Les cristaux de portlandite + fibres de C-S-H s'enchevêtrent et remplissent peu à peu les pores → matériau dense et solide → début de prise. La prise du ciment est le passage de la pâte de ciment, de l'état liquide à l'état solide.
- 3- Période de durcissement : qui se développe environ 8 heures après le début de l'hydratation et qui va se poursuivre dans le temps et va conduire à augmenter les résistances mécaniques du béton.

## 2.3. Porosité du béton et de la pâte du ciment, perméabilité et diffusion du béton

### 2.3.1. Porosité de la pâte du ciment hydratée

La pâte du ciment hydratée est un corps poreux, constituée de vides qui sont plus ou moins remplis d'eau selon le degré d'humidité relative en équilibre avec la pâte. On distingue [6] :

- Pores de grand diamètre (0,05 à 0,4 microns) ;
- Pores de faible diamètre (5 à 10 nanomètres) correspondant à la porosité des hydrates de C-S-H.

#### - Comment évolue la porosité du béton ?

La porosité évolue en fonction du développement des hydrates en fonction du temps. Avec la progression de l'hydratation, des hydrates se forment à la surface des grains de ciment ou précipitent dans les espaces inter granulaires. Après un certain temps, les espaces entre les grains seront segmentés par une paroi d'hydrates, ce qui produit une diminution de la perméabilité. Le tableau suivant accompagnant la Figure 4, représente la durée de l'hydratation nécessaire pour produire un réseau de pores discontinu, en fonction du rapport E/C [1].



Figure 4 : influence du rapport E/C et du degré d'hydratation sur la continuité des pores capillaires [1]

La porosité est grandement influencée par le rapport E/C, un faible E/C = volume total des pores capillaires réduit + diamètre des pores réduit. C'est ce qui explique que les bétons avec E/C faible développent très rapidement des résistances mécaniques.

#### - Influence de la porosité sur les propriétés du béton

La porosité de la pâte de ciment hydratée gouverne de nombreuses propriétés du béton, telles que :

- Caractéristiques mécaniques
- Capacité de transfert dans le béton (eau, gaz, ions).

Si : Porosité ↘ ⇒ Résistances mécaniques ↗ ⇒ Durabilité ↗ + Perméabilité ↘ (voir Figure 5).

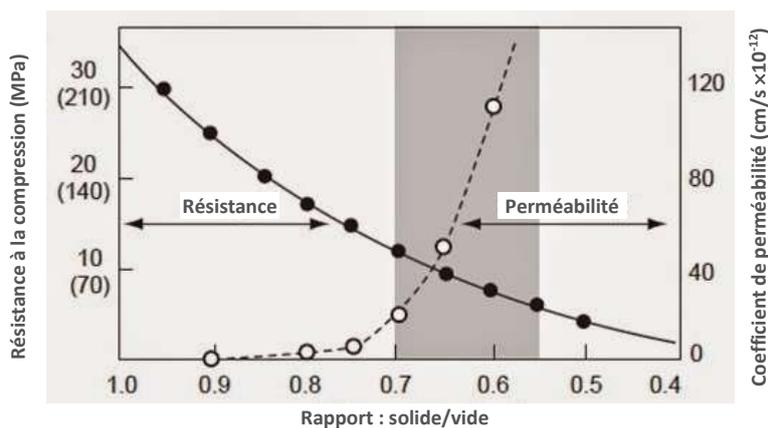


Figure 5 : Relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton [1]

### - Comment réduire la porosité du béton ?

Pour réduire la porosité capillaire, on doit agir sur [5] :

- Le mélange granulaire : augmenter son étendue et optimiser la distribution de tailles des grains du mélange sec du béton.
- La suspension pâteuse : la densifier par la réduction du rapport E/C et l'augmentation de la quantité du ciment.

## 2.3.2. Perméabilité et Diffusion du béton

La durabilité d'un ouvrage en béton est souvent liée à l'étanchéité de certains éléments de la structure, exemple structures conçues pour contenir des liquides ou des gaz ou retenir des agents agressifs. Cette étanchéité dépend largement de la facilité avec laquelle les fluides peuvent pénétrer et se déplacer à l'intérieur du béton. Dans ce contexte on peut distinguer deux concepts, la perméabilité et la diffusion :

### 2.3.2.1. Perméabilité :

La perméabilité d'un béton est caractérisée par sa faculté de se laisser traverser, suivant une surface d'application et une épaisseur donnée, par un liquide exerçant une pression hydrostatique définie.

C'est surtout la perméabilité de la peau du béton qui est la plus liée à la durabilité du béton armé, car c'est elle qui bloque ou ralentit le passage des agents agressifs. Notons que la porosité de la peau du béton est plus importante que celle de la masse du béton (granulats moindres, contenu d'air de ciment de particules fines plus élevés...).

Pour diminuer la perméabilité d'un matériau poreux, il faut diminuer la porosité totale et la taille des pores et la connectivité entre les pores, pores isolés.

La perméabilité au gaz est généralement supérieure à celle de l'eau. Elle est importante à évaluer les risques de carbonatation ou de corrosion dans le béton armé. La perméabilité au gaz d'un mortier ou d'un béton est mesurée avec un gaz, tels que l'oxygène ou l'azote sous pression élevée, gaz qui sont inertes faces au béton. La perméabilité au gaz est indiquée par le coefficient de perméabilité spécifique  $k$ , dans les bétons secs  $k = 10^{-14}$  à  $10^{-19}$  m<sup>2</sup>.

### 2.3.2.2. Diffusion :

La différence entre perméabilité et diffusion : la première est le résultat d'un gradient de pression, la diffusion le résultat d'un gradient de concentration. Les transports par diffusion peuvent se produire sous deux formes :

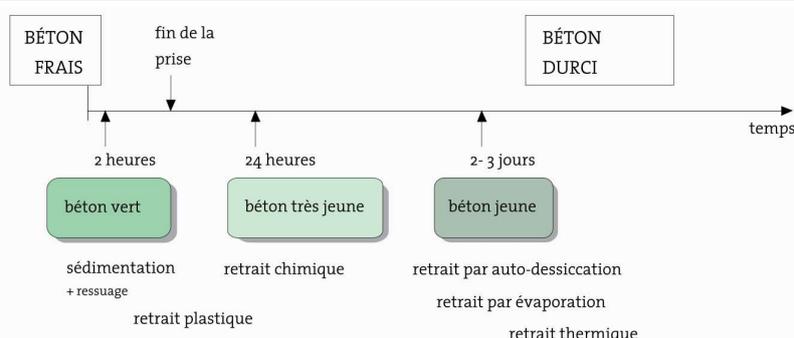
- En phase liquide (ions chlore, sulfates, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>) : diffusion des constituants en solution dans la phase liquide, exemple eau de mer.
- En phase gazeuse (oxygène, CO<sub>2</sub>) : concerne par exemple la diffusion de la vapeur d'eau ou la diffusion de l'oxygène ou du CO<sub>2</sub>.

## 2.4. Causes de la fissuration précoce du béton

L'une des voies pour la pénétration des agents agressifs dans le béton : les fissures, dues aux surcharges de service, retrait du béton.... La fissuration la plus préjudiciable pour la durabilité est celle précoce (aux jeunes âges). Ce type de fissuration est causé essentiellement par les différents retraits du béton, comme le montre le Tableau 2.

Tableau 2 : Risques de fissuration en fonction du Type de Retrait [7]

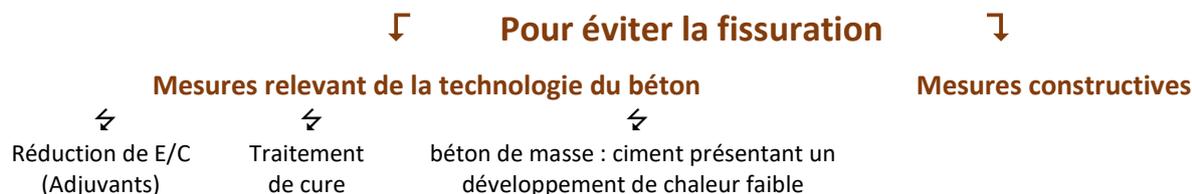
Type de retrait	Risques de fissuration		Utilité / Efficacité de diverses mesures		
	Délai d'apparition	Types de fissures	Composition du béton	Cure	Armatures
Retrait plastique	avant ou pendant la prise	superficielles	faible	très élevée	nulle
Retrait par (auto) dessiccation, c.-à-d. consommation de l'eau du béton durant le durcissement (retrait endogène) ou séchage du béton durci (retrait hydraulique)					
• à court terme	quelques jours à quelques semaines après bétonnage	superficielles à traversantes	très élevée	très élevée	moyenne
• à long terme	quelques mois à quelques années après bétonnage	traversantes	très élevée	élevée	très élevée
Retrait thermique	15 h à 10 jours après bétonnage	superficielles à traversantes	élevée	très élevée	moyenne



Retrait : contraction du volume de la pâte, qui si elle est empêchée crée des contraintes internes de traction qui peuvent causer la fissuration de la pâte. Retrait peut toucher le béton frais ou le béton durci. Les différents Retraits sont résumés ci-après :

A	<b>1- Retraits à court terme :</b>	- Plastique ou précoce - Auto dessiccation - Thermique
	<b>2- Retrait à long terme :</b>	- Dessiccation
B	<b>1- Béton frais :</b>	- Ressuage - Plastique
	<b>2- Béton durci :</b>	- Auto dessiccation – Thermique - Dessiccation

La fissuration du béton a une grande incidence sur l'étanchéité et la corrosion, donc sur la durabilité et l'aptitude au service de la structure.



## 2.5. Principaux processus de dégradation chimique du béton

D'un point de vue chimique le béton est un matériau basique, de ce fait, il est vulnérable aux attaques acides. Il peut résister à la plupart des attaques chimiques lorsqu'il est bien fabriqué et mis en place. Les dégradations du béton peuvent résulter de plusieurs processus chimiques causées par des agents extérieurs ou internes, se traduisant généralement par deux types d'altérations : érosion, gonflement et fissuration : formation de composés expansifs [1].

Notons que les substances nuisibles n'agissent généralement qu'en présence d'humidité. Les différentes actions chimiques agressives à l'égard du béton peuvent être résumées comme suit :



### - La lixiviation ou la dissolution des hydrates

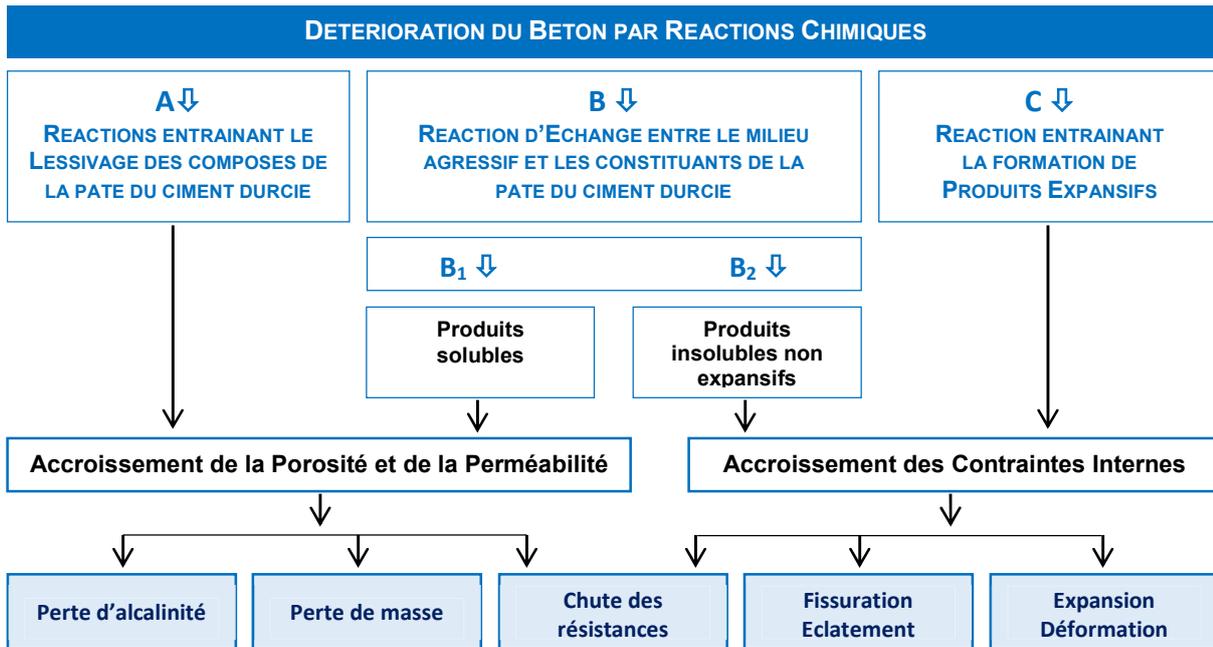
Action de l'eau sur le béton = dissolution de certains produits à base de calcium (surtout la portlandite). Résultat : propriétés mécaniques ↘ + porosité ↗. Les substances dissoutes réagissent avec le CO<sub>2</sub> de l'air pour former de l'efflorescence en surface.

### - Échange ionique avec le milieu extérieur agressif

Exemple, solutions acides qui interagissent avec la pâte de ciment pour former des sels solubles. Eaux agressives (contenant par exemple Mg<sup>++</sup>) qui réagissent avec la pâte de ciment pour former de nouveaux produits insolubles sans propriétés liantes.

### - Formation de Produits Expansifs

Plusieurs types de produits expansifs peuvent se former dans la pâte de ciment durcie, qui créent des pressions internes, provoquant une fissuration préjudiciable du béton.

**Exemple :**

- A. Attaque du  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  par l'eau pure (la solubilité de l'hydroxyde de calcium est de 1,7 g/l à 20°C)
- B<sub>1</sub>. Solutions acides, formant du chlorure de calcium, de l'acétate de calcium, ...
- B<sub>2</sub>. Solutions d'acide oxalique et ses sels, formant l'oxalate de calcium.
- c. (i) Attaque par les sulfates formant l'ettringite  
 (ii) Réaction « alcali-granulat »  
 (iii) Corrosion de l'acier des armatures dans le béton.

### 3. CONCLUSION

Une bonne durabilité du béton (armé), induit une compacité élevée du matériau et une perméabilité réduite. Une bonne durabilité est réalisée par les moyens suivants :

- Un soin particulier doit être donné à la formulation du béton : un dosage relativement élevé en ciment et un faible rapport E/C restent recommandés pour assurer une bonne durabilité du béton. Utilisation un type de ciments adapté à l'environnement agressif de l'ouvrage.
- L'accent est mis sur l'importance des conditions de mise en œuvre et de la cure en particulier (pour éviter la fissuration précoce).

## **CHAPITRE III : PATHOLOGIES DU BETON ARME**

## 1. CONTEXTE NORMATIF

Le fascicule de documentation FD P 18-011 : « **Définition et classification des environnements chimiquement agressifs : recommandations par la formulation des bétons** » :

- Définit les environnements chimiquement agressifs pour les bétons armés et précontraints (liquides, gazeux et solides).
- Décrit les modes d'actions des environnements chimiquement agressifs.
- Définit les classes d'agressivité chimiques : XA1 / XA2 / XA3 (environnement à faible / moyenne / forte, agressivité chimique resp.).
- Fournit des recommandations pour le choix des ciments, des additions et pour la formulation et la fabrication des bétons.

Il est complémentaire de la norme NF EN 206-1.

La norme NF EN 206-1 : **Spécifications, performances, production et conformité** (remplacée par NF 206-1/CN), impose des exigences pour la résistance du béton aux diverses conditions environnementales auxquelles il est soumis pendant la durée d'utilisation de la structure. Ces conditions environnementales sont résumées par des classes d'exposition (regroupées en 6 familles) [8] :

Classe X0	Aucun risque de corrosion ou d'attaque
Classe XF1, XF2, XF3, XF4	Attaques gel/dégel avec ou sans agents de déverglaçage
Classe XS1, XS2, XS3	Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer
Classe XC1, XC2, XC3, XC4	Corrosion induite par carbonatation
Classe XD1, XD2, XD3	Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine
Classe XA1, XA2, XA3	Attaques chimiques

Pour chacune de ces classes NF EN 206-1 précise les valeurs limites pour la composition et les propriétés du béton, notamment :

- Teneur minimale en liant équivalent,
- Rapport maximal Eau efficace/liant équivalent,
- Classe de résistance minimale du béton,
- Teneur minimale en air.

La norme NF EN 206-1 propose des fascicules complémentaires de recommandations suivantes :

- "Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel"
- "Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali réaction" (LCPC, juin 1994), remplacées par, FD P 18-464 : "Béton – dispositions pour prévenir les phénomènes d'alcali-réaction" (avril 2014).
- "Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne" (LCPC, août 2007).

En se basant sur ces textes normatifs, les pathologies du béton armé présentées dans ce chapitre sont :

- Réaction entre ciment et granulats : l'alcali-réaction
- L'attaque sulfatique du béton : exogène et endogène
- L'attaque par l'eau de mer
- Attaques chimiques par les eaux et acides
- La corrosion des aciers d'armatures causée par : la carbonatation, l'action des chlorures
- Action du gel/dégel sur le béton armé.

## 2. REACTION ALCALIS-GRANULATS

### 2.1. Définition de la Réaction Alcalis-Granulats (RAG) :

Les granulats dans le béton sont dans un milieu fortement alcalin : la solution interstitielle du béton. Dans ce milieu, des réactions aux interfaces ciment/granulats peuvent se produire. Ces réactions peuvent être bénéfiques comme par exemple la formation de carbo-aluminates avec les granulats calcaires, ou néfastes comme les réactions pathologiques entre les alcalins du béton et les granulats. Ces réactions sont dites **alcalis-granulats** (ancienne appellation) ou **alcali-réaction** (nouvelle appellation). Cette pathologie est difficile à diagnostiquer.

Dans ce cas, certains types de granulats peuvent réagir chimiquement avec les alcalins de la solution interstitielle du béton (hydroxydes alcalins NaOH et KOH). Le résultat de cette réaction : formation d'un gel gonflant qui peut engendrer sous certaines conditions une expansion, susceptible de causer une fissuration du béton. Les alcalins qui causent cette pathologie, proviennent essentiellement du ciment Portland mais aussi d'autres constituants du béton ou de l'environnement de l'ouvrage.

Les ouvrages les plus touchés par la RAG sont généralement ceux en contact permanent avec l'eau (barrages, ponts, réservoirs...). L'échéance d'apparition est de 2-25 ans pour que la RAG se manifeste de façon significative dans un ouvrage en béton, en fonction de certains facteurs, tels que le degré de réactivité des granulats, le contenu du béton en alcalis, les conditions d'exposition, etc.



Figure 6 : Dégâts dus aux RAG dans un mur de soutènement non armé [9]

### 2.2. Quelques Définitions :

**Solution aqueuse interstitielle** : solution qui remplit les pores du béton. Cette solution n'est pas pure mais contient des sels dissous, principalement de la chaux  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (portlandite), des ions alcalins ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ )... Donc c'est une solution alcaline (pH varie entre 12,6 et 13,7).

**Les alcalins** : nom générique des 6 éléments de la colonne IA du tableau de classification périodique des éléments. L'élément le plus abondant est le sodium sous forme de chlorures (2,63% de la lithosphère).

**L'équivalent  $\text{Na}_2\text{O}$** , noté **éq.  $\text{Na}_2\text{O}$**  : dans les ciments les alcalins se présentent sous forme d'oxydes  $\text{Na}_2\text{O}$  et  $\text{K}_2\text{O}$ . La teneur en alcalins totaux est exprimée sous forme d'alcalins équivalents en appliquant la formule suivante (0,658 = rapport des masses molaires  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ ) : **éq.  $\text{Na}_2\text{O}$  = % $\text{Na}_2\text{O}$  + 0,658 % $\text{K}_2\text{O}$**

## 2.3. Conditions pour la Manifestation de la RAG :

Pour que la réaction alcali-réaction se manifeste il faut certaines conditions, essentiellement les trois conditions suivantes *réunies en même temps* (voir Figure 7) :

### 1) La concentration en alcalins ( $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ ) dépassant un seuil critique

Pour amorcer et entretenir la RAG, il faut une teneur élevée en alcalins ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) dans la solution interstitielle du béton, supérieure à un certain seuil critique (exemple : éq.  $\text{Na}_2\text{O} > 3 \text{ kg/m}^3$  de béton).

La teneur du ciment Portland en alcalins peut dépendre des matières premières utilisées ou du mode de fabrication du clinker (sèche ou humide, type du combustible...).

Remarque : dans les grandes constructions, où la teneur en eau du béton est élevée, tels que les barrages, on a observé des réactions nuisibles avec une teneur en alcalins aussi faible que  $2 \text{ kg/m}^3$ .

### 2) Le granulat soit potentiellement réactif

La présence en quantité suffisante de granulats réactifs (contenant de la silice amorphe ou incomplètement cristallisés, comme l'opale) (voir Tableau 3).

### 3) De l'eau ou une humidité relative élevée

La réaction alcali-réaction n'est possible qu'en présence d'eau (surtout si elle est renouvelée), ou d'un environnement humide (humidité relative supérieure à 80-85%).

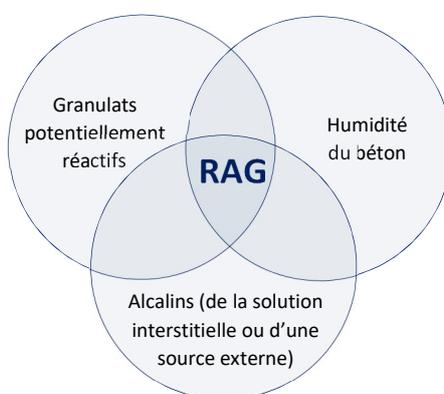


Figure 7 : Diagramme des conditions requises pour l'apparition de la RAG

## 2.4. Les Types des Réactions Alcalis-Granulats :

On distingue trois principales réactions alcalis-granulats, en fonction de la nature des phases réactives des granulats (voir Tableau 3) :

**RAG**

- ① **Réaction Alcalis-Silice** : est la plus fréquente
- ② **Réaction Alcalis-Silicate** : proche de la précédente
- ③ **Réaction Alcalis-Carbonate** ou **Dédolomitisation**

Tableau 3 : les principaux minéraux et roches réactifs [9]

Familles de roches	Roches dans lesquelles des phases minérales réactives peuvent se produire	Phases minérales réactives	Type de réaction
Roches cristallines	Granites, granodiorites, diorites, etc.	● Quartz microfibreux, poreux	alcali-silicate
Roches volcaniques	Rhyolites, dacites, andésites, basaltes, obsidiennes, tufs	● Formes de quartz instables à hautes températures: tridymite, cristobalite ● Acide silicique cryptocristallin: calcédoine ● Acide silicique hydratisé, amorphe: opale	alcali-silice alcali-silicate alcali-silice
Roches métamorphiques	Gneiss, schistes, mylonites, quartzites, cornéennes	● Quartz fissurés, déformés ● Feldspaths altérés, poreux, déformés ● Micas en fins cristaux ● Quartz crypto- et microcristallins	alcali-silicate alcali-silicate alcali-silicate alcali-silice
Roches sédimentaires	Grès, grauwackes, siltites, silex, calcaires siliceux	● Feldspaths altérés, poreux, déformés ● Argiles en fin cristaux, micas ● Quartz crypto- et microcristallins ● Acide silicique cryptocristallin: calcédoine ● Acide silicique hydratisé, amorphe: opale	alcali-silicate alcali-silicate alcali-silice alcali-silice alcali-silice

### ① Réaction Alcalis-Silice (RAS)

Les formes de silice réactive susceptibles de donner lieu à la RAG peuvent se trouver dans une grande variété de roches employées pour l'élaboration de granulats. La réaction alcalis-silice (RAS) est la plus courante des réactions alcalis-granulats ; elle est causée par certains granulats siliceux que l'on trouve dans certains granites, gneiss, roches volcaniques, tufs et calcaires siliceux.

La RAS produit un gel qui absorbe de l'eau et augmente de volume. La pression exercée par le gel fracture les granulats et provoque la formation et la propagation des fissures dans le béton environnant. Généralement, cette réaction entraîne une fissuration en faïençage.

Cette réaction se déroule en deux séquences.

- 1) Concentration des alcalins dans la solution interstitielle lors de la progression de l'hydratation. Dans un premier temps, les alcalins du béton sous forme d'hydroxydes alcalins NaOH, KOH ; qui migrent en solution interstitielle à travers les pores du béton, et entrent en contact avec des particules de silice réactive qui peut se trouver en surface ou dans les fissures des granulats. Il se forme un **gel** sous forme de **silicate-alcalin**.
- 2) Dans un second temps, le **gel de silicate-alcalin** se combine ensuite avec le **calcium** provenant de la pâte du ciment, surtout de la **portlandite** ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), pour donner lieu à la formation d'un **gel silico-calco-alcalin** : **gel silicate-alcalin + portlandite  $\Rightarrow$  gel silico-calco-alcalin**.

Ce gel absorbe une grande **quantité d'eau**, ce qui provoque l'expansion du béton durci. Ces gels peuvent fixer de l'eau jusqu'à 3 fois leur poids en eau, si l'humidité relative est très élevée (> 95%).

La poursuite de cette réaction augmente la pression intérieure (6-7 MPa), engendrant une fissuration et un écoulement du gel lorsque la pression intérieure est supérieure à la résistance à la traction des granulats et de la pâte de ciment durcie.

La cinétique de la RAS est fonction de la perméabilité de la pâte de ciment, la réactivité de la silice, la taille des granulats (dimension réduite, réactivité élevée)... Les produits de réaction se déposent autour et dans les fissures des grains, dans les pores et fissures de la pâte de ciment.

## ② Réaction Alcalis-Silicate

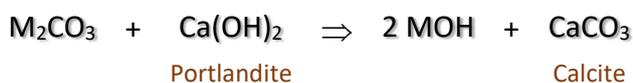
C'est une réaction proche de la réaction alcalis-silice. Elles diffèrent principalement par leurs vitesses : la réaction alcalis-silice est plus rapide.

## ③ Réaction Alcalis-Carbonate ou dédolomitisation (RAC)

Cette réaction est due à la décomposition de la dolomie (carbonate double de calcium et magnésium) (Ca, Mg), (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> et des calcaires dolomitiques CaCO<sub>3</sub> renfermant de la magnésie, en présence d'hydroxyde de calcium Ca(OH)<sub>2</sub>. Cette réaction donne la formation de calcite CaCO<sub>3</sub> et de brucite Mg(OH)<sub>2</sub>, minéraux stables et insolubles qui n'ont pas de propriétés liantes. La RAC cause la fissuration du béton. La réaction de dédolomitisation est la suivante (M = K ou Na) :



De plus, la solution alcaline serait constamment régénérée.



La RAC affaiblit la liaison pâte de ciment/granat, en provoquant des microfissures. De plus, il est admis que la dédolomitisation est susceptible de libérer des formes de silice réactives, dans ce cas la RAC se ramènerait par conséquent à une RAS.

## 2.5. Paramètres Influençant le Développement de la RAG :

### 2.5.1. Paramètres Externes :

#### 1- Teneur en alcalins (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>)

Les anciennes prescriptions recommandaient pour le ciment une teneur en éq. Na<sub>2</sub>O < 0,6%. Mais les nouvelles normes recommandent que le bilan total des alcalins de tous les ingrédients du béton, soit par exemple : éq. Na<sub>2</sub>O < 3 ou 4 kg/m<sup>3</sup> du béton (selon la norme). Les sources des alcalins dans un béton peuvent être (voir schéma) :

↳ **Internes au béton** : notamment le ciment, granulats pollués (extraits de la mer, non lavés...), dégradations en milieu basique des granulats, certaines additions minérales, adjuvants, eau de gâchage...

↳ **Externes (environnement de l'ouvrage)** : eaux salines, eau de mer, sels de déverglaçage ...

Des études ont montré que le début de la réaction est déclenché surtout par les alcalins du ciment, dont le % est fourni par les producteurs de ciment.



## 2- De l'eau ou un environnement humide

Des désordres importants dus à la RAG ont été constatés sur les structures en contact avec l'eau ou placées dans un environnement humide (humidité relative élevée 80 à 85%). Les sources d'eau ou d'humidité : contact direct avec l'eau (barrages, réservoirs), parties de rétention d'eau, parties arrosées, contact avec des terres humides et remontée capillaire (fondations)...

### 3- Influence des conditions d'environnement, des facteurs peuvent accélérer la RAG :

- Une température élevée a pour effet d'accélérer les expansions dues à la RAG à court terme. En laboratoire, une élévation de température de 10 à 40°C a donné une RAG 20 fois plus rapide.
- Les cycles de mouillage/séchage, gel/dégel accélèrent la détérioration du béton donc favorise la RAG.

## 2.5.2. Paramètres internes : formulation du béton

### 1- Rôle du ciment

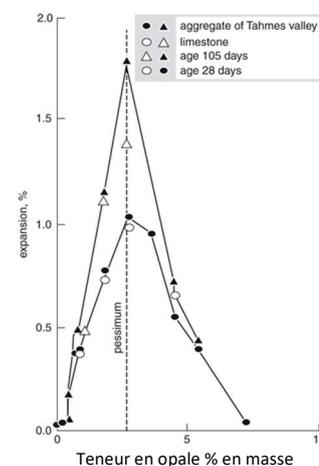
En fonction du type du ciment, le comportement vis-à-vis de la RAG peut différer. Le risque de réactivité est supérieur avec des ciments Portland, alors que les ciments avec ajouts sont d'excellents moyens pour réduire la RAG, car ils réduisent la teneur en alcalins actifs dans le béton. Dans certains cas, il est possible d'utiliser des granulats réactifs avec des ciments avec ajouts.

### 2- Rôle et qualification des Granulats

La RAG n'est possible qu'en présence d'espèces réactives en quantités suffisantes dans les granulats (Tableau 3). La sévérité des réactions dépend du degré de réactivité des granulats et de leur granularité (finesse). La réactivité de ces espèces est déterminée par des essais pétrographiques et minéralogiques. Suivant leur réactivité, les granulats sont classés en (selon FD P 18-542 et XP P 18-594) :

- **NR** : granulats **N**on **R**éactifs ou réactivité très faible (ne conduiront jamais à des désordres par RAG) ;
- **PR** : granulats **P**otentiellement **R**éactifs, ont une réactivité importante ;
- **PRP** : granulats **P**otentiellement **R**éactifs à effet **P**essimum, une très forte réactivité lorsque la teneur de la silice est dans un certain intervalle (voir Figure 8). Les effets expansifs ne se manifestent que lorsque l'on se rapproche de cette teneur dite pessimale. Lorsque la proportion de silice réactive est suffisamment éloignée de cette teneur, on n'aura pas de réactions expansives.

Figure 8 : Expansion en fonction du contenu en opale (PRP) après 200 jours de maturation du béton ; E/C= 0,41 [10]  
(l'expansion est maximale dans un certain intervalle de % d'opale)



### 3- Phase liquide interstitielle

La solution interstitielle contient des alcalins, traces de calcium... dont les teneurs dépendent du type du ciment, des adjuvants, des ajouts minéraux.... On doit distinguer entre les alcalins totaux dans un béton et les alcalins actifs (effectivement disponibles dans la solution interstitielle).

### 4- Additions Minérales

L'introduction d'additions minérales dans les bétons, telles que cendres volantes, laitier, fumée de silice, pouzzolane naturelle..., réduit ou annule l'expansion provoquée par l'alcali-réaction, si ces additions sont bien dosées, de compositions adéquates, et appropriées au granulat réactif [5].

### 5- Le rapport E/C

Un faible rapport E/C augmente la résistance tout en réduisant la perméabilité et la porosité du béton... D'un autre côté un faible E/C entraîne :

- Une concentration plus élevée de la solution interstitielle en alcalins ⇒ **facteur aggravant**
- Une faible porosité donc moins d'espace disponible pour l'expansion ⇒ **facteur aggravant**
- Une Faible perméabilité donc mobilité réduite des espèces dangereuses ⇒ **vitesse de réaction réduite**
- Résistance mécanique élevée ⇒ **résistance aux efforts d'expansion**

Si les deux premiers facteurs l'emportent ou les deux derniers, on peut avoir des effets différents dus à la réduction du rapport E/C. Mais généralement E/C élevé favorise le déclenchement de la RAG.

## 2.6. Réactivité des Granulats

Aux termes de la norme P 18-541 « granulats pour béton hydraulique », les granulats vis-à-vis de la réaction alcali-réaction peuvent être qualifiés comme :

- Granulats (**NR**) peuvent être utilisés sans précautions particulières,
- Granulats (**PR**) et (**PRP**) peuvent être utilisés dans la plupart des cas, dans des bétons moyennant des précautions prédéfinies par les recommandations.

Pour connaître la réactivité potentielle des granulats, en premier lieu on peut exploiter l'historique des constructions existantes réalisées avec le même granulat et exposées à des environnements similaires pour connaître le comportement de ce granulat vis-à-vis de la RAG. Ensuite, on doit procéder à des essais et analyse en laboratoire.

Pour la qualification des granulats vis-à-vis de la RAG, on peut procéder aux examens suivants :

- **Examen pétrographique** : cet examen, sur lames minces sous microscope optique, permet de reconnaître les phases minérales potentiellement réactives.

- **Méthodes chimiques** : tel que l'essai AFNOR P 18-584. Le granulat est broyé et immergé pendant 24 heures dans une solution de soude à 80°C. La solution est alors filtrée et analysée pour déterminer la teneur en silice dissoute et la chute d'alcalinité. Les résultats sont reportés sur un abaque, qui permettra de déterminer la réactivité du granulat.
- **La diffraction X**
- Des essais de réactivité par examen au **Microscope Electronique à Balayage** après traitement alcalin...

Ces analyses ne sont pas suffisantes pour connaître le comportement des granulats vis-à-vis de l'alcali-réaction du béton, et peuvent être complétées par des essais accélérés de gonflement sur mortier ou sur béton. Ces essais sont accélérés par l'alcanisation du milieu ou par une élévation de la température. Si le **gonflement obtenu** après essai < **gonflement seuil critique**, le granulat est **NR**. Ci-après quelques essais sur mortiers et bétons pour la caractérisation des granulats à l'égard de la RAG.

- **Essais sur mortier : expansion accélérée de barres de mortier**
  - **Stabilité dimensionnelle en milieu alcalin** : la méthode consiste à évaluer les possibilités d'expansion des granulats au contact des alcalins au moyen d'un essai de gonflement d'éprouvettes de mortier (25×25×285 mm) conservées à 38°C° et 100% d'humidité relative, avec une addition de soude dans l'eau de gâchage. Mesure du gonflement à différentes échéances : 1-2-3-4-6-8-10 et 12 mois.
  - **Stabilité dimensionnelle en milieu alcalin (essai dit Microbar)** : le granulat est broyé. Trois mortiers sont préparés à partir de ce granulat avec des rapports C/G = 2, 5, 10 et un rapport E/C = 0,3 ; avec un ajout de soude à l'eau de gâchage (barrettes : 1×1×4 cm). Cures successives dans la vapeur d'eau, puis à l'autoclave à 150°C dans une solution de potasse.
  - **Essai accéléré de gonflement en solution alcaline** : barres immergées dans une solution de soude (80°C) → mesure de l'expansion pendant deux semaines.
- **Essais sur béton : expansion d'éprouvettes de béton**  
Mesure de la stabilité dimensionnelle en milieu alcalin. Essai sur béton : permet d'évaluer le potentiel d'expansion des granulats au contact des alcalins par un essai de gonflement de prismes de béton conservés à 38°C et 100% d'humidité relative.

A titre indicatif, les caractéristiques mécaniques du béton atteint par la RAG sont affectées, comme le montre en exemple le Tableau 4. Notons aussi que les comportements des bétons non armés, bétons armés ou précontraints sont différents à l'égard de la RAG.

**Tableau 4 : Coef. de réduction des caractéristiques mécaniques d'un béton atteint de RAG / béton sain [6]**

Caractéristiques mécaniques du béton	Gonflement libre du béton (mm/m)				
	0,5	1,0	2,5	5,0	10,0
Résistance en compression (sur cylindre)	0,95	0,80	0,60	0,60	
Résistance en traction (par fendage)	0,85	0,75	0,55	0,40	
Module de déformation	1,00	0,70	0,50	0,35	0,30

## 2.7. Alkali-réaction : Démarche prévention

### 2.7.1. Recommandations pour la prévention contre les phénomènes de la RAG :

Pour prévenir la RAG il faut une évaluation du potentiel de réactivité alcaline des granulats avant leur utilisation dans le béton. On peut donc utiliser des granulats PR avec des mesures appropriées. Les recommandations relatives à la prévention contre les phénomènes de la RAG font l'objet d'un fascicule de documentation FD P 18-464. Le Principe :

**1** – Déterminer le niveau de prévention à atteindre (Tableau III) en fonction de :

- a) La catégorie de l'ouvrage : importance de l'ouvrage (Tableau I).
- b) La classe d'exposition liée au risque de RAG, en fonction des actions dues à l'environnement (Tableau II).

**2** – Appliquer la (ou les) solution(s) possible(s) au regard des précautions liées au niveau de prévention retenu. Ensuite, à vérifier que la formulation prévue pour le béton est satisfaisante.

**a) Catégories de l'ouvrage** : trois catégories représentatives du niveau de risque vis-à-vis de l'alcali-réaction pour un ouvrage donné (ou des parties d'ouvrages).

**Tableau I**

Catégorie	Exemples d'ouvrages de de parties d'ouvrages
I :	Risques d'apparition des désordres faibles ou acceptables Éléments non porteurs
II :	Risques d'apparition des désordres peu tolérables La plupart des ouvrages de génie civil
III :	Risques d'apparition des désordres inacceptables Ponts ou ouvrages exceptionnels

**b) Classe d'exposition** : 3 classes d'exposition représentatives des conditions environnementales jouant un rôle important dans l'initiation et le développement de l'alcali-réaction. Ce classement tient compte des facteurs susceptibles d'initier l'alcali-réaction.

**Tableau II**

Classe	Environnement
Classe XAR1	Environnement sec ou peu humide (hygrométrie $\leq 80\%$ )*
Classe XAR2	Environnement avec hygrométrie $> 80\%$ sans fondants salins ou en contact avec l'eau hors environnement marin
Classe XAR3	Environnement avec hygrométrie $> 80\%$ et avec fondants salins ou en environnement marin

\* : certaines pièces de forte épaisseur peuvent être classées en XAR2 selon leur humidité interne (fonction de l'exposition)

**c) Niveau de prévention** : le niveau de prévention est déterminé à partir des tableaux I et II (catégorie d'ouvrage et de sa classe d'exposition).

Tableau III

Catégorie d'ouvrage	Classe d'exposition		
	XAR1	XAR2	XAR3
I :	A	A	A
II :	A	B	B
III :	C	C	C

**Niveau A** : pas de recommandations particulières : *règles habituelles de construction*.

**Niveau B** : formulation de béton spécifique à l'adaptation de l'utilisation de granulats PR selon les recommandations suivantes :

- Examen de la réactivité des granulats
- Établissement du bilan total des alcalins ( $< 3,5 \text{ kg/m}^3$ ) : utilisation de ciment à faible teneur en alcalins.
- Vérification de la satisfaction du béton à un critère de performance par essai de gonflement, dit « essai de performance du béton » (NF P 18-454).
- Additions minérales (pouzzolane...) en proportions suffisantes (on peut utiliser des granulats PR avec des précautions pour réduire le bilan total en alcalins avec étude de la formulation de bétons compatibles, sur des bases expérimentales).

**Niveau C** : les granulats doivent être (NR). On peut utiliser les granulats (PRP) : conditions particulières respectées, les granulats (PR) : étude approfondie de la formulation.

### 2.7.2. Formulation d'un béton durable :

Selon ce schéma, deux solutions sont envisageables :

- On dispose de granulats NR et aucune précaution spéciale n'est à prendre, autre que les règles de l'art,
- Sinon, on doit rechercher une formulation adéquate pour le béton.

On montre qu'une formulation de béton est acceptable, soit sur la base d'un critère analytique, soit d'un critère de performance :

- Analytique : calculer à partir de la composition chimique et du dosage des constituants du béton, le taux d'alcalins actifs dans le béton, qui doit être inférieur à une valeur limite.
- Performance : vérification par essais sur béton de la stabilité dimensionnelle en milieu alcalin, gonflement du béton demeure inférieur à une limite fixée.

### 2.8. Désordres dans les ouvrages en béton dus à la RAG :

Les désordres : au niveau **macroscopique** (dégâts visuels) et au niveau **microscopique** (à identifier par analyses microscopiques sur lames minces...).

Les désordres dus à la RAG peuvent toucher le **matériau** (béton) : fissuration + décollement interface pâte de ciment/granulat + chute des performances mécaniques... ou la **structure** : gonflement.

### 2.8.1. Désordres visuels observables sur les ouvrages :

Les différents types de désordres consécutifs à la RAG se traduisent par une déformation de la structure et par une fissuration généralisée. Les manifestations externes se signalent par les symptômes suivants :

- 1) **Fissuration en faïençage** : maillage de 20 à 50 mm. C'est la dégradation la plus fréquente. La profondeur des fissures (quelques cm) est proportionnelle au développement de la RAG. Les fissures sont souvent soulignées par des traces d'humidité et d'exsudations de gels.
- 2) **Fissuration orientée suivant le tracé du ferrailage** : concerne le béton armé, fissures avec coulées de rouille.
- 3) **Petits cratères** : si on a des granulats réactifs à proximité du parement, expulsion de pastille conique de mortier.
- 4) **Efflorescence et exsudation, parements tachés** : exsudation du gel à travers les fissures, de couleur blanche ou translucide, ou une coloration sombre le long des fissures donnant un parement tacheté.
- 5) **Gonflement de la structure** : un gonflement global qui se fait avec une vitesse  $> 3\text{mm/m}$  et qui peut engendrer une pression 3-10 MPa dans le béton. Les conséquences de ce gonflement, Barrages : empêchement du fonctionnement normal des équipements. Ponts : fermeture des joints de dilatation, flèche importante... Jusqu'à 0,5 à 0,6 mm/m, l'expansion se manifeste par des déformations sans détériorations ni fissurations visibles du béton.

Remarque :

- Un ferrailage bien conçu permet de réduire l'alcali-réaction ( $\text{Contrainte}_{\text{expansion}} < R_{\text{traction}}$ ).
- Un béton atteint par la RAG peut extérieurement ressembler à un béton endommagé par le gel, attaque par les sulfates ou encore par des fissurations de retrait ..., par conséquent, la simple observation visuelle n'est pas suffisante pour conclure à l'existence de l'alcali-réaction.
- Les ouvrages de masse (barrages) sont plus vulnérables à la RAG, car le béton de masse met plus de temps pour dissiper la chaleur d'hydratation du ciment, ce qui initie plus rapidement les réactions (RAG). De plus, les gradients de température créent des fissures favorisant la pénétration de l'eau.

### 2.8.2. Observations microscopiques des désordres :

- 1) **Microfissuration du béton** : la RAG crée progressivement un réseau de microfissures dans le béton, qui avec le temps se propagent dans toutes les directions (Figure 9).

La microfissuration peut être étudiée à différentes échelles, visuellement ou au stéréomicroscope sur plaques polies, au microscope optique sur lames minces ou fragments polis, au MEB sur échantillons polis ou par observation de répliques. Il y a des techniques qui permettent d'améliorer cette observation par imprégnation de colorants, de résines...

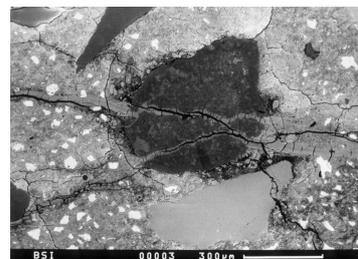


Figure 9 : Manifestation microscopique de la RAG  
(www.sika.fr)

- 2) Gels siliceux : peuvent s'observer par microscopie
- 3) Auréoles foncées à la périphérie des granulats réactifs : surtout dans le cas d'alcalis-silice.
- 4) Décohésion de l'interface pâte/granulats : pour granulats pour lesquels les réactions se font principalement à l'interface avec la pâte (auréole foncée).

### 2.8.3. Diagnostic Dépistage et Suivi de l'Alcali-Réaction

#### 2.8.3.1. Diagnostic et Dépistage :

Le dépistage se fait en deux étapes :

- Reconnaissance visuelle des symptômes.
- Analyse de prélèvements d'échantillons de béton, pétrographiques et minéralogiques.

D'une façon générale, le diagnostic fait appel aussi :

- Collecte des données relatives à l'historique de l'ouvrage et aux compositions de béton ;
- A une inspection sur site, incluant un relevé de désordres et si nécessaire :
  - Mesures de déformation, des relevés de fissures ...
  - Essais non destructifs : mesure de la vitesse du son (vérification de l'homogénéité et de la qualité du béton), mesure de la carbonatation...
  - Collecte d'échantillons représentatifs pour examens en laboratoire.
- Suivi des déformations par instrumentation des ouvrages (ouvrages importants).

Les méthodes d'examen et d'analyse en laboratoire :

#### 1) Recherche de présence d'espèces réactives dans les granulats :

Techniques de caractérisation pétrographique sur lames minces de béton par étude au microscope polarisant, complétées si c'est nécessaire par différents moyens d'analyse chimique et minéralogique. Etude de la réactivité par examen au MEB de sections polies de béton traités à 80°C dans une solution de soude normale saturée en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  peut compléter la confirmation de la réactivité potentielle.

#### 2) Teneur en alcalins et la reconstitution de la composition du béton :

Fait appel à des analyses chimique et minéralogique des bétons.

#### 3) Identification des composés pathogènes produits par l'alcali-réaction :

L'identification des gels de silicates calco-alcalins produits de l'alcali-réaction fait appel à des techniques de microscopie optique ou de microscopie électronique à balayage, sur sections polies ou sur lames minces.

#### 4) Quantification de la microfissuration du béton :

On peut mettre en évidence le réseau de microfissuration d'un béton et son orientation par imprégnation par une résine fluorescente et observation en éclairage ultraviolet sous microscopie

stéréoscopique. Les paramètres mesurés : longueur des fissures, densité par unité de surface, orientation et pourcentage....

#### 5) Estimation de la capacité de gonflement du béton :

La capacité de gonflement peut être vérifiée par un essai d'expansion résiduelle qui consiste à suivre le gonflement d'une carotte de béton conservée à 38°C à saturation d'humidité durant une période d'au moins six mois.

#### 6) Essais mécaniques.

##### 2.8.3.2. Surveillance :

On doit surveiller les ouvrages atteints de RAG par des contrôles réguliers :

- Suivi de la fissuration : au moyen du fissuromètre, par extensométrie...
- Suivi de la déformation globale de l'ouvrage : par mesures topographiques par exemple.

##### 2.8.4. Moyens de Réparation :

Il n'existe pas de solutions définitives pour réparer les structures atteintes de RAG. Les premières tentatives consistaient à injecter les fissures : inefficace : réouverture d'autres fissures (Figure 10). Les solutions appliquées actuellement :

- Renforcement des ouvrages par addition de précontrainte externe (ponts, barrages...).
- Libération des contraintes en sciant tout ou en partie la structure, libérant ainsi les contraintes. Des techniques lourdes appliquées à des ouvrages massifs comme les barrages.
- Solution au stade de recherche : tentatives de ralentissement de la réaction par blocage, élimination ou substitution des alcalins.

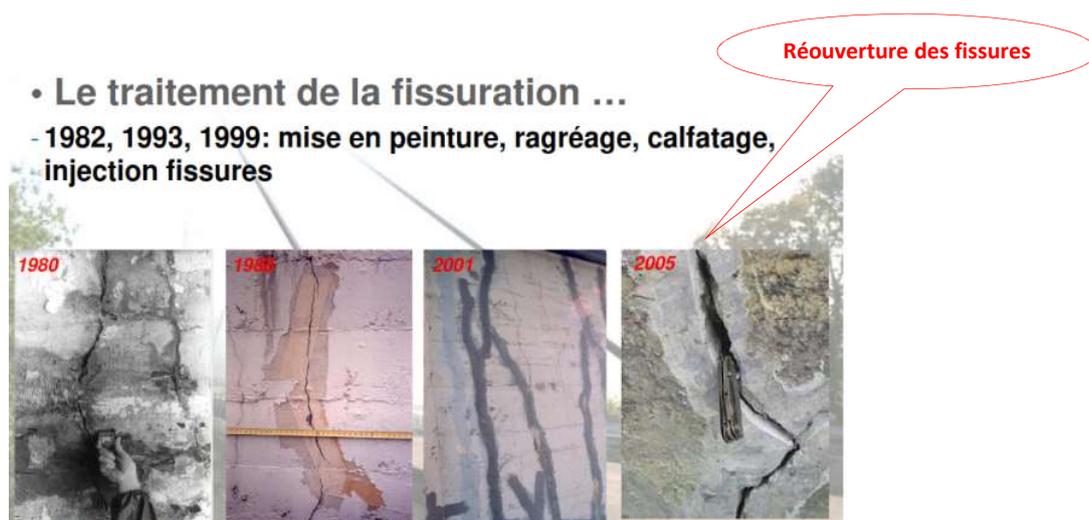


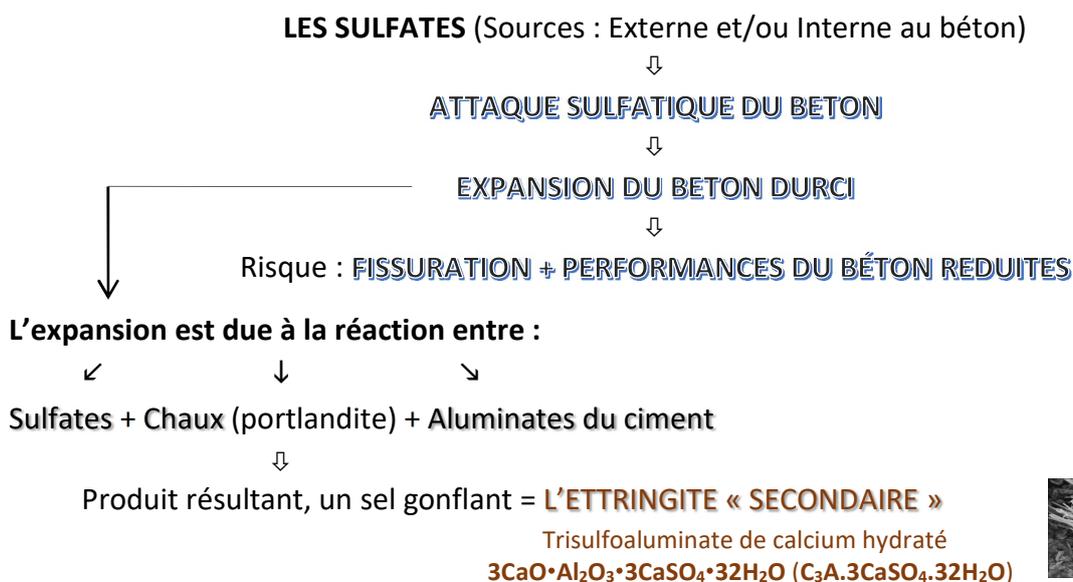
Figure 10 : Echec de réparation de la RAG

([www.cotita.fr](http://www.cotita.fr))

## 3. ATTAQUE SULFATIQUE DU BETON

### 3.1. Introduction

Les sulfates représentent un risque majeur d'agression chimique pour le béton. L'attaque du béton par des sulfates provoque l'expansion du béton. Selon l'origine des sulfates, on peut avoir des attaques sulfatiques **internes** ou **externes** (voir Figure 11).



On distingue deux formes d'ettringite :

- **Ettringite Primaire** : bien cristallisée, se forme aux premiers âges de l'hydratation au moment de la prise du ciment donc en phase fluide du béton. Cette ettringite ne constitue aucun danger pour le béton.
- **Ettringite Secondaire** : mal cristallisée, se produit lorsque le béton est déjà durci, cette ettringite peut alors provoquer un gonflement qui peut éventuellement causer la fissuration et la dégradation du béton. Notons, qu'à basse température (<10°C) l'attaque sulfatique donne lieu à ce qu'on appelle de la **Thaumasite** ( $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ ), qui mène surtout à la transformation du béton en une sorte de masse ramollie [11].



Dégâts dus à une attaque sulfatique externe (béton de tunnel)

(Liu, Zanqun, et al. "Physical sulfate attack on concrete lining—A field case analysis." *Case studies in construction materials* 6 (2017): 206-212).



Dalle en béton fissurée suite à une formation retardée d'ettringite [11]

**Figure 11 : Effet de l'attaque sulfatique (externe et interne) sur le béton**

## 3.2. Dégradations dues aux attaques sulfatiques dans le béton

Les attaques par des sulfates produisent les dégradations suivantes [11] :

Efflorescences et de colorations blanchâtres ou jaune de la surface.



fissuration réseau provoquant des éclatements du béton et décollements de la surface.



Fissures dans la masse du béton et décollement entre la pâte de ciment et le granulat.



Destruction complète du béton



## 3.3. Sources des produits Sulfatés

**Sources des Sulfates :**

- ⇒ Sources Externes    Attaque sulfatique externe
- ⇒ Sources Internes    Attaque sulfatique interne

La différence entre les attaques sulfatiques externes et internes : l'attaque externe commence par la surface puis pénètre peu à peu vers le cœur (en fonction de la perméabilité du béton).

### 3.2.1. Sources externes des produits sulfatés

- Eaux souterraines sulfatées (ou eaux séléniteuses) se chargent au contact des sols sulfatés ou contaminées.
- Sols riches en sulfates, sols alluviaux ou argileux qui peuvent contenir des pyrites qui s'oxydent en sulfates au contact de l'air et de l'humidité. Les sulfates sous forme de sels solides n'attaquent pas le béton, il faut qu'ils soient en solution pour qu'ils réagissent avec la pâte du ciment hydratée.

Remarque : dans les sols et eaux souterraines on retrouve le  $MgSO_4$ ,  $K_2SO_4$ ,  $Na_2SO_4$ ,  $CaSO_4$  ; mais c'est surtout les trois premiers types de sulfates, qui se trouvent en concentrations élevées plutôt que le  $CaSO_4$ , car ayant les solubilités les plus élevées (Tableau 5).

- Milieu marin.
- Les attaques bactériologiques qui se produisent dans les structures en contact avec des eaux usées. Lors de longs séjours des eaux usées, l'activité bactérienne entraîne la formation d'hydrogène sulfuré ( $H_2S$ ) gazeux, qui se transforme en acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ), réagissant avec la portlandite ensuite avec les aluminates du ciment, pour former de l'ettringite secondaire [5].

### 3.2.2. Sources internes des sulfates

**Constituants du béton :**

- Granulats : granulats riches en pyrites ou sulfures de fer mal cristallisés (qui en s'oxydant donnent des sulfates ferreux qui attaquent la portlandite), granulats pollués, granulats de nature minéralogique sulfatique...
- Eau de gâchage.
- Excès de gypse dans le ciment (la teneur du gypse dans un ciment courant ~ 5%).

### Réactions sulfatiques différées (retardées) :

Se produit lors d'une élévation de la température du béton (chaleur d'hydratation, traitement thermique), dans ce cas la réaction sera incomplète entre le C<sub>3</sub>A et le gypse. Cette réaction se produit à long terme quand le béton est durci : formation d'ettringite secondaire.

## 3.5. Attaque sulfatique d'origine externe

### 3.5.1. Mécanisme de base de dégradation

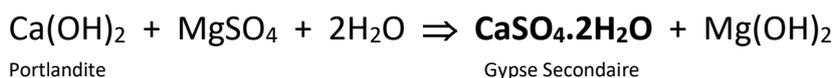
- Les étapes du mécanisme de l'attaque sulfatique :
  - Mise en contact : surface béton/solution agressive
  - Pénétration dans le béton des anions  $SO_4^{2-}$  et des cations associés ( $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $NH_4^+$ ...)
  - Substitution ( $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $NH_4^+$ ...)  $\rightarrow$   $Ca^{2+}$  (de la pâte de ciment)  $\Rightarrow$  formation de gypse
  - Réaction : ions sulfates avec aluminates du béton et formation d'ettringite. La cristallisation de l'ettringite engendre des contraintes, si elles dépassent  $R_t$  du béton  $\rightarrow$  Fissuration du béton  $\rightarrow$  la perméabilité du béton augmente  $\rightarrow$  accentuation de l'attaque sulfatique.
- Schématiquement, la formation de l'ettringite se fait en deux étapes :

① **Formation du Gypse dit Secondaire** : les sulfates attaquent la portlandite pour former du gypse secondaire par substitution ionique, exemple :

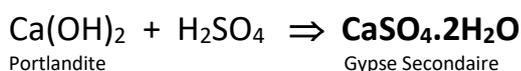
- Les sulfates d'alcalins (sulfate de sodium  $Na_2SO_4$  ou sulfate de potassium  $K_2SO_4$ ) :



- Le sulfate de magnésium  $MgSO_4$  :



- L'acide sulfurique  $H_2SO_4$  :



② **Réaction entre le gypse secondaire et les aluminates de calcium du ciment** :

- $\Rightarrow$  Soit à partir de reliquats de C<sub>3</sub>A anhydre (C<sub>3</sub>A qui n'a pas réagi)



- $\Rightarrow$  Soit à partir d'aluminates hydratés, dont il existe plusieurs formes, exemple :





- La formation de l'ettringite nécessite un apport important d'eau, car sa cristallisation demande 32 molécules d'eau. Donc ce type de dégradation se rencontre dans les environnements humides.
- Donc les produits les plus sensibles à l'attaque sulfatique sont les aluminates et la portlandite.
- L'importance de l'expansion du béton due à l'ettringite dépend de la solution interstitielle, particulièrement la concentration en portlandite.
- La détérioration du béton par les sulfates → mécanismes physico-chimiques nuisibles :
  - Expansion par formation d'ettringite secondaire ;
  - Perte des propriétés liantes des C-S-H et consommation de la portlandite et d'aluminates de calcium : altération de certains hydrates.
  - Perte de masse du béton en surface.
- L'effet destructeur de l'attaque sulfatique dépend surtout de :
  - De la concentration des ions sulfatés  $\text{SO}_4^{2-}$
  - Les cations associés. Ainsi les sulfates les plus agressifs sont : les sulfates de Magnésium qui est très fortement agressif, d'ammonium, de calcium et de sodium (voir Figure 12). Généralement la nocivité d'un sulfate est en fonction de sa solubilité (voir Tableau 5).

Tableau 5 : Solubilité des différents sulfates dans l'eau à 20°C [5]

Sulfate	$\text{K}_2\text{SO}_4$	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4$	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Solubilité (g/l)	111	58	194	440	260	2,1	1,2

Remarque : le magnésium est très agressif parce qu'il peut avoir deux actions néfastes, formation de l'ettringite, et réaction du Mg avec le C-S-H et formation de M-S-H sans propriétés liantes.

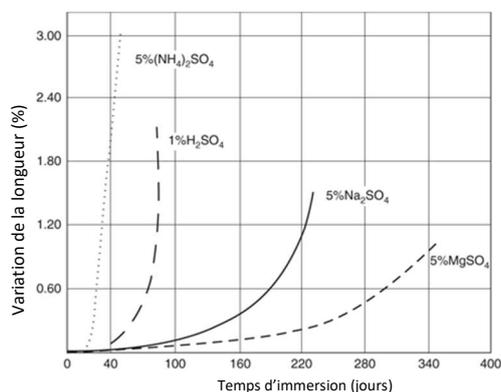


Figure 12 : Expansion linéaire de cubes de mortier immergés dans diverses solutions de sulfate [10]

### 3.5.2. Paramètres contrôlant la résistance du béton aux sulfates

Conséquences de l'attaque sulfatique du béton : expansion destructrice – fissuration – perte de masse - chute de résistance de béton (perte de cohésion de la pâte du ciment hydratée)...

La conception de bétons durables dans un environnement sulfatique dépend principalement de la qualité du béton et du choix du ciment. D'une manière générale, pour résister aux attaques sulfatiques, les bétons doivent être :

- Compacts et peu perméables pour limiter la « capacité de transfert » du béton et réduire ainsi l'accès des sulfates aux aluminates du béton.
- Fabriqués avec des ciments résistants aux sulfates.

➔ En détail, les facteurs généraux qui contrôlent la résistance sulfatique du béton sont les suivants :

① **Limiter la capacité de transfert du béton** : en réduisant la perméabilité du béton

Si Porosité  $\searrow$   $\Rightarrow$  Compacité  $\nearrow$  + Perméabilité  $\searrow$   $\Rightarrow$  Résistance aux attaques sulfatiques  $\nearrow$

La capacité de transfert réduit si le rapport E/C est limité  $\Rightarrow$  Résistance à la pénétration des sulfates  $\nearrow$ . La Figure 13 montre l'influence du rapport E/C sur l'expansion et la dégradation du béton.

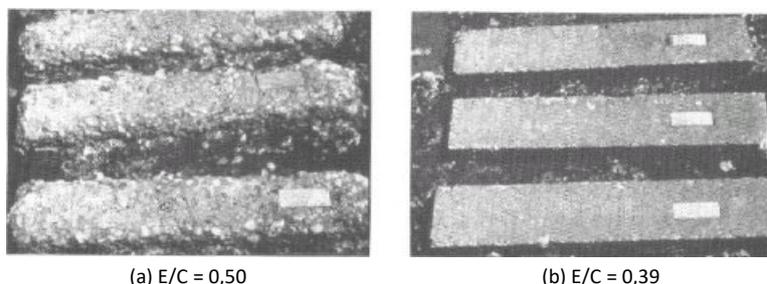


Figure 13 : Eprouvettes de béton dégradées après 5 ans en contact avec des sols riches en sulfates [1]

② **Augmenter le Dosage en Ciment** :

Dosage en ciment  $\nearrow$   $\Rightarrow$  Bétons compacts et moins perméables  
 $\Rightarrow$  Pénétration des sulfates  $\searrow$   $\Rightarrow$  Résistance aux attaques sulfatiques  $\nearrow$

Le Tableau 6 (norme NF P18-011) donne les recommandations pour le rapport E/C et le dosage en ciment C, en fonction du niveau d'agressivité (D : dimension maximale des granulats en mm) :

Tableau 6 : Composition des bétons en fonction du niveau d'agressivité, selon le fascicule P 18-011

Niveau d'agressivité		A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub> [*]
AFNOR P 18-011	E/C	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,50$
	Dosage en Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	$550/\sqrt[3]{D}$	$700/\sqrt[3]{D}$	$700/\sqrt[3]{D}$

[\*] : Protection supplémentaire indispensable pour le béton

③ **Teneur en aluminat tricalcique du C<sub>3</sub>A du Ciment** :

Il existe un lien direct entre le gonflement produit par l'attaque sulfatique et %C<sub>3</sub>A du ciment. La vitesse de dégradation du béton augmente avec le %C<sub>3</sub>A du ciment. Béton résistant aux attaques sulfatiques : fabriqué avec un ciment faible en %C<sub>3</sub>A.

Pour la résistance sulfatiques, les normes spécifient deux limites qui doivent être satisfaites simultanément pour les ciments :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_3A \leq 5\% \\ C_4AF + 2C_3A < 20\% \end{array} \right. \quad (+ \text{ Teneur réduite en } \%SO_3^{2-} \text{ du ciment})$$

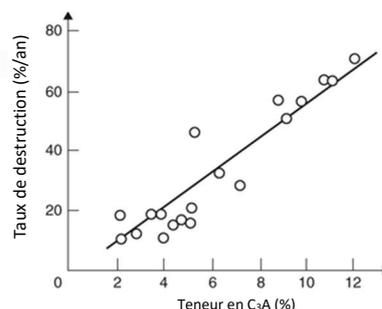


Figure 14 : Effet de la teneur en C<sub>3</sub>A du ciment sur le taux de destruction du béton [10]

Le Tableau 7 donne les recommandations pour le choix du ciment, pour milieux contenant des sulfates : sols ou solutions, à l'exclusion de l'eau de mer.

Tableau 7 : Recommandations pour le choix du ciment pour milieux contenant des sulfates (FD P 18-011)

Classes d'exposition	Choix du ciment
XA1	Pas de recommandations particulières
XA2	Ciment conforme à la norme NF P 15-317 (PM) ou NF P 15-319 (ES)
XA3	Ciment conforme à la norme NF P 15-319 (ES)

#### ④ Les additions Minérales [12] :

- Des études ont montré que l'addition surtout de laitier, de cendres volantes, de pouzzolane naturelle, de fumée de silice améliorent la résistance du béton aux sulfates.
- Les effets bénéfiques des ajouts sur la résistance sulfatique (laitier, pouzzolane, cendres volantes, fumée de silice) sont notamment : réduction de la teneur en chaux et en C<sub>3</sub>A, compacité élevée, consommation de la portlandite...
- Dans l'attaque sulfatique la pouzzolane a double effet : elle réagit avec le Ca(OH)<sub>2</sub> → plus disponible pour réagir avec les sulfates → moins de Ca(OH)<sub>2</sub> dans le ciment.

### 3.5.3. Essais de Résistance du béton aux sulfates

La résistance du béton aux sulfates peut être évaluée en laboratoire en conservant des éprouvettes en mortier dans une solution de sulfate de sodium ou de magnésium ou dans un mélange des deux, + :

→ Cycles alternés de mouillage/séchage

→ Évaluation des effets de l'expansion : perte de résistance, variation du module d'élasticité dynamique, allongement, perte de masse + constatation visuelle des dégradations.

Cet essai peut permettre aussi la détermination du sulfate en excès dans un ciment Portland.



Figure 15 : Dégradation d'éprouvettes de béton soumises à un test de résistance aux sulfates [11]

### 3.6. Réaction sulfatique interne (RSI)

#### 3.6.1. Définition

Une réaction sulfatique interne (RSI) survient lorsque l'origine des ions sulfatés est interne au béton, i.e. ils sont déjà présents dans les constituants du béton (ciment, granulats). Cette attaque intervient surtout dans des bétons soumis à un traitement thermique (préfabrication) ou dans des éléments massifs de béton (épaisseur > 80 cm).

Sous des températures élevées pendant le durcissement du béton (> 60° C), il se forme surtout des monosulfates et carbonates au lieu de l'ettringite. En présence d'eau (ou d'humidité), ces monophases peuvent réagir avec les sulfates disponibles le béton et former de l'ettringite secondaire (le béton est déjà durci) : détérioration interne du matériau béton. Description des désordres : fissuration multidirectionnelle à maille assez large (10-30 cm) désordres assez similaires à la RAG.

Trois conditions doivent être réunies simultanément pour la manifestation de la RSI.

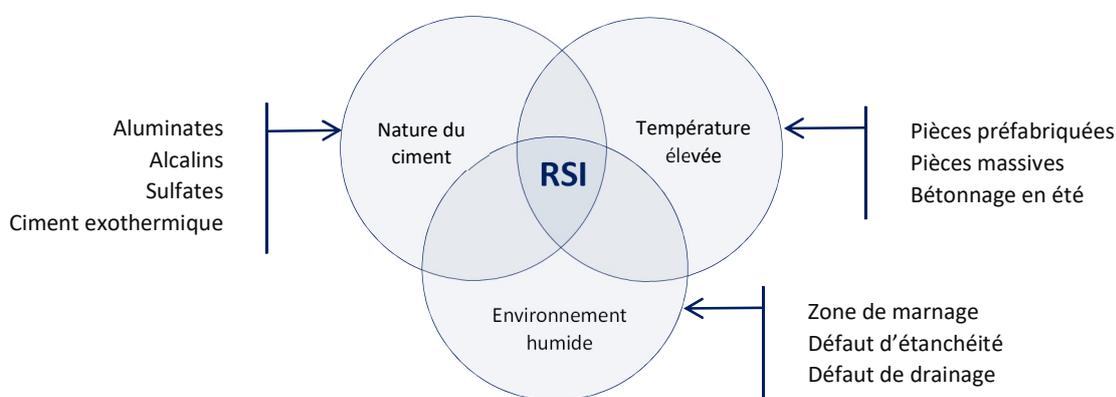


Figure 16 : Diagramme des conditions requises pour l'apparition de la RAG

#### 3.6.2. Prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne (RSI)

Le guide « Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne » propose des dispositions pour limiter les risques potentiels de RSI :

- Au niveau de la conception et du dimensionnement des ouvrages et de la formulation,
- Lors de la fabrication et du transport du béton,
- Au cours de la mise en œuvre : il faut éviter le coulage des ouvrages en périodes de forte chaleur ou de mettre en œuvre tous les moyens nécessaires pour réduire la température du béton.

Objectifs des dispositions : - D'éviter les contacts prolongés du béton avec l'eau,  
- De limiter la température atteinte au cœur du béton.

#### Principe de la démarche préventive :

1 – Déterminer le niveau de prévention à atteindre (Tableau III) en fonction de :

- a) Catégorie de l'ouvrage (ou la partie d'ouvrage) : importance de l'ouvrage (Tableau I).
- b) Classe d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement (Tableau II).

2 – Appliquer la (ou les) solution(s) possible(s) au regard des précautions liées au niveau de prévention retenu. Ensuite, à vérifier que la formulation prévue pour le béton est satisfaisante.

**Tableau I : Catégorie d'ouvrage**

Catégorie d'ouvrage	Niveau de conséquences d'apparition des désordres	Exemples d'ouvrage ou de parties d'ouvrage
I	Faibles ou acceptables	Ouvrage en béton de classe de résistance < C16/20 Éléments non porteurs de bâtiment
II	Peu tolérables	Éléments porteurs de la plupart des bâtiments et ouvrages de Génie civil
III	Inacceptables ou quasi inacceptables	Bâtiments pour réacteurs de centrales nucléaires Barrages, tunnels Ponts et viaducs exceptionnels

**Tableau II : Classes d'exposition spécifiques à la RSI**

Classe d'exposition	Description de l'environnement	Exemples informatifs
XH1	Sec ou humidité modérée	Partie d'ouvrage en béton située à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est faible ou moyen Partie d'ouvrage en béton située à l'extérieur et abritée de la pluie
XH2	Alternance d'humidité et de séchage Humidité élevée	Partie d'ouvrage en béton située à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est élevé Partie d'ouvrage en béton non protégée par un revêtement et soumis aux intempéries
XH3	En contact avec l'eau Immersion permanente Stagnation d'eau à la surface Zone de marnage	Partie d'ouvrage en béton submergée en permanence dans l'eau Éléments de structure marine Partie d'ouvrage en béton régulièrement exposée à des projections d'eau

**Tableau III : Niveaux de prévention**

Catégorie d'ouvrage	Classe d'exposition		
	XH1	XH2	XH3
I (Risque faible ou acceptable)	As	As	As
II (Risque peu tolérable)	As	Bs	Cs
III (Risque inacceptable)	As	Cs	Ds

**Précautions à appliquer :** limitation de la température maximale susceptible d'être atteinte au cœur du béton  $T_{max}$ .  
( $T_{limite}$  est la température limite du béton ne pouvant être dépassée)

Niveau de prévention	Température maximale du béton ( $T_{max}$ )	Température limite du béton ( $T_{limite}$ )	Conditions à respecter si température comprise entre $T_{max}$ et $T_{limite}$
As	85°C	-	-
Bs	75°C	85°C	Maîtrise du traitement thermique, ou ciment adapté, ou Essai de performance (*)
Cs	70°C	80°C	Maîtrise du traitement thermique, ou Ciment adapté, ou Essai de performance (*)
Ds	65°C	75°C	Ciment adapté Validation de la formulation par un laboratoire indépendant expert en RSI

(\*) L'essai de performance accéléré sur béton (LPC n° 66), développé par le LCPC, évalue la durabilité du couple « Formule de béton - Echauffement du béton », caractérise le risque de gonflement d'un béton vis-à-vis de la RSI et valide une formulation de béton.

## 4. ATTAQUE PAR L'EAU DE MER

### 4.1. Introduction

Le développement de constructions telles que les plates-formes en mer, a mis en évidence l'intérêt de maîtriser la durabilité du béton dans le milieu marin. La conception de ces structures dans un tel milieu doit tenir compte de la dégradation du béton et la corrosion des aciers d'armatures à la fois.

### 4.2. L'Eau de Mer

- L'eau de mer est un des milieux les plus agressifs qui soient. L'attaque du béton et des aciers est le résultat de réactions des éléments nocifs de l'eau de mer et les constituants du béton ces réactions sont plus ou moins simultanées.
- Les importants éléments nocifs, pour le béton armé, que contient l'eau de mer sont surtout : Les chlorures, le magnésium, les sulfates de magnésium, de calcium et de potassium.... L'eau de mer contient aussi un peu de CO<sub>2</sub> dissous.
- L'eau de mer est une solution légèrement basique (pH varie entre 7,5 et 8,4), les teneurs en sels de quelques mers et océans sont données au Tableau 8 (à titre indicatif).

Tableau 8 : Composition de différentes Eaux de Mer [13]

Salinité (g/l)		Composition moyenne des eaux de l'Océan Atlantique	
Mer Baltique	3 à 8	Salinité : 33.5 à 37.4 g/l	
Mer Noire	18.3 à 22.2	Pourcentage des différents ions :	
Mer Blanche	26.0 à 29.7	Cl-	55.3
Océan Atlantique	33.5 à 37.4	Br-	0.2
Océan Pacifique	34.5 à 36.9	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	7.7
Océan Indien	35.5 à 36.7	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0.2
Mer Méditerranée	38.4 à 41.2	Na <sup>+</sup>	30.6
Mer Rouge	50.8 à 58.5	K <sup>+</sup>	1.1
Lac Ontario	72	Ca <sup>2+</sup>	1.2
Mer Caspienne	126.7 à 185	Mg <sup>2+</sup>	3.7
Mer Morte	192.2 à 260		
Lac Elton	265		

- L'agressivité de l'eau de Mer peut affecter :

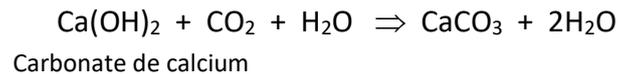
BÉTON	CAUSES :	ACIERS	CAUSES :
→ Perte des propriétés liantes	→ Magnésium		
→ Formation d'ettringite	→ Sulfates		
→ Carbonatation du béton	→ Gaz carbonique (CO <sub>2</sub> )	→ Corrosion	→ Attaque par les Chlorures
→ Abrasion, fissuration...	→ vagues, sable, gel/dégel, mouillage/séchage...		→ Carbonatation du béton

### 4.3. Mécanismes d'attaques du béton en milieu marin

Le processus chimique d'attaque des bétons par l'eau de mer résulte de plusieurs réactions plus ou moins simultanées et interdépendantes, faisant appel à différents mécanismes : dissolution, lixiviation, réaction d'échange.... Les principales réactions mises en jeu peuvent se décomposer de la manière suivante :

- **Action du Dioxyde de Carbone (CO<sub>2</sub>) (Carbonatation)**

Il réagit sur la portlandite selon la réaction suivante :



Le carbonate de calcium précipite à la surface du béton sous forme d'aragonite et de calcite qui colmate les pores.

- **Action du Sulfate de Magnésium : on distingue deux actions :**

1- Substitution des ions Ca<sup>2+</sup> par les ions Mg<sup>2+</sup> (Ca<sup>2+</sup> de la portlandite ou C-S-H) pour la formation en premier lieu d'un gypse secondaire, et en deuxième lieu la formation d'ettringite par réaction du gypse secondaire avec les aluminates de calcium → Résultat : expansion.

2- Substitution des ions Ca<sup>2+</sup> par Mg<sup>2+</sup> (Ca<sup>2+</sup> dans les C-S-H) → formation de (M-S-H) sans propriétés liantes et perte des propriétés liantes des (C-S-H).

- **Action des Chlorures : on distingue deux effets nocifs des chlorures :**

1<sup>er</sup> effet : sur les aciers des armatures du béton armé : la corrosion des aciers.

2<sup>eme</sup> effet : sur le béton. L'action des chlorures sur le béton peut causer l'altération du liant lorsque les chlorures sont présents en proportions élevées.

On peut résumer l'action des chlorures sur le béton comme suit :

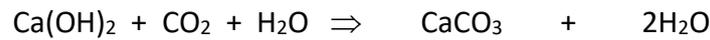
- Une partie des chlorures est fixée par le C-S-H.
- Une partie se combine au (C<sub>3</sub>A) sous forme des monochloroaluminates de calcium (C<sub>3</sub>A.Ca Cl<sub>2</sub>.10H<sub>2</sub>O), qui est instable, et qui donne en présence de sulfates : l'ettringite (C<sub>3</sub>A.3CaSO<sub>4</sub>.32H<sub>2</sub>O), qui peut causer un gonflement et éventuellement la fissuration du béton. Remarque : le C<sub>3</sub>A.Ca Cl<sub>2</sub>.10H<sub>2</sub>O est aussi appelé sel de Friedel.
- Le chlorure de magnésium réagit également avec la portlandite, suivant la réaction d'échange suivante : **MgCl<sub>2</sub> + Ca(OH)<sub>2</sub> ⇒ CaCl<sub>2</sub> + Mg(OH)<sub>2</sub>**  

Portlandite
Brucite

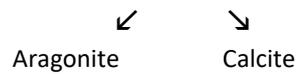
La brucite est insoluble et se dépose à la surface du béton, tandis que le chlorure de calcium réagit avec les aluminates pour former du monochloroaluminate.

Toutes ces actions d'attaque de l'eau de mer sont aussi résumées dans le Tableau 9.

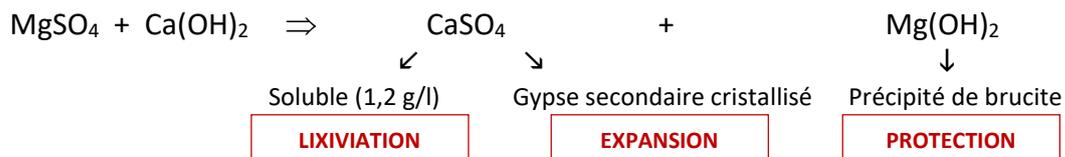
Tableau 9 : Détérioration du béton par l'eau de Mer [5]

- **Action du Dioxyde de Carbone (CO<sub>2</sub>) :**

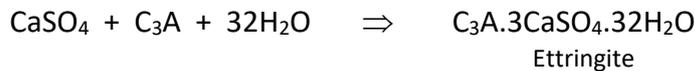
Précipité :



PROTECTION

- **Action des Sulfates :**1) Substitution ions Mg<sup>2+</sup> → ions Ca<sup>2+</sup> :

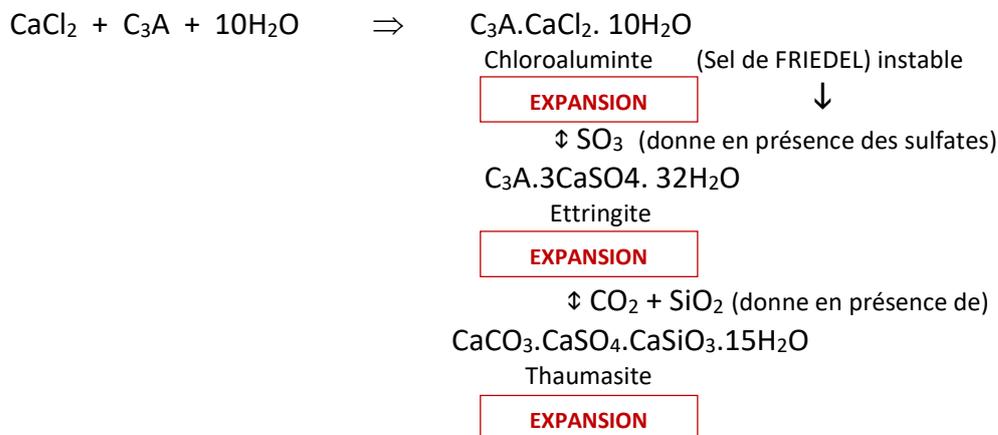
Action du gypse secondaire :



EXPANSION

2) Substitution ions Mg<sup>2+</sup> → ions Ca<sup>2+</sup> :

Substitution des ions Ca<sup>2+</sup> par ions Mg<sup>2+</sup> dans les C-S-H.  
 Perte des propriétés liantes et destruction des C-S-H

- **Action des Chlorures :**(A) Substitution des ions Mg<sup>2+</sup> → ions Ca<sup>2+</sup> :(B) Action de CaCl<sub>2</sub> :

(C) Corrosion des armatures

#### 4.4.4. Zonage et interférence des processus d'attaque

Le schéma de la Figure 17 montre les localisations préférentielles des différentes attaques ioniques. Ces zones ne sont pas fixes et progressent avec le temps vers l'intérieur du béton.

On note que malgré l'action de chacun des ions, l'agressivité de l'eau de mer est bien plus faible que celle des eaux sulfatées, mais cette réduction d'agressivité n'est pas clairement expliquée, et plusieurs théories sont avancées :

↳ La présence de chlorures accroît la solubilité du gypse et de l'ettringite → formation d'ettringite moins expansive.

↳ L'action du  $\text{CO}_2$  → formation d'une couche protectrice dense de carbone de calcium  $\text{CaCO}_3$  à la surface du béton → effet bénéfique sur le béton.

↳ Colmatage des fissures provoquant un blocage des fissures. En effet, l'analyse par DRX a permis de mettre en évidence la présence d'un dépôt dans les fissures, constitué de  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  (brucite), de  $\text{CaCO}_3$  (aragonite et calcite)...

Donc, on a formation d'un dépôt aussi bien en surface du béton que dans les fissures. L'accumulation de ce dépôt permet donc le blocage des fissures et la diminution des %  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  (qui sont précipités ou piégés dans le béton ou le dépôt).

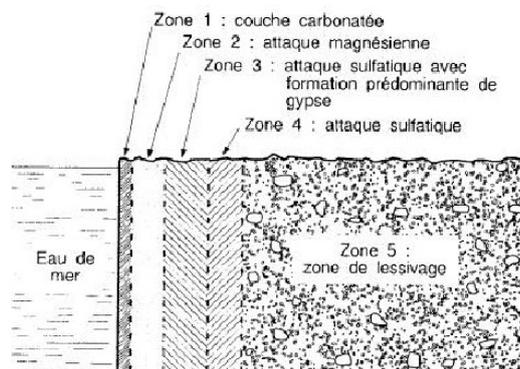


Figure 17 : Schématisation des zones d'attaque du béton par l'eau de mer (zone immergée) [1]

#### 4.4.5. Comportement du béton armé en milieu marin

La dégradation du béton armé en milieu marin est due à des actions de différentes origines : mécanique, chimique et physique (plus agressions biologiques de micro-organismes).

1- **Action mécanique** : la dégradation du béton est due aux mouvements de la mer : des vagues et choc des matériaux solides qu'elles transforment → érosion et fissuration du béton.

2- **Action chimique** : réaction chimique entre les constituants du béton et de l'eau de mer. On distingue l'action chimique vis-à-vis du béton lui-même, due essentiellement aux sulfates et aux chlorures, et l'action chimique vis-à-vis des aciers des armatures, causant leur corrosion.

3- **Action physique** : due essentiellement à :

- Température : dans les parties émergées en climat froid : phénomènes de gel/dégel. Dans les mers en climat chaud : la température peut activer les réactions de détérioration.
- Cycles humidification/séchage : les fluctuations du niveau marin (marées, tempêtes ...) causent dans les parties de la construction alternativement immergées ou émergées des contraintes de retrait et de gonflement hydrauliques qui peuvent causer la fissuration du béton.

D'autre part, les ouvrages considérés comme exposés au milieu marin, sont ceux en contact avec l'eau de mer (en immersion totale, semi immersion, ou immersion alternée), ou ceux construits sur une bande littorale atteinte par les embruns. La situation de l'ouvrage par rapport au milieu marin détermine les risques de détérioration du béton, et selon le schéma de la Figure 18, on peut repérer plusieurs zones de dégradation possibles :

- ↳ **Zone d'embruns marins** : le béton n'est pas en contact direct avec l'eau de mer, et l'ouvrage est soumis aux embruns marins qui peuvent transformer des sels sur des distances importantes.
- ↳ **Zone émergée en permanence ou zone d'aspersion** : le béton est soumis aux éclaboussures provoquées par les vagues et les projections d'eau de mer et à des cycles séchage/mouillage.
- ↳ **Zone de marnage ou zone d'immersion alternée** : s'étend entre les niveaux de l'eau à marée haute et à marée basse. Dans cette zone le béton est alternativement immergé et émergé.
- ↳ **Zone d'immersion en permanence** : le béton est continuellement immergé et les espèces chimiques pénètrent dans le béton par diffusion pure.

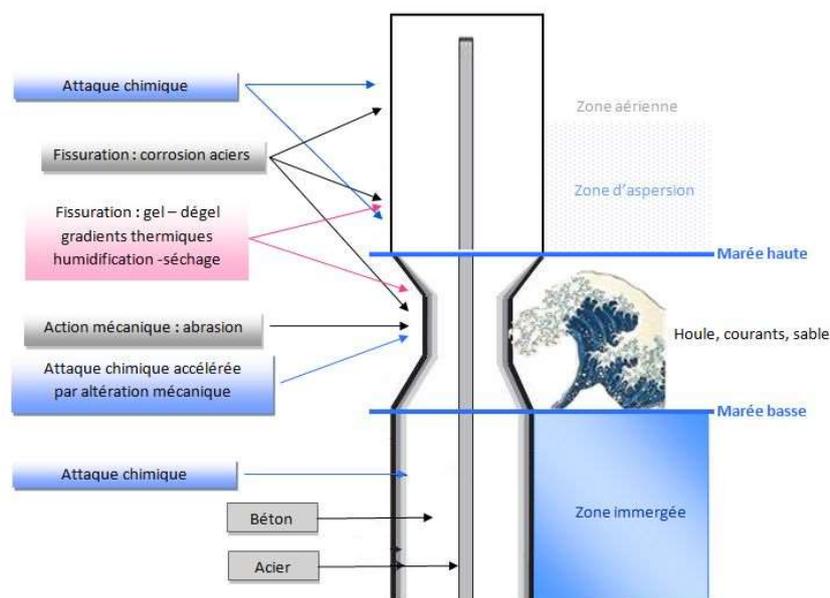


Figure 18 : Zone d'agression d'un béton à la mer (d'après Metha et Hokusai) [14]

De ce fait, en milieu marin la dégradation est variable suivant le degré d'immersion, c'est à dire selon que le béton soit totalement immergé ou émergé, ou en immersion alternée :

- **En immersion totale** : l'attaque est essentiellement chimique : attaque par les sulfates, chlorures, magnésium, CO<sub>2</sub>... L'attaque chimique est atténuée si le béton est peu poreux.
- **En immersion alternée** : l'attaque est physique et chimique, plus l'action mécanique des vagues, sable..., l'alternance mouillage/séchage au cours des marées, conditions climatiques (gel, vent, ensoleillement)...

C'est pour cette raison qu'on a fait le constat suivant : le béton au-dessous des basses eaux (en immersion totale) est peu endommagé, par contre c'est dans le béton dans la zone de marnage où les détériorations du béton sont les plus importantes. Les risques de corrosion se situent dans la zone aspergée (milieu non saturé), où l'oxygène peut diffuser. L'eau de mer peut être considérée comme assez agressive pour le béton, mais le milieu marin est fortement agressif.

#### 4.6. Paramètres contrôlant la durabilité du béton en milieu marin

- Un béton mécaniquement résistant n'est pas nécessairement durable à l'égard d'un environnement agressif comme celui du milieu marin. La formulation du béton durable exposé à un environnement marin doit prendre en compte les deux actions principales de l'eau de mer :
  - Action chimique vis-à-vis du béton d'enrobage (action des sulfates et des chlorures...).
  - L'accélération de l'amorçage de la corrosion des armatures par l'action des chlorures.
- Dans un milieu marin, les éléments clé de la durabilité du béton sont sa compacité et le type de ciment qui peut résister aux agressions chimiques. La compacité du béton lui confère une faible perméabilité et une faible diffusivité, paramètres de résistance à la diffusion des ions agressifs.
- Selon la norme NF EN 206-1, les classes d'expositions qui correspondent aux parties d'un ouvrage en béton armé dans un environnement marin sont :

Partie de l'ouvrage	Classes d'exposition
Béton en zone d'aspersion	XS3, XC2
Béton en zone de marnage	XS3, XC4
Béton immergé	XS2, XC1

Les règles générales à respecter pour avoir un matériau béton durable peuvent se résumer comme suit :

##### 4.6.1. Type du ciment :

En milieu marin, ce sont surtout les sulfates contenus dans l'eau de mer qui risquent de provoquer la dégradation du béton, c'est pourquoi pour travaux à la mer seuls des ciments de type «PM» (prise mer), définis par la norme NF P15-317, qui peuvent être utilisés pour travaux à la mer.

Ces ciments sont également destinés à être utilisés en environnement moyennement agressifs vis-à-vis des sulfates. Ces ciments sont à faible teneur en C<sub>3</sub>A+C<sub>3</sub>S et en SO<sub>3</sub> est limitée, car le C<sub>3</sub>S est la principale source de portlandite, vulnérable à l'eau de mer.

## 4.6.2. Ajouts minéraux

Pour raison de limitation de la portlandite dans le béton, les ciments composés à base d'additions minérales (cendres volantes, pouzzolanes, fumées de silice et particulièrement laitier granulé de haut fourneau) sont recommandés pour le béton en environnement marin. L'influence bénéfique de laitier, a été confirmée par plusieurs essais expérimentaux. Les ciments contenant des teneurs élevées de laitier (> 60%) améliorent fortement la résistance du béton à l'eau de mer [5].

## 4.6.3. Compacité du béton

Un béton compact et peu perméable est obtenu au moyen de :

- Un dosage en ciment adéquat ;
- Un rapport E/C limité (diminue la porosité et la perméabilité du béton) ;
- Une bonne formulation et une granulométrie comportant des éléments fins, en quantité suffisante pour remplir les espaces entre les plus gros granulats.
- Éviter tout ce qui peut contribuer à accroître la porosité du béton : mauvaise mise en œuvre, ségrégation, mauvais compactage, cure insuffisante...

Pour une bonne résistance à l'eau de mer, le pourcentage de C<sub>3</sub>A est moins déterminant que la compacité du béton. Des bétons denses même réalisés avec un ciment Portland sont encore en bon état après un séjour de près de soixante-dix ans dans le Pacifique.

Au Tableau 10, on donne les résultats d'essais effectués en mer Méditerranée sur des éprouvettes de béton réalisées avec différents ciments. Ces résultats montrent que les résistances mécaniques restent satisfaisantes après 26 ans d'immersion totale, à l'exception du ciment le plus riche en C<sub>3</sub>A.

Tableau 10 : Caractéristiques mécaniques à la rupture d'éprouvettes de béton 7x7x28 cm, E/C = 0,425 dosé à 400 kg/m<sup>3</sup>, immergées totalement pendant 26 ans en mer Méditerranée

Teneur du ciment en C <sub>3</sub> A (%)	Contrainte de Rupture (MPa)	
	Flexion	Compression
5,9	8,1	44,4
6,2	6,0	35,5
13,9	8,6	46,4
14,9	7,0	38,3
<b>15,4</b>	<b>3,2</b>	<b>28,2</b>

Remarque : d'autres paramètres doivent être respectés pour une bonne tenue des ouvrages exposés en milieu marin :

- Les ouvrages en milieu marin doivent être conçus avec une large réserve de résistance ( $\geq 30$  MPa).
- Dans la perspective de la lutte contre la corrosion des armatures, l'utilisation d'acier inoxydable peut être une alternative très sérieuse pour les ouvrages exposés en milieu marin.
- Les granulats doivent être de qualité satisfaisante, non contaminés, et qui ne doivent pas être poreux...

#### 4.6.4. Recouvrement des aciers

Pour éviter la corrosion des aciers d'armatures en milieu marin, l'enrobage de béton doit être optimisé, il doit être compact et doit avoir une épaisseur suffisante. Suivant les règles du BAEL91, l'enrobage minimum sans tolérance des aciers doit être : de 5 cm pour les ouvrages exposés aux embruns ou brouillards salins, et ceux exposés aux atmosphères très agressives.

#### 4.6.5. Dispositions constructives en milieu marin

En milieu marin, on doit éviter quelques dispositions, exemple [15] :

- Les ouvrages doivent être conçus avec une large réserve de dimensionnement : construire massif et éviter les parois minces par exemple.
- Les arêtes vives et sommets sont vulnérables à l'action de la mer, donc il faut arrondir les angles.
- Éviter tout traitement de surface : sablage ou lavage par exemple.
- S'efforcer d'effectuer un bétonnage continu afin d'éviter les joints de reprise et leurs inconvénients quant à l'étanchéité.

#### 4.6.6. Influence de la Température

L'attaque de l'eau de mer est fortement conditionnée par la température de l'eau. Les ouvrages les plus vulnérables se rencontrent :

En climat froid, où le béton (surtout dans la zone de marnage) est soumis aux cycles de gel/dégel, d'où la nécessité de prévoir de l'air entraîné dans les bétons pour éviter la fissuration (des dégâts ont été observés sur des ouvrages portuaires à cause de l'absence de l'air entraîné).

En climat chaud, l'effet thermique active les réactions chimiques et accélère ainsi la cinétique des réactions de dégradation. En effet, on a observé des dégradations rapides et très sévères sur les ouvrages (plateformes pétrolières) en mers chaudes ( $T > 25^{\circ}\text{C}$ ).



Figure 19 : Milieu marin

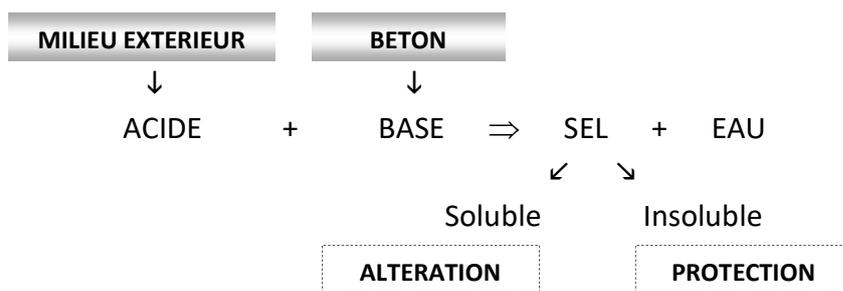
## 5. ATTAQUES CHIMIQUES PAR LES EAUX ET ACIDES

### 5.1. Introduction

Les composés hydratés de la pâte de ciment forment un milieu basique, le béton peut donc présenter une certaine susceptibilité vis-à-vis des solutions acides. Ce sont les bétons, contenant du ciment Portland donc hautement alcalins, qui ne résistent pas aux attaques des acides forts. Les milieux acides susceptibles d'être agressifs pour le béton :

- Eaux douces et pures peu ou beaucoup chargées en  $\text{CO}_2$  (dioxyde de carbone)  $\Rightarrow$  les eaux douces ont un  $\text{pH} < 7$ .
- Pluies acides. Les pluies acides contiennent principalement de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique, elles ont un  $\text{pH}$  compris entre 4,0 et 4,5
- Environnements acides (industriels ou naturels)
- Eaux résiduaires...

Dans un milieu acide, le comportement du béton peut être décrit par le schéma suivant :



L'attaque chimique acide du béton = décomposition des produits de l'hydratation du ciment et formation de nouveaux composés, qui s'ils sont solubles, peuvent être lessivés (dissous), ce qui serait préjudiciable pour le béton. Le  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  est l'hydrate le plus vulnérable à l'attaque acide, les C-S-H peuvent aussi être attaqués. Dans un béton, les granulats calcaires sont également vulnérables à l'attaque par les acides.

### 5.2. Eau Douce

#### 5.2.1. Quelques rappels

- Il faut distinguer entre eau douce (ou minérale) et eau pure.
- Une eau douce est une eau qui contient peu de sels calciques et magnésiens : l'eau douce contient moins de  $28\text{mg/l}$  de  $\text{Ca}^{2+}$ .
- L'eau douce est riche en  $\text{CO}_2$ , elle s'enrichit en carbone, soit au contact de l'air, soit pour les eaux souterraines par l'activité bactérienne, il se forme de l'acide carbonique qui fait baisser le  $\text{pH}$  au-dessous de 7  $\rightarrow$  milieu acide.

- Les eaux douces contiennent du CO<sub>2</sub> libre qui attaque le béton, peuvent encore contenir du sulfure d'hydrogène. Tout le CO<sub>2</sub> n'est pas agressif.
- L'eau pure contient peu de CO<sub>2</sub> → l'eau pure dissout le Ca(OH)<sub>2</sub>, causant une érosion superficielle du béton.
- Donc l'agressivité d'une eau douce (qui est peu minéralisée) dépend de deux paramètres :
  - Un **pH < 7** (entre 5,5 et 6,5).
  - **La concentration en CO<sub>2</sub> agressif** (entre 15 et 30 mg/l).
  - Possibilités de renouvellement de cette eau.

### 5.2.2. Action de l'eau douce

L'attaque du béton par l'eau douce ne peut s'effectuer que s'il est peu compact. L'attaque consiste en une dissolution de la portlandite en premier lieu. Le Tableau 11 donne la solubilité de cet hydrate en fonction de la température.

Tableau 11 : Solubilité de la portlandite en fonction de la température

TEMPERATURE (°C)	0	15	20	30	40	50	60
SOLUBILITE (g/l)	1,31	1,29	1,23	1,13	1,04	0,96	0,86

En deuxième lieu, les C-S-H sont attaqués tardivement étant moins solubles, réduisant le rapport molaire CaO/SiO<sub>2</sub>. Les alcalins Na<sup>+</sup> et K<sup>+</sup> sont également lessivés (dissous).

L'attaque par l'eau douce conduit à des pertes de masse et d'alcalinité dues au lessivage de la portlandite, ce qui induit à :

- Augmentation de la porosité et de la perméabilité
- Chute des résistances mécaniques du béton
- Formation à la surface du béton de coulures ou d'efflorescences blanchâtres ...

Remarque : dans des conduites d'eaux douces ou pures le ciment est lessivé, les granulats vont être déchaussés et la rugosité des conduites va augmenter. Dans ce cas, il est préférable d'utiliser des granulats calcaires pour que l'ensemble : pâte de ciment-granulats soit lessivé simultanément.

### 5.3. Acides

Le béton peut être attaqué par des liquides dont le pH < 6,5. Mais l'attaque n'est grave que si le pH < 5,5.

L'action des milieux acides est identique dans son principe à celle des eaux pures et acides, mais elle est plus intense : la portlandite est dissoute en premier, puis les silicates et aluminates de calcium hydratés C-S-H sont attaqués et perdent leur calcium.

La nocivité des acides dépend du caractère soluble ou insoluble des sels qu'ils forment : un acide donnant un sel soluble est moins dangereux qu'un autre donnant un sel très soluble.

Les milieux acides peuvent être :

- Eaux naturelles, exemple les marécages (pH ~ 4) ;

- Milieux industriels et effluents associés ;
- Dans les réseaux d'égouts : l'activité bactérienne conduit à la formation d'acide sulfurique ...

Remarque : les eaux usées sont alcalines et n'attaquent pas le béton, c'est l'activité bactérienne qui produit de l'acide sulfurique qui attaque le béton.

Quelques acides qui peuvent provoquer de graves attaques chimiques au béton :

<b>Acides</b>	<b>Inorganiques</b>	Carbonique – Chlorhydrique – Fluorhydrique – Nitrique – Phosphorique - Sulfurique
	<b>Organiques</b>	Acétique – Citrique – Formique – Humique – Lactique – Tannique

L'attaque progresse à une vitesse proportionnelle à la racine carrée du temps, du fait que les substances agressives doivent traverser la couche résiduelle des produits de réaction. De plus, l'attaque est diminuée lorsque le granulat est atteint.

#### 5.4. Adaptation des bétons aux eaux acides et douces

Vis-à-vis des attaques des eaux douces et acides, deux précautions importantes sont à prendre :

- Un béton compact
- Le choix d'un ciment adapté : un ciment libérant peu ou pas de portlandite.

La performance du béton à l'égard des acides dépend plus de sa qualité que du type de ciment utilisé. Le tableau N°2 de la norme P18-011 (voir annexe 1) résume les conditions générales de durabilité vis-à-vis de ces milieux. Ces conditions peuvent garantir, entre autres, une compacité maximale du béton et une résistance au milieu agressif grâce au choix d'un ciment adapté. On peut ainsi dire :

①- Pour avoir un béton d'une compacité élevée, il faut :

- Un dosage en ciment suffisamment fort ;
- Un rapport Eau/Ciment limité ;
- Une borne inférieure à la résistance mécanique ;
- Mûrissement et cure appropriés.

② Les types de ciment adaptés à ces milieux : ce sont des ciments libérant peu ou pas de portlandite (calcium). La portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  est l'hydrate le plus soluble des ciments courants. L'attaque par les eaux douces et acides dissout la portlandite et réduit le rapport C/S dans les C-S-H, ce qui se traduit par :

- Une perte de masse
- Une augmentation de la porosité
- Une diminution des performances mécaniques du béton...

Donc les ciments les plus adaptés sont les ciments avec additions minérales (laitiers, cendres silico alumineuses, pouzzolane naturelle, fumées de silice ...) dont l'hydratation libère peu ou pas de portlandite, tout en générant des C-S-H de rapport  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  faible.

Plusieurs travaux ont montré l'effet bénéfique des ciments avec additions sur l'amélioration de la résistance mécanique de ces bétons vis-à-vis des milieux acides agressifs. L'utilisation de ciments composés qui comportent du laitier, pouzzolanes, fumées de silice = action bénéfique = rendent difficile la pénétration des substances agressives. L'action pouzzolanique contribue à fixer le  $\text{Ca(OH)}_2$  le plus sensible aux attaques de l'acide [1].

Remarque : pour protéger le béton contre la progression des attaques chimiques on peut fixer le  $\text{Ca(OH)}_2$  par un traitement chimique de surface (silicate de sodium – fluorosilicates de magnésium), on obtient une couche protectrice qui remplit les pores [5].

Le Tableau 12 présente les recommandations pour le choix du ciment pour bétons en milieux acides ou en contact avec des eaux pures (selon la norme FD P18-011).

**Tableau 12 : Recommandations pour le choix du ciment (FD P18-011)**

**Milieu acides**

Classes d'exposition	Choix du ciment
<b>XA1</b>	CEM II/B-S, CEM II/B-V, CEM II/B-P, CEM II/B-Q, CEM II/B-M (S-V) CEM III/A conformes à la norme NF EN 197-1 CEM III/A conforme à la norme NF EN 197-4 Ciments conformes à la norme NF P 15-317 (PM) ou NF P 15-319 (ES) CEM IV/A et B conformes à la norme NF EN 197-1
<b>XA2</b>	CEM II/B-S, CEM II/B-V, CEM II/B-P, CEM II/B-Q, CEM II/B-M (S-V) CEM III/A conformes à la norme NF EN 197-1 CEM III/A conforme à la norme NF EN 197-4 Ciments conformes à la norme NF P 15-319 (ES) CEM IV/A et B conformes à la norme NF EN 197-1
<b>XA3</b>	CEM II/A et C, CEM V/A et B conforme à la norme NF P 15-319 Ciment sursulfaté CSS conforme à la norme NF P 15-313 Ciments d'aluminates de calcium conformes à la norme NF EN 14647 CEM IV/ B conformes à la norme NF EN 197-1

**Eaux pures**

Classes d'exposition	Choix du ciment
<b>XA1</b>	CEM III/A, B et C, CEM V/A et B conformes à la norme NF P 15-319 Ciment sursulfaté CSS conforme à la norme NF P 15-313
<b>XA2</b>	Ciments d'aluminates de calcium conformes à la norme NF EN 14647
<b>XA3</b>	CEM IV/B conforme à la norme NF P EN 197-1

## 6. CORROSION DES ARMATURES

### 6.1. Introduction

La corrosion des aciers d'armatures est un danger majeur pour la durabilité des ouvrages en béton armé (voir Figure 20). La corrosion est la cause directe de l'effondrement de beaucoup de structures. Les dommages dus à la corrosion se manifestent par des expansions qui conduisent à la fissuration du béton, qui provoquent le décollage de l'enrobage du béton (voir Figure 21). Plus des dommages structuraux dus à la perte d'adhérence entre les armatures et le béton, et la diminution de leur diamètre effectif (perte de capacité en traction).

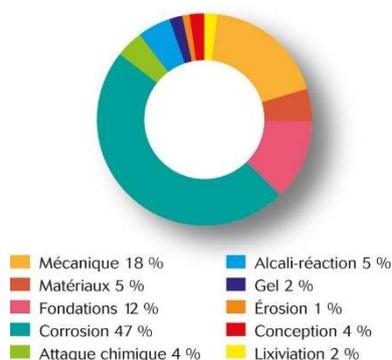


Figure 20 : Causes de dégradation des structures en béton

(Source : [www.infociments.fr](http://www.infociments.fr))



Figure 21 : Epaufrure laissant apparaître les armatures corrodées - Fissuration consécutive à la corrosion

(Source : [www.betons-lemagazine.fr](http://www.betons-lemagazine.fr))

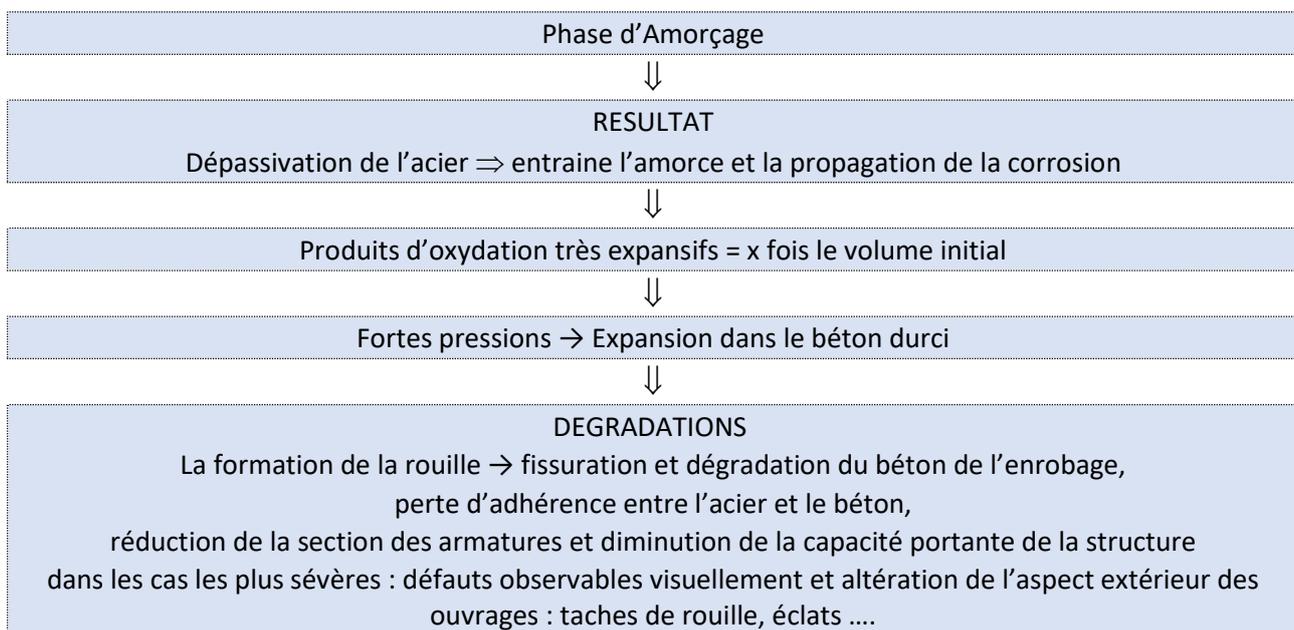
### Quand est ce que la corrosion a lieu ?

Le béton est un milieu très alcalin ( $\text{pH} \approx 13$ ) = environnement où les aciers d'armature sont protégés contre la corrosion. De plus, les aciers sont recouverts d'un film passif formé d'une solution solide de  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-Fe}_2\text{O}_3$  et d'hydroxyde de calcium ( $10^{-3}$  à  $10^{-1}\mu\text{m}$ ), c'est une rouille qui se forme avant le bétonnage et lorsque le béton est frais.

La corrosion peut débuter si le film passif est détruit ou si le pH de la solution interstitielle diminue ( $\text{pH} < 12$ ). Ainsi, l'évolution de la corrosion s'effectue en deux étapes :

- ① L'acier est stabilisé par la couche dite de **passivation** qui empêche la formation de rouille.
- ② Phase d'amorçage, où se produit la **dépassivation** progressive de l'acier, cette dépassivation peut être engendrée par de nombreux facteurs, surtout :
  - **La carbonatation du béton** (qui provoque la baisse du pH du béton) ;
  - **La pénétration des ions chlorures** (Ex. eau de mer ou sels de déverglaçage).

Remarque : une autre situation de dépassivation de l'acier, si la solution interstitielle disparaît (cas des grandes fissures qui atteignent les armatures).



## 6.2. Mécanisme de la corrosion

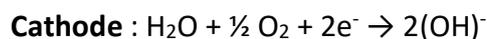
Le mécanisme de base de la corrosion est un processus qui comprend deux types de réactions simultanées (voir Figure 22) :

- ① **Réactions « anodiques »** : dissolution du fer des aciers dans le liquide qui est à son contact → ce liquide = soit eau des pores du béton, soit eau infiltrée entre acier et béton (quand l'adhérence est faible).

Ces réactions anodiques → créent un excédent d'électrons dans le métal (lorsqu'un métal est plongé dans un électrolyte des ions vont passer dans la solution, tandis que le métal se chargera en électrons négatifs  $e^-$ ).

- ② **Réactions « cathodiques »** : pour rétablir l'équilibre électrique, d'autres réactions se produisent, ces réactions dites « cathodiques » : la formation d'ions hydroxyles  $\text{OH}^-$  par réduction de l'oxygène gazeux dissous dans l'eau, contenu dans le béton.

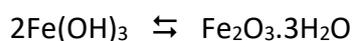
Chimiquement, les réactions de base qui traduisent ces deux types de réactions sont :



③ La **rouille** provient d'une troisième **réaction entre** :

- Les produits formés par les réactions anodiques.
- Les produits formés par les réactions cathodiques.

Donc la rouille apparaît lorsque les ions ferreux ( $\text{Fe}^{2+}$ ) réagissent avec les ions  $\text{OH}^-$  pour former l'hydroxyde ferreux ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ) :



Ainsi, en présence d'oxygène, les réactions d'oxydation se poursuivent. La rouille est formée d'un mélange de ces produits :  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , ...

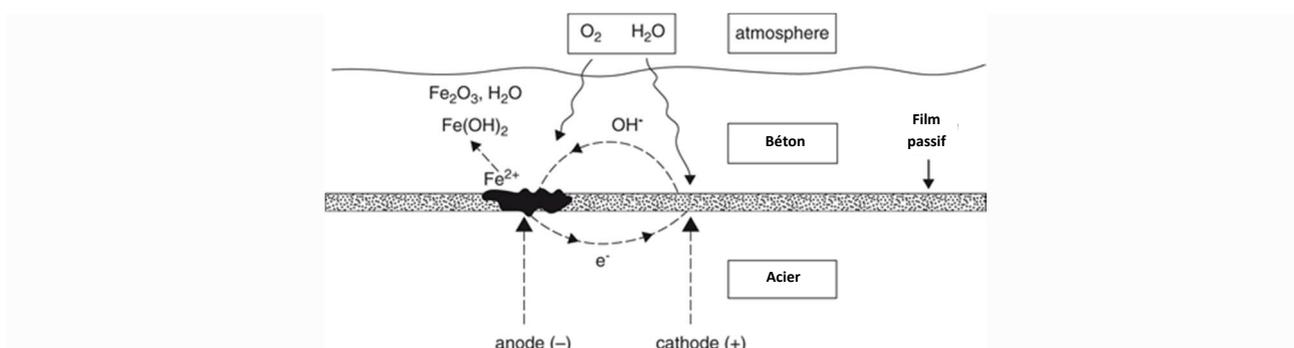
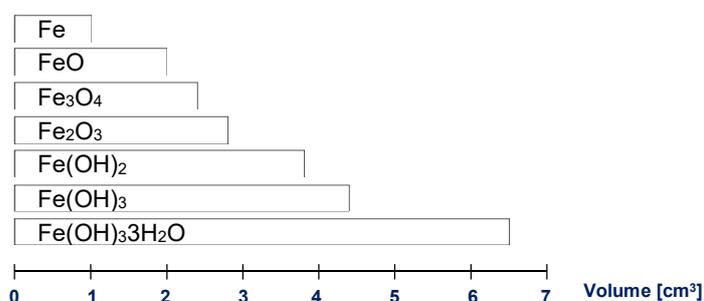


Figure 22 : Schéma de la corrosion des armatures dans le béton [10].

La corrosion des armatures provoque des dommages au béton environnant, parce que la rouille est formée de produits fortement gonflants, du fait que le fer métallique peut former des oxydes dont le volume peut-être 6 fois supérieur au volume initial, selon la figure suivante [5] :



**Remarque :**

- ① La vitesse de corrosion dépend fortement du taux d'humidité du béton, car elle conditionne directement la conductivité et la diffusion de l'oxygène :
  - Il ne se produit pas de corrosion lorsque l'atmosphère est très sèche.
  - Il n'y a pas de formation de rouille lorsque le béton est totalement immergé dans l'eau désaérée (manque d'oxygène).
  - L'humidité relative la plus favorable pour la corrosion : 70 à 80 %.
- ② Si la rouille est étanche quand elle atteint 1 mm, l'acier est alors passivé, car cette couche protège l'acier (écran). Si la rouille n'est pas étanche, la corrosion se poursuit indéfiniment.
- ③ Les aciers peuvent se corroder en rouillant, par corrosion dite « **généralisée** » (causée par exemple par la carbonatation du béton) : généralisée sur toute la section de l'armature, ou par corrosion dite « **piqûration** » (causée par exemple par l'action des chlorures) : corrosion concentrée en quelques endroits de l'armature.

### 6.3. Les ouvrages concernés par la corrosion

Les ouvrages concernés par la corrosion des armatures :

- Bâtiments : acrotères, balcons, terrasses... (éléments sensibles car ils sont minces).
- Bâtiments industriels soumis souvent à des agents chimiques.
- Parkings en milieu maritime ou montagneux : présence de chlorures provenant de l'eau de mer et des sels de déverglaçage.
- Ponts et ouvrages d'art : les zones les plus sensibles sont les tabliers, les appuis en superstructures et les équipements de tablier (influence des sels de déverglaçage).
- Réservoirs et silos : problèmes liés aux fuites d'eau, dues à la présence de fissures ou de défauts d'enrobage, notamment si le milieu contient des agents chimiques agressifs.
- Cheminées industrielles soumises à un environnement très sévère (surtout acide).
- Structures portuaires.
- Canalisations en béton armé ou précontraint surtout enterrées, lorsque la protection du béton n'est pas suffisante.

### 6.4. Facteurs causant la corrosion des aciers des armatures

Les deux facteurs importants qui causent la dépassivation de l'acier des armatures et la propagation de la corrosion sont :

**A. La carbonatation du béton causée par la diffusion du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dans le béton**

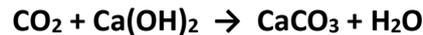
**B. La présence de chlorures au niveau des armatures**

## 6.4.1. Carbonatation du béton

### 6.4.1.1. Définition

La carbonatation est un phénomène chimique présent dans la peau du béton tout au long de sa vie. Le pH d'un béton non carbonaté = 12-13 (milieu basique). Dans ce milieu l'armature est « passivée », c'est-à-dire qu'elle est protégée de la corrosion par un film passif.

La carbonatation du béton est due à la pénétration du CO<sub>2</sub> de l'air par le réseau poreux du béton. Le CO<sub>2</sub> est dissous dans l'eau, réagit chimiquement avec la portlandite du béton Ca(OH)<sub>2</sub> :



Cette réaction dite carbonatation, diminue le pH du béton (pH < 11,5), affaiblit la protection initiale des armatures placées en milieu basique et initie le phénomène de corrosion, car tout mécanisme diminuant le pH dans le béton contribue à amorcer ou à accélérer la corrosion.

Donc, on distingue deux phases dans le processus de corrosion d'un acier :

- Phase d'amorçage
- Phase de développement de la corrosion

Objectif de toute formulation du béton : prolonger le plus longtemps possible la phase d'amorçage pour ralentir la diffusion du CO<sub>2</sub> qui peut causer la corrosion des armatures.

#### Remarque :

- ① La carbonatation n'endommage pas le béton en soi, ses effets peuvent être même **bénéfiques** pour le béton, car la calcite insoluble formée suite à la carbonatation peut colmater la porosité du béton, ce qui réduirait la perméabilité superficielle du béton.
- ② La carbonatation fait baisser le pH de 12,6-13,5 à environ 9. Si toute la portlandite s'est carbonatée, le pH peut descendre jusqu'à 8,3, débute alors carbonatation des C-S-H.
- ③ %CO<sub>2</sub> varie ⇒ tunnels, grandes villes, circulations routière : %CO<sub>2</sub> élevé.

### 6.4.1.2. La profondeur de carbonatation

La profondeur de carbonatation du béton augmente avec le temps (voir Figure 23), elle est proportionnelle à la racine carrée du temps (voir Figure 23) :

$$x = \sqrt{2 D t}$$

Tel que : **x** : profondeur de carbonatation en mm, **D** : coefficient de diffusion apparent, **t** : le temps d'exposition en années.

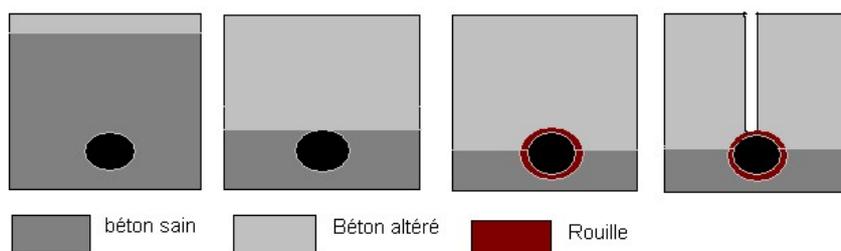


Figure 23 : Vitesse de progression du front de carbonatation fonction de  $\sqrt{t}$

(Source : <https://mediatheque.snbpe.org/userfiles/file/mediatheque/public/>)

La profondeur de carbonatation dépend essentiellement de :

- De la perméabilité du béton  $\Rightarrow$  perméabilité  $\nearrow$   $\rightarrow$   $\text{CO}_2$   $\nearrow$   $\rightarrow$  profondeur de carbonatation  $\nearrow$
- L'aptitude du béton à fixer chimiquement  $\text{CO}_2$  (par la portlandite et le C-S-H) : plus la fixation est importante, plus la pénétration du  $\text{CO}_2$  à l'intérieur du béton est réduite, de ce fait la profondeur de carbonatation est réduite aussi.
- Taux d'humidité dans la structure poreuse du béton. La vitesse de corrosion dépend du taux d'humidité du béton. La diffusion du  $\text{CO}_2$  est 10 000 élevée dans l'air que dans l'eau. Donc dans un béton saturé d'eau : la pénétration du  $\text{CO}_2$  serait lente. Comme la présence d'eau est nécessaire pour la carbonatation, la carbonatation est maximale pour une humidité relative  $\sim 80\%$  (voir Figure 24 et Tableau 13).

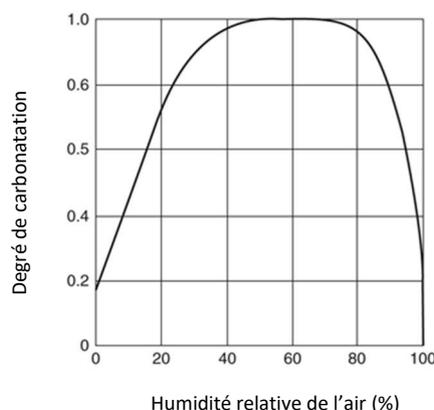


Figure 24 : Taux de carbonatation en fct. de l'humidité du milieu avec lequel le béton est en équilibre [10].

#### 6.4.1.3. Mesure de la profondeur de carbonatation

On peut mesurer la profondeur de carbonatation par un essai de coloration à la phénolphthaléine. L'essai consiste à appliquer une solution de phénolphthaléine à la surface d'un fragment de béton (voir Figure 25) :

- Zones saines non carbonatées : la couleur vire au rose.
- Zones carbonatées : pas de changement de couleur.

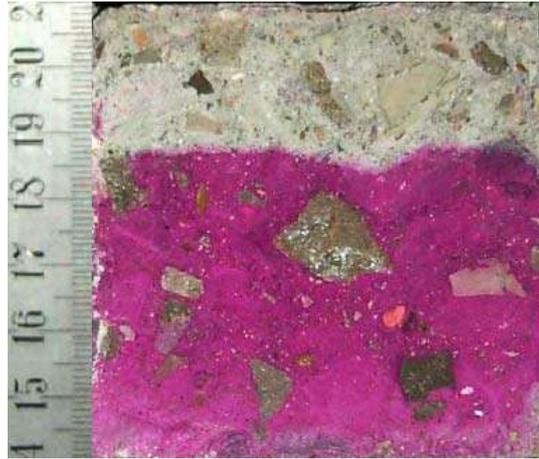


Figure 25 : Vue d'une fracture fraîche de béton après aspersion d'une solution de phénolphtaléine. En gris : zone carbonatée. En violet : zone non carbonatée [3]

#### 6.4.1.4. Influence de la composition du béton sur la carbonatation

Pour ralentir la pénétration des agents agressifs, il faut formuler le béton de telle sorte que sa compacité soit maximale pour ralentir la diffusion des agents agressifs. Donc, pour réduire la carbonatation du béton, il faut assurer les conditions suivantes :

##### — Réduire le rapport E/C

Un faible rapport E/C améliore la protection contre la corrosion des armatures (voir Figure 26). Si on réduit le rapport E/C, la porosité et de ce fait le taux de carbonatation seront réduits.

On a constaté qu'avec un rapport E/C = 0,60 on peut avoir une profondeur de carbonatation = 15 mm après 15 ans d'exposition. Si ce rapport était de E/C = 0,45 ; cette profondeur ne sera atteinte qu'au bout de 100 ans.

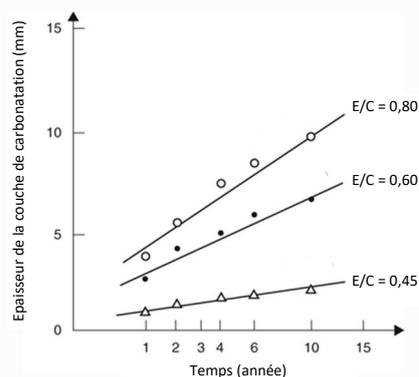


Figure 26 : Profondeur de carbonatation en fonction du rapport E/C [10]

##### — Résistances mécaniques élevées du béton

Les résistances mécaniques du béton lui confèrent une résistance à la progression de la carbonatation, comme le montrent le Tableau 13 et le Tableau 14.

Tableau 13 : Profondeur de carbonatation en fonction de Rc et de l'exposition du béton

Exposition	Profondeur de carbonatation après 50 ans d'exposition (en mm)	
	Béton de 25 MPa	Béton de 50 MPa
Abrité à l'extérieur	60 à 70	20 à 30
Exposé à la pluie	10 à 20	1 à 2

Tableau 14 : Profondeur de carbonatation en fonction de la Résistance Mécanique

Résistance à 28 jours (MPa)	20	40	60	80
Profondeur de carbonatation après 30 ans (en mm)	45	17	5	2
Bétons Extérieurs abrités				

### — Un béton suffisamment dosé en ciment

Comme c'est montré à la Figure 27, le taux de carbonatation diminue si le dosage en ciment (C) est élevé, surtout sur le long terme.

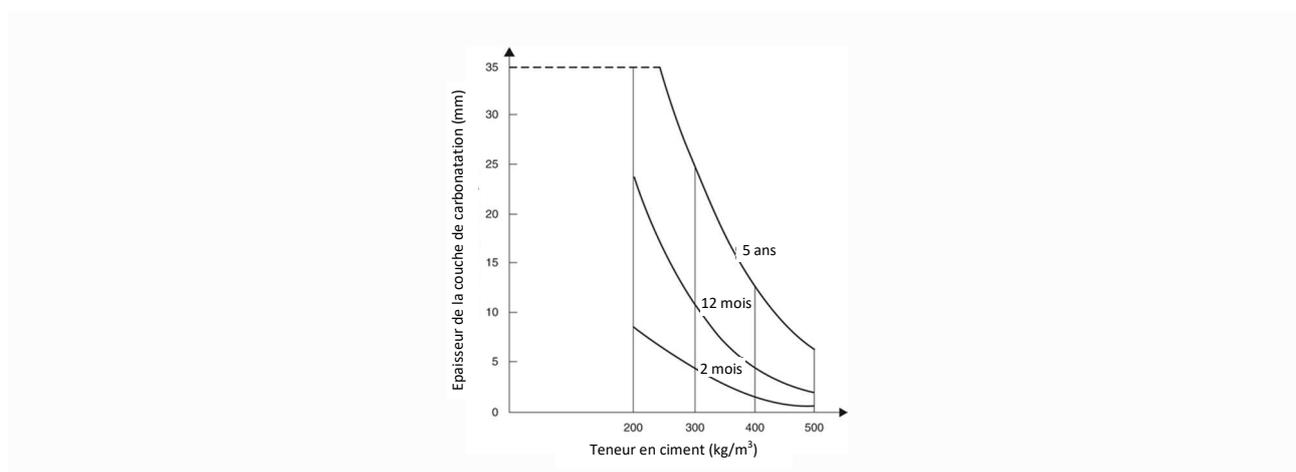


Figure 27 : Profondeur de carbonatation en fonction de la teneur en ciment [10].

### — Le Mûrissement et la durée de cure humide du béton :

Le mûrissement du béton est un facteur important, exemple une prolongation du mûrissement de 1 à 3 jours : réduction de la profondeur de carbonatation de 40%.

### — Utilisation de ciments composés/ajouts minéraux

Par rapport à un béton au ciment Portland, la vitesse de corrosion est plus élevée pour un béton contenant des ciments résistant aux sulfates à faible teneur en  $C_3A$ , pour lesquels la capacité de fixation des chlorures est très limitée.

### — Caractéristiques du béton de recouvrement

L'optimisation de l'enrobage des armatures constitue un facteur important pour assurer la protection des armatures.

## 6.4.2. Rôle des Chlorures

La corrosion des armatures du béton armé est une des causes principales des désordres et de diminution de la capacité portante des structures. La présence de chlorures dans le béton frais à des teneurs élevées augmente le risque de corrosion des aciers.

Les environnements dans lesquels peut se trouver le béton en contact avec les chlorures : ouvrages soumis aux sels de déverglaçage, ouvrages situés en site maritime...

### — Action des chlorures

Les ions chlorures peuvent pénétrer par diffusion ou par capillarité à l'intérieur du béton, franchir la zone d'enrobage, atteindre les armatures, et provoquer la corrosion (par mécanisme de dissolution du métal suivant une réaction d'oxydo-réduction), d'abord ponctuelle (corrosion par piqûres) puis généralisée à toute la surface de l'acier. La vitesse de pénétration des chlorures dépend de la porosité du béton. Elle décroît lorsque le rapport E/C diminue [16].

La corrosion s'amorce dès que la teneur en chlorures au niveau des armatures atteint un certain seuil de dépassivation. Ce seuil est fonction du pH de la solution interstitielle et de la teneur en oxygène au niveau des armatures ; il est de l'ordre de 0,4 à 0,5 % par rapport au poids du ciment. Il est atteint plus rapidement si le béton est carbonaté [16].

La Norme NF EN 206-1 précise les teneurs maximales admissibles en  $\text{Cl}^-$  rapportées à la masse de ciment dans le béton en fonction de l'utilisation du béton et de la classe de chlorures considérée. Cette norme indique que la teneur en chlorure du béton doit intégrer la somme des contributions de tous les constituants du béton [17].

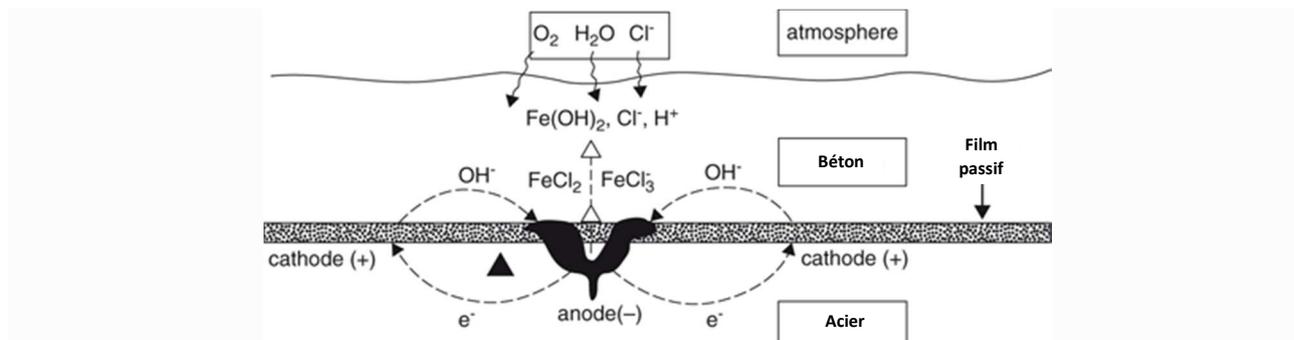


Figure 28 : Effet des ions chlorure sur la corrosion des armatures dans le béton [10].

Après la dépassivation, la propagation de la corrosion dépend de deux paramètres :

- l'humidité à l'intérieur du béton responsable de la composition de la solution interstitielle et de la résistivité du béton et de la disponibilité de l'oxygène.
- la température à laquelle est soumis le béton.

## Classes de chlorure Norme NF EN 206-1

Type de béton	Béton non armé	Béton armé		Béton précontraint	
		CEM III	Autres ciments	Post-tension	Pré-tension
Classe de chlorure	Cl 1,00	Cl 0,65	Cl 0,40	Cl 0,20	Cl 0,15
Teneur maximale de Cl-	1 %	0,65 %	0,40 %	0,20 %	0,15 %

### 6.5. Prévention contre la corrosion

Actions préventives surtout dans le cas d'ouvrages particulièrement exposés aux chlorures :

- Enrobage suffisant des armatures et formulation adaptée
- Ouvrages particuliers, milieux très exposés : armatures zinguées, revêtues de composés époxydiques ou galvanisés – utilisation d'acier inoxydable (inox)...
- L'imprégnation du béton par des produits hydrofuges ou des inhibiteurs de corrosion,
- Traitement électrochimique par protection cathodique...

## 7. ACTION DU GEL/DEGEL SUR LE BETON

### 7.1. Introduction

Parmi les actions susceptibles de provoquer des dégradations aux ouvrages en béton, les cycles de gel/dégel, son agressivité est accentuée avec l'utilisation des sels de déverglaçage (appelés aussi fondants). L'action du gel peut affecter le béton frais ou le béton durci. Le béton durci peut résister aux effets du gel, mais les conditions climatiques sévères peuvent entraîner la dégradation du béton s'il est **mal formulé** ou **mal mis en œuvre**.

Deux types de détérioration du béton consécutive aux cycles du gel/dégel et de l'utilisation des sels de déverglaçage (voir Figure 29) :

- La **fissuration interne** du béton : gel interne
  - L'**écaillage** des surfaces dû aux sels de déverglaçage : gel + sels
  - **Effet secondaire** de l'utilisation des sels :
    - Risque de **corrosion** des armatures due aux chlorures contenus dans les sels.
    - Les sels peuvent contenir des alcalins, donc il y a un risque d'**alcali-réaction**.
- ✓ Les deux types de détérioration sont provoqués par des processus différents.
- ✓ La résistance au gel et sels est extrêmement importante pour les revêtements de routes en béton.
- ✓ La formulation du béton a une grande influence sur sa durabilité au gel.



Figure 29 : Dégâts dus aux cycles gel/dégel en présence de sels de déverglaçage observés à la surface de revêtements de sols industriels [18]

## 7.2. Action du gel

### 7.2.1. Explication de l'action du gel sur le béton

Quand la Température  $\searrow$  dans un béton, l'eau se transforme progressivement en glace.



La formation de glace commence dans les plus gros capillaires pour se propager dans les pores de plus en plus petits à mesure que la température s'abaisse (voir Figure 30).



L'accroissement de volume accompagnant la transformation de l'eau se trouvant dans les capillaires du béton en glace (~ 9 %) + mouvement de l'eau qui n'a pas encore gelé = pressions hydrauliques importantes qui si elles dépassent la résistance à la traction du béton

⇒ Cause la dégradation du béton = la fissuration interne, surtout si les chutes de températures du béton sont rapides et fréquentes (voir Figure 31).

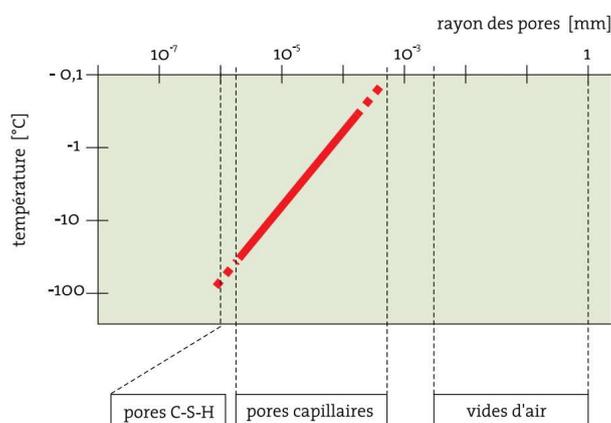


Figure 30 : abaissement de la température de fusion de la glace avec la diminution du rayon des pores [18]

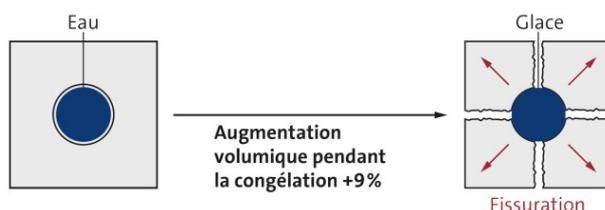


Figure 31 : Effet de l'augmentation de volume lors de la congélation de l'eau [11]

### 7.2.2. Le moyen de résistance du béton au gel sévère

Les pressions internes hydrauliques qui causent la fissuration interne dépendent de la longueur du trajet entre le pore qui gèle et un vide qui peut accepter l'eau qui en est chassée.

Pour résister à l'action du gel sévère, le béton doit être correctement formulé et mis en œuvre, et surtout pour les ouvrages en contact prolongé avec l'eau, la prévoyance d'un adjuvant : *Entraîneur d'air*. C'est un adjuvant qui entraîne et stabilise un nombre élevé de microbulles d'air ( $\phi = 10$  à  $100 \mu\text{m}$ ) réparties uniformément dans le béton après malaxage et qui subsistent après son durcissement [18].

### 7.2.3. Action de l'air entraîné

Lors du gel du béton, le paramètre important est la distance que doit parcourir l'eau sous pression. Le fait d'introduire de minuscules bulles d'air permet de diminuer cette distance que doit parcourir l'eau pour trouver un refuge où elle peut geler et gonfler sans contrainte. Dans ce but, on introduit, lors du malaxage, des adjuvants entraîneurs d'air (voir Figure 32). Pour être efficace, l'adjuvant entraîneur d'air doit former beaucoup de petites bulles, pour un volume d'air donné.

D'où la notion de facteur d'espacement des bulles d'air noté  $\bar{L}$ , il s'agit de la demi distance moyenne existant entre deux bulles d'air (voir Figure 33). Si la distance à parcourir par l'eau est élevée, les pressions hydrauliques peuvent dépasser la résistance à la traction du béton et provoquent la fissuration interne du béton.

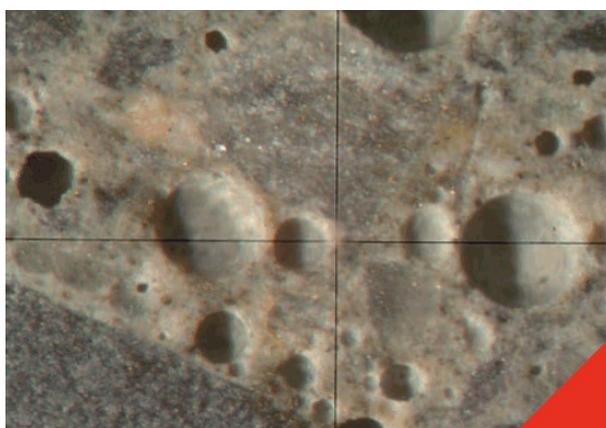


Figure 32 : Béton à Air Entraîné : bonne répartition des microbulles (grossissement  $\times 100$ ) [11]

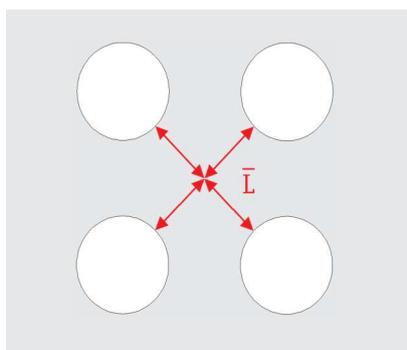


Figure 33 : Représentation du facteur de forme L [18]

Mais l'**augmentation** de la teneur en air entraîne une **diminution** de la résistance du béton : 1% d'air entraîné au-delà de 2% correspond environ à une réduction de 5% des résistances à 28 jours. Donc on doit utiliser un ciment de classe de résistance élevée + diminution du rapport E/C, car l'air entraîné dans le béton permet la diminution d'eau de gâchage tout en conservant l'ouvrabilité. Une attention particulière doit être faite lors de la mise en œuvre, notamment la vibration.

### 7.3. Action des sels de déverglaçage

Les dommages causés au béton par les sels de déverglaçage peuvent avoir plusieurs origines :

- Saturation en eau de la surface du béton.
- Choc thermique provoqué dans les couches superficielles du matériau : les sels puisent dans le béton la chaleur nécessaire à faire fondre la glace qui le recouvre  $\Rightarrow$  provoquent une brusque chute de la température superficielle du béton  $\Rightarrow$  fortes tensions entre la couche de surface et les couches inférieures dont la température n'a pas varié  $\Rightarrow$  résultat : éclats ou écaillage de la surface.
- Pression osmotique : l'eau qui gèle dans le béton est en réalité une solution saline  $\Rightarrow$  pressions osmotiques.

Remarque : l'effet destructeur des sels de déverglaçage est plus dangereux que l'action du gel seul, mais il est aussi plus limité.

### 7.4. Composition des bétons soumis aux attaques du gel et des sels de déverglaçage - Mesures préventives

Pour formuler un béton résistant au gel : il faut une bonne résistance mécanique, empêcher l'eau de rentrer et avoir un réseau bien distribué de bulles d'air, cela se traduit par :

#### - Rapport E/C

Un béton à faible rapport **E/C** a une taille des pores réduite, ce qui diminue la quantité de glace formée à une température donnée (voir Figure 32). La réduction de ce rapport réduit la porosité du béton donc le risque de fissuration interne gel + résistances mécaniques élevées.

#### - Dosage et classe élevés du ciment

#### - Degré de saturation en eau

Le degré de saturation en eau d'une pâte de ciment conditionne sa tenue au gel. Une pâte non saturée contient des vides gazeux qui constituent un volume tampon dans lequel la glace peut se former sans exercer de pression sur les parois des pores (voir Figure 35).

#### - Réseau de bulles d'air entraîné stable

Les bulles d'air entraîné offrent des espaces permettant à la phase liquide en mouvement de s'y accumuler et d'y geler sans créer de dommage. Pour protéger la pâte, il faut que les bulles d'air soient suffisamment rapprochées pour faire en sorte que les contraintes internes générées par le gel soient inférieures à la capacité ultime de la pâte. Le paramètre essentiel garantissant l'efficacité du réseau de bulles d'air est le facteur d'espacement  $\bar{L}$ , il doit être inférieur à une valeur critique qui dépend de la composition du béton et de la sévérité de l'exposition au gel [18]. Le volume du réseau de bulles est établi en fonction de diamètre max des granulats  $D$  (voir Figure 34).

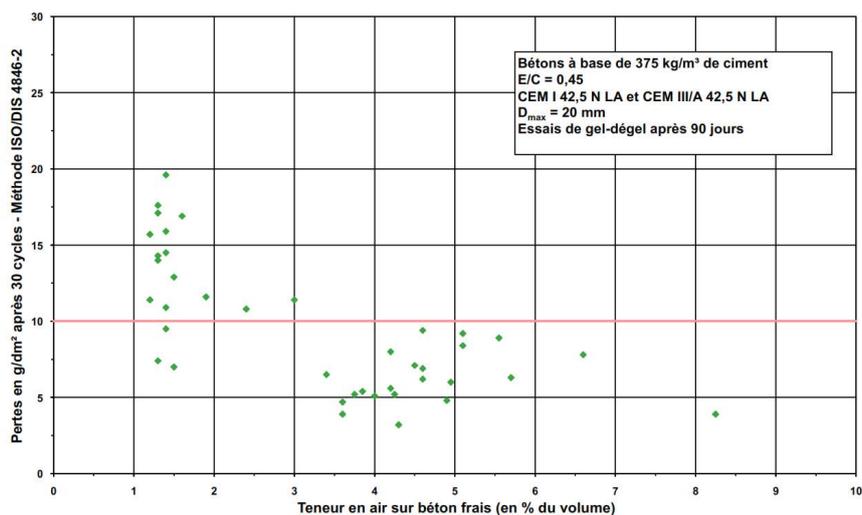


Figure 34 : influence de la teneur en air sur la résistance au gel en présence de sels de déverglaçage [18]

### - Qualité des granulats

Utiliser des granulats sains ; les granulats gélifs, proches de la surface, absorbent de l'eau et se fissurent sous l'effet du gel en détruisant le mortier d'enrobage et en provoquant des cratères superficiels.

### - Qualité de la peau du béton

Afin d'avoir un béton résistant aux sels de déverglaçage, il faut particulièrement soigner la peau du béton, qui sera attaquée en premier par l'action des sels, donc : soin particulier de la cure du béton, éviter le ressuage et la remontée de laitance.

### - Mise en œuvre soignée

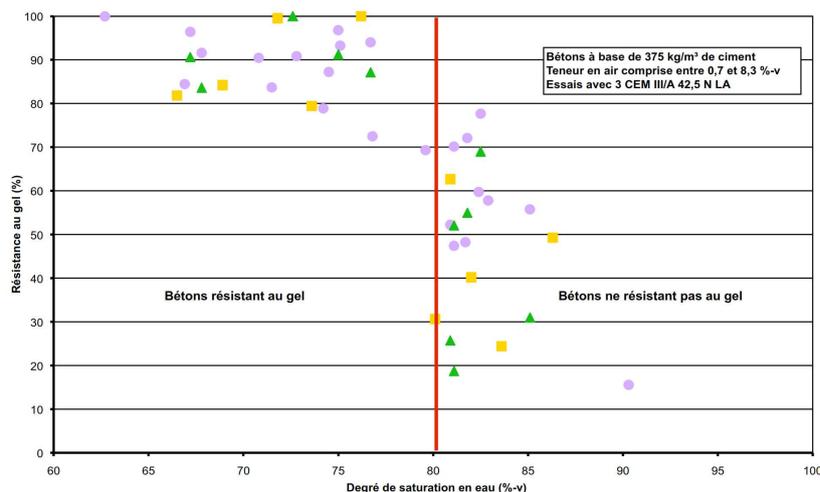


Figure 35 : Influence du degré de saturation en eau du béton sur sa résistance au gel [18]

## 7.5. Gel du béton frais

Le béton frais est détruit par l'augmentation du volume de l'eau ayant gelé, conséquences [18] :

- Quand l'eau gèle lorsque le béton est frais : le béton s'élève hors du coffrage. Conséquent, après le durcissement, la qualité du béton est très mauvaise puisque le béton est insuffisamment serré.
- Quand l'eau gèle lorsque le béton a fait prise mais est encore très jeune : la résistance développée est trop faible pour que le béton puisse reprendre les contraintes de traction provoquées par la différence de température entre la surface et l'intérieur. La surface s'écaillera.

## 7.6. Essais de résistance au gel

La résistance au gel des bétons est vérifiée des essais de gel interne : mesure du facteur d'espacement (ASTM) ; essais de gel/dégel (P 18.424 et 18.425), ainsi que de gel en présence de sels par un essai d'écaillage (XP P 18.420) (voir Figure 36).



Figure 36 : Contrôle de la teneur en air à l'aéromètres – Essai de gel interne - Essai d'écaillage [11]

# **CHAPITRE IV : REPARATIONS DES OUVRAGES EN BETON**

---

# 1. FORMES DES DEGRADATIONS DES STRUCTURES EN BETON

Les dégradations des ouvrages en béton armé peuvent avoir plusieurs formes et peuvent présenter une gravité plus ou moins importante pour la vie de l'ouvrage. Les principaux symptômes de la dégradation des ouvrages en béton armé sont :

- Les fissures ;
- Les épaufrures (fragments de béton détachés de la masse de l'ouvrage)
- 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'écailles)
- La désintégration (désorganisation de la peau du béton pouvant se poursuivre par une destruction avancée du béton d'un élément d'ouvrage, et parfois assimilable à un pourrissement du matériau)

Ces symptômes peuvent se regrouper en deux grandes catégories de dégradations [1] :

- 1- Dégradations en surface : Abrasion – Érosion – Cavitation – Écaillage.
- 2- Fissuration interne

→ La présence de déformations ou de fissurations inhabituelles est souvent le signe visible d'une pathologie, mais il y a des cas où les structures soient endommagées avant l'apparition de signes évidents (RAG par exemple).

→ La fissuration est le symptôme le plus fréquent, et la seule observation de fissures sur un ouvrage rend toujours difficile le diagnostic, c'est pourquoi il est souvent utile de connaître d'autres caractéristiques de la fissuration (date d'apparition, morphologie, activité, vitesse d'évolution).

Il existe une multitude de symptômes de dégradations ; le catalogue des défauts apparents des ouvrages d'art en béton par exemple récapitule l'essentiel de ces symptômes en les classant en cinq catégories qui vont « des défauts sans conséquence importante autre qu'esthétique » jusqu'aux « défauts qui traduisent la proximité d'un état limite ». Les défauts apparents dus aux dégradations observées sur les ouvrages en béton du moins grave au plus grave peuvent être :

- Défauts sans conséquences importantes qu'esthétiques : différence de teintes...
  - Exemple : défauts de parement, différence de teinte, salissures, fuite de laitance...
- Défauts indiquant que l'évolution risque de se faire anormalement.
  - Exemple : carbonatation, faïençage, fissures courtes, fissures reproduisant le ferrailage, fissures diagonales, fissure longitudinale ou verticale, fissure transversale ou horizontale, manque de recouvrement des armatures par le béton, ségrégation...
- Défauts indiquant une évolution plus ou moins avancée.
  - Exemple : aciers dénudés, début d'affouillements de fondations, corrosion acier, corrosion béton, écaillage, efflorescence, épaufrure, fissure de désintégration, gonflement, nids de

cailloux, traces de rouille, début de tassement, fissures ayant évolué depuis la construction ou apparues dans le temps.

- Défauts traduisant une modification du fonctionnement de la structure, et qui mettent en cause la durée de vie de l'ouvrage.
  - Exemple : aciers dénudés très gravement, affouillement des fondations, basculement important, cassure, corrosion très prononcée, flèche permanente anormale, tassement important, fissuration importante.
- Défauts indiquant la proximité d'un état limite et nécessitent une restriction de l'usage de l'ouvrage, voire sa mise hors service.
  - Exemple : basculement très important, cassure, déformation très importante, désintégration généralisée, flèche permanente excessive, rupture, tassement très important, fractures, déformation excessive...

## 2. METHODOLOGIE ET PROBLEMATIQUE D'UNE REPARATION DURABLE

### 2.1. Définitions

#### RÉPARATION

Nécessaire lorsque que les dégradations ont atteint un niveau qui ne permet plus l'exploitation en service dans les conditions d'origine. Il s'agit de ramener une structure endommagée par le vieillissement ou accidentellement à son niveau de service initial (Voir Figure 37).

**Réparation : remettre l'ouvrage dans son état de service initial**

Principe Fondamental d'une Réparation : Il faut isoler et supprimer la cause d'une dégradation avant d'en réparer les effets

#### RENFORCEMENT

Réalisé pour augmenter la capacité de l'ouvrage car sa destination, son utilisation, ou ses contraintes de service vont être modifiées.

Exemple : augmentation des charges roulantes sur un ouvrage d'art ...

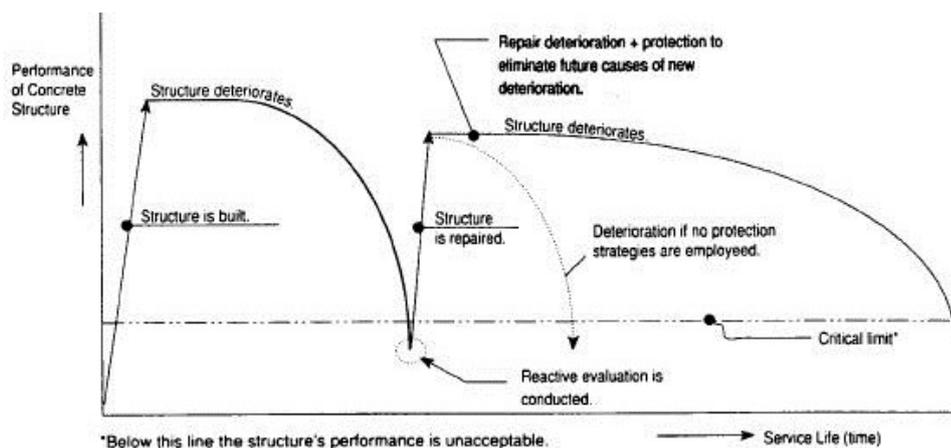


Figure 37 : Courbe de dégradation typique d'une structure de béton [1]

## 2.2. Réparations

On peut regrouper les opérations de réparation en deux grandes familles [1] :

A/ Les réparations *profondes* ou les *reconstructions partielles* sont généralement effectuées pour rétablir l'intégrité structurale d'une structure ou d'une partie de structure. Ce type de réparation doit donc être en mesure de résister aux diverses sollicitations mécaniques subies par l'ouvrage.

B/ les réparations *minces* sont généralement réalisées pour protéger le béton ou les aciers d'armature contre les agressions du milieu extérieur. Plusieurs réparations minces sont aussi effectuées pour restaurer l'aspect esthétique d'un ouvrage.

### PROBLEMATIQUE : BEAUCOUP DE REPARATIONS ECHOUENT.

Plusieurs raisons peuvent être avancées, et on peut citer quelques-unes :

#### - RAISON 1 : MANQUE OU INSUFFISANCE DE DIAGNOSTIC.

Avant de procéder à toute réparation de béton dégradé, il est indispensable de procéder à un diagnostic et de rechercher les causes de dégradations lorsque celles-ci n'apparaissent pas de façon évidente, parce que beaucoup de réparations ont échouées parce que l'étape du diagnostic a été négligée, car la définition du projet ultérieur de réparation ou de renforcement suppose une exacte connaissance des raisons et des causes qui de ces dégradations [MRP].

Le diagnostic a pour but d'identifier la pathologie de l'ouvrage, d'en mesurer l'ampleur, d'en déterminer les causes et d'en estimer l'évolution prévisible dans le temps.

Ce diagnostic se réalise par auscultation. L'auscultation peut être : des observations visuelles, mesure in situ, analyses en laboratoire, simulation de vieillissement...

Seul un diagnostic approfondi permet de définir les réparations à exécuter (produit utilisé conditions d'application, ampleur de la réparation) et les traitements complémentaires à envisager.

Le diagnostic peut être destructif (carottage ...) ou non destructif (scléromètre ...).

→ Le but des méthodes de diagnostic : lorsqu'une dégradation est amorcée quelle est l'origine des désordres – leur étendue, leur évolution probable – leur conséquences sur la sécurité de l'ouvrage ? Ce dernier est-il réparable, et quelles sont les meilleures solutions de réparation ou de protection ?

Dans ce contexte il est nécessaire de faire une enquête pour collecter le maximum d'informations sur l'ouvrage : âge, plans, nature des matériaux (ciment, dosage, ...), nature de l'environnement. Ensuite une inspection visuelle détaillée est réalisée qui va décrire la nature des désordres, leur localisation, leur évolution depuis la dernière visite. Ce travail peut être complété par des relèvements par carottage, analyse chimique, MEB...

Dans un souci de maintenance des ouvrages en béton il est nécessaire de procéder au diagnostic de l'état de santé des structures. Ce diagnostic s'appuie sur des paramètres évalués sur les ouvrages de façon destructive (carottage) et/ou non destructive (ultrasons, radar, inspection visuelle ...). Il permet enfin de statuer sur une possibilité de requalification de l'ouvrage ou sur la nécessité de le remplacer.

**- RAISON 2 : LES REPARATIONS N'ONT PAS ETE FAITES SELON LES CRITERES, CONFORMEMENT A LA NORMALISATION EN VIGUEUR : CHOIX DU MATERIAU ET DU MOYEN DE REPARATION**

Les réparations doivent se faire selon les normes, les recommandations et règles professionnelles concernant *LE CHOIX DES MATERIAUX* : ciment (conditions d'exposition, RAG) – granulats (conditions d'exposition, granulométrie, résistance au gel, la pétrographie, résistance à l'abrasion ou à la désagrégation), la *FORMULATION* : exemple le rapport E/C, la résistance mécanique..., *LES CRITERES DE CONCEPTION ET DES TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE DU BETON*.

Exemple, pour le béton, on impose les critères suivants soient pris en compte :

- Utilisation de produits normalisés
  - Adhérence : supérieure ou égale à la cohésion superficielle du béton
  - Résistances mécaniques : supérieures ou égales à celles du béton support
  - Coefficient de dilatation thermique : équivalent à celui du béton support
  - Module d'élasticité : équivalent à celui du béton support
  - Le produit doit être imperméable à l'eau et aux agents agressifs,
  - La passivation des aciers apparents doit être reconstituée.
  - La reconstitution de l'esthétique initiale par une étude spécifique.
- Remarque : pour les réparations en surface, les parties dégradées doivent être éliminées et le support doit être décapé afin d'obtenir un béton propre, sain, débarrassé des parties non adhérentes et présentant une cohésion superficielle minimum de 1MPa, ainsi que tout ancien traitement de surface. Les aciers seront dégagés jusqu'à l'on retrouve un béton sain et non fissuré et des aciers non rouillés, qui seront par la suite dérouillés par des moyens mécaniques ou manuels.

→ Pour qu'une réparation soit efficace, il faut qu'elle puisse résister aux diverses sollicitations mécaniques ou aux attaques du milieu environnant.

→ Réparation durable ⇒

- Utilisation de matériaux durables = résistants aux attaques physiques et mécaniques.
- Durabilité du composite constitué du vieux béton et de la nouvelle couche, plus ou moins épaisse du matériau de réparation → c'est un grand problème qu'il faut résoudre.

→ L'ensemble du composite doit pouvoir résister aux sollicitations thermiques, mécaniques, aux effets du gel et des sels de déverglaçage, aux cycles de mouillage séchage, aux effets du retrait du nouveau matériau en contact avec l'ancien béton.

→ Un autre point important à considérer, à part la durabilité du matériau de réparation, c'est le contrôle du comportement et la qualité du lien entre l'ancien et le nouveau béton = il faut comprendre les mécanismes qui contrôlent l'intensité des contraintes au niveau de l'interface ancien - nouveau béton (retrait, problèmes de compatibilité des matériaux). Il faut comprendre aussi comment l'exposition au milieu extérieur peut modifier la qualité de cette interface (influence du gel et des cycles de mouillage séchage).

### - RAISON 3 : MANQUE DE PREVENTION ET DE PROTECTION DANS LE PROJET DE REPARATION

Prévention : Le plus souvent, les dégradations constatées sur des éléments en béton armé sont dues à un phénomène de corrosion des aciers d'armature. Si les réparations sont superficielles il y aura risque de corrosion, il faut un traitement de prévention pour stopper les dégradations.

Protection : le but des réparations est non seulement de remettre la structure en état, mais d'empêcher le renouvellement des désordres. En particulier si ceux-ci sont dus à un agent extérieur, il faut compléter les opérations de réparation par un traitement général destiné à empêcher la poursuite de l'attaque du matériau ou à limiter très fortement les apports en agents agressifs.

A titre d'exemple, lorsque la corrosion des armatures est due à un phénomène de carbonatation rapide du béton, il est nécessaire de protéger le béton par un revêtement contre la diffusion du gaz carbonique, le choix du revêtement en surface dépend essentiellement de la cause de dégradation détectée par le diagnostic et aussi de l'esthétique souhaitée.

### - RAISON 4 : MANQUE DE SURVEILLANCE ET D'ENTRETIEN.

Cette étape est essentielle car elle permet d'éviter l'apparition des désordres de nouveau.

DONC : un projet de réparation doit respecter les points suivants :

→ *Diagnostic approfondi et détaillé*

→ *Réparation durable (conforme aux normes)*

→ *Prévention et Protection*

→ *Surveillance et Entretien*

→ *Le projet de réparation : diagnostic, auscultation, réparation ... doit être mené par un personnel qualifié.*

## CONCLUSION GENERALE

Un ouvrage doit résister au cours de sa durée d'utilisation aux diverses agressions ou sollicitations, à savoir :

- Charges et sollicitations pour lesquelles l'ouvrage a été conçu ;
- Environnement de l'ouvrage ou partie de l'ouvrage :
  - Actions atmosphériques,
  - Milieu ambiant particulièrement agressif.
  - Sols en contact agressifs

Ce paramètre doit être considéré pour optimiser la formulation des bétons, c'est ce qu'on appelle : la Durabilité, qui peut concerner le matériau seul ou l'ouvrage (ou une partie de l'ouvrage).

La durabilité de l'ouvrage caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage : fonctionnement structurel, sécurité et confort des usagers. Cette durabilité dépend de nombreux paramètres :

- Qualité des matériaux utilisés : béton... Mais aussi de la qualité :
- De sa conception.
- De sa réalisation selon les « règles de l'art » :  
Fabrication (malaxage...), mise en œuvre soignée : vibration correcte, cure adaptée, prise en compte de conditions climatiques lors du bétonnage...
- Du respect des valeurs d'enrobage minimales des armatures.
- Des opérations d'entretien et de maintenance, surtout pour les ouvrages importants.

Donc, durant sa vie, le béton peut être attaqué par divers agents physiques et chimiques, pathologies qui peuvent réduire sa durée de vie. Le béton est un matériau durable lorsqu'il est : bien formulé et bien mis en œuvre. Un béton durable est d'abord un béton compact et peu perméable. Cette compacité est obtenue en réduisant la porosité et la fissuration précoce du béton. Pour assurer une durabilité du béton, il faut garantir en plus de la compacité :

- Les constituants de qualité conforme aux normes.
- Des résistances mécaniques à 28 jours suffisantes.
- En fonction de l'agressivité du milieu de l'ouvrage, choix spécifique de la nature et du dosage minimal en ciment. Par exemple, s'il y a un risque de dissolution de la portlandite on utilisera des ciments conduisant à une faible teneur en portlandite. Vis-à-vis des agressions dues aux milieux marins ou aux eaux sulfatées, on utilisera des ciments prise mer (PM) ou résistant aux eaux sulfatées (ES).
- Valeur maximale du rapport E/C (à ne pas dépasser).
- Des ajouts minéraux (rôle physique : augmentation de la compacité du béton, ou rôle chimique : confèrent au béton une résistance accrue aux milieux chimiquement agressifs)

# ANNEXE 1 : NORME NF P18-011

Tableaux tirés du fascicule de documentation NF P18-011, Intitulé :

## Bétons - Classification des environnements agressifs (juin 1992)

Le fascicule de documentation NF P18-011 a pour objet :

- De définir les environnements agressifs les plus courants vis-à-vis des bétons armés et bétons précontraints.
- De donner des recommandations pour la confection de bétons résistant aux environnements agressifs.
- De donner des mesures préventives recommandées au niveau de la confection du béton, pour lui assurer une bonne durabilité.

**Tableau : Classes d'Exposition**

DESIGNATION DE LA CLASSE	DESCRIPTION DE L'ENVIRONNEMENT	EXEMPLES ILLUSTRANT LE CHOIX DES CLASSES D'EXPOSITION
<b>1 Aucun risque de corrosion ni d'attaque</b>		
<b>X0</b>	Très sec	Béton à l'intérieur de bâtiments ou le taux d'humidité de l'air ambiant est très faible
<b>2 Corrosion induite par carbonatation</b>		
<b>XC1</b>	Sec	Béton à l'intérieur des bâtiments avec humidité de l'air faible
<b>XC2</b>	Humide, rarement sec	Éléments de structure de rétention des eaux ; un grand nombre de fondations
<b>XC3</b>	Humidité modérée	Béton à l'intérieur de bâtiments ou le taux d'humidité de l'air ambiant est moyen ou élevé ; béton extérieur abrité de pluie
<b>3 Corrosion induite par les chlorures</b>		
<b>XD1</b>	Humidité modérée	Surfaces en béton directement exposées à des embruns contenant des chlorures
<b>XD2</b>	Humidité, rarement sec	Piscines, béton exposé à des eaux industrielles contenant des chlorures
<b>XD3</b>	Périodes d'humidité alternant avec des périodes sèches	Éléments de ponts ; chaussées ; dalles de parc de stationnement de voitures
<b>4 Corrosion induite par les chlorures de l'eau de mer</b>		
<b>XS1</b>	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
<b>XS2</b>	Immergé	Éléments de structures marines
<b>XS3</b>	Zones de marnage ; soumises à des éclaboussures ou à des embruns	Éléments de structures marines
<b>5 Attaques gel/dégel</b>		
<b>XF1</b>	Saturation modérée en eau sans agent de déverglaçage	Surfaces verticales de bétons exposées à la pluie et au gel
<b>XF2</b>	Saturation modérée en eau avec agent de déverglaçage	Surfaces verticales de bétons des ouvrages routiers exposées au gel et à l'air véhiculant des agents de déverglaçage
<b>XF3</b>	Forte saturation en eau, sans agent de déverglaçage	Surfaces horizontales de bétons exposées à la pluie et au gel
<b>XF4</b>	Forte saturation en eau, avec agents de déverglaçage	Routes et tabliers de pont exposés aux agents de déverglaçage et surfaces de bétons verticales directement exposées aux éclaboussures d'agents de déverglaçage et au gel
<b>6 Attaques chimiques</b>		
<b>XA1</b>	Environnement à faible agressivité chimique	
<b>XA2</b>	Environnement d'agressivité chimique modérée	
<b>XA3</b>	Environnement à forte agressivité chimique	

## - Niveau de Protection

A l'agressivité des milieux, correspondent trois niveaux de protection du béton décrits dans le tableau A1 :

**Tableau A1 – Niveaux de Protection**

Niveaux de protection	Mesures de Protection
<b>Niveau 1</b>	Pas de mesures de protection particulières : béton confectionné suivant les règles de l'art.
<b>Niveau 2</b>	Adaptation de la composition et de la mise en œuvre aux conditions du milieu.
<b>Niveau 3</b>	Nécessité d'une protection externe (enduits, peintures) ou interne (imprégnation) pouvant dans certains cas s'ajouter aux prescriptions du niveau 2.

## - Classification des Environnements Agressifs

Quatre classes d'agressivité sont définies : environnements faiblement agressifs, moyennement agressifs, fortement agressifs et très fortement agressifs. Ces classes sont regroupées dans le tableau A2, qui donne en outre leurs symboles, les mesures de protection et le niveau de protection correspondant à chaque classe.

**Tableau A2 – Définition des Classes d'Aggressivité**

Environnement	Symbole	Mesures de protection	Niveau de protection
Faiblement Agressif	<b>A<sub>1</sub></b>	Pas de mesures particulières. Le béton fabriqué suivant les règles de l'art doit être compact par ses qualités intrinsèques.	1
Moyennement Agressif	<b>A<sub>2</sub></b>	Adaptation de la composition et de la mise en œuvre aux conditions du milieu (dosage en ciment, catégorie de ciment, E/C, cure, adjuvants)	2
Fortement Agressif	<b>A<sub>3</sub></b>	Adaptation de la composition et de la mise en œuvre aux conditions du milieu avec action spécifique sur la nature et le dosage en ciment, le rapport E/C.	2
Très Fortement Agressif	<b>A<sub>4</sub></b>	Nécessité d'une protection externe (enduits, peintures) ou interne (imprégnation).	3

## - Agressivité des solutions et des sols

Le tableau A3 donne le degré d'agressivité des solutions et des sols les plus courants :

**Tableau A3 – Agressivité de solutions et de sols**

a) agressivité des solutions en fonction de leur concentration en agents agressifs et de leur pH : eaux stagnantes ou à faible courant, climat tempéré, pression normale.				
Degré d'agressivité	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>
Agents agressifs	Concentration en mg/l			
CO <sub>2</sub> agressif (*)	15 à 30	30 à 60	60 à 100	> 100
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	250 à 600	600 à 1 500 <sup>(1)</sup>	1 500 à 6 000	> 6 000
Mg <sup>2+</sup>	100 à 300	300 à 1 500	1 500 à 3 000	> 3 000
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	15 à 30	30 à 60	60 à 100	> 100
pH	6.5 à 5.5	5.5 à 4.5	4.5 à 4	< 4

<sup>(1)</sup> La limite est fixée à 3 000 mg/l pour l'eau de mer

b) Cas de l'eau douce				
T.A.C. (**)	≤ 1 mé/l	-	-	-
c) Agressivité des sols en fonction de la teneur en SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>				
% SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> dans le sol sec (***)	0.24-0.6	0.6-1.2	1.2-2.4	> 2.4
mg/l de SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> Extrait du sol (****)	1 200 à 2 300	2 300 à 3 700	3 700 à 6 700	> 6 700
Niveau de protection	1	2	2	3

(\*) CO<sub>2</sub> agressif = excès de CO<sub>2</sub> dissous par rapport au CO<sub>2</sub> nécessaire au maintien en solution des hydrocarbonates de Ca et Mg.  
(\*\*) T.A.C. titre alcalimétrique complet (norme NF T 90-036)  
1 mé = 5 degrés français = 2.8 degrés allemands  
(\*\*\*) Extraction par HCl à chaud  
(\*\*\*\*) Extraction par l'eau : rapport eau/sol = 2/1

Si plusieurs agents agressifs sont présents simultanément, la classe d'agressivité à prendre en compte est celle de l'agent dont la concentration ou le pH correspond au plus fort degré d'agressivité.

Si les agents sont en concentrations inférieures à celles qui correspondent au degré faiblement agressif, l'environnement est considéré comme non agressif (A<sub>0</sub>).

## - Recommandations :

### 1- Recommandations Générales :

**Tableau A4 – Recommandations Générales**

Niveau d'agressivité	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	Remarques
Catégorie de ciment	Choix du type de ciment en fonction du type d'attaque			
Dosage minimal en ciment (kg.m <sup>-3</sup> ) (*)	$\frac{550^{(*)}}{\sqrt[5]{D}}$	$\frac{700}{\sqrt[5]{D}}$	$\frac{700}{\sqrt[5]{D}}$ éventuellement	Fonction de la dimension maximale des granulats D en mm
E/C (**)	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,50 éventuellement	Tenir compte de l'absorption d'eau par les granulats
Granulats	Granulométrie conforme aux règles de composition des bétons			
Ouvrabilité du béton	Consistance compatible avec une bonne mise en place et conduisant à la compacité maximale du béton. Vibration, usage éventuel d'adjuvants			Pas d'addition supplémentaire d'eau
Enrobage des armatures (***)	≥ 30 mm	≥ 40 mm	≥ 40 mm	
Protection supplémentaire	Non nécessaire		Enduit, peinture, revêtements, imprégnation.	

(\*) Dans le cas du béton précontraint et de l'eau de mer, le dosage minimal est toujours  $700/\sqrt[5]{D}$   
(\*\*) Les valeurs de E/C données à titre indicatif ne sont pas indépendantes de la catégorie de ciment.  
(\*\*\*) Dépend aussi de la dimension des granulats et des règlements de calcul du projet.

## 2- Recommandations Particulières :

**Tableau A5 – Milieux contenant des Sulfates (sols ou solutions) : Recommandations pour le choix du ciment**

Degré d'agressivité	Niveau de protection	Choix du ciment
A <sub>1</sub>	1	Pas de recommandations particulières
A <sub>2</sub>	2	CPA prise mer, CPJ (laitier, cendres volantes, pouzzolanes) prise mer, CLC, CHF, CLK.
A <sub>3</sub>	2	CPA avec C <sub>3</sub> A ≤ 5%, CHF <sup>(*)</sup> , CLK, CPJ au laitier, cendres volantes ou pouzzolanes (C <sub>3</sub> A du clinker ≤ 5%), Ciments alumineux, CLC <sup>(**)</sup> .
A <sub>4</sub>	3	Idem A <sub>3</sub> éventuellement + protection supplémentaire.

(\*) Avec laitier ≥ 60%  
(\*\*) Avec CaO du ciment ≤ 50%

**Tableau A6 – Eau de Mer : Recommandations pour le choix du ciment**

Eau de mer		
Conditions d'exposition	Immersion totale	Zones de marnage Zones aspergées
Degré d'agressivité	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
Choix du ciment	CPA avec C <sub>3</sub> A ≤ 10% CPJ (clinker avec C <sub>3</sub> A ≤ 10%) CLK, CHF, CLC, ciments alumineux	Ciments contenant du laitier CHF <sup>(*)</sup> , CLK, CPA avec C <sub>3</sub> A ≤ 5% Ciments alumineux, CLC <sup>(**)</sup>
Niveau de protection	2	2

(\*) Avec laitier ≥ 60%  
(\*\*) Avec CaO du ciment ≤ 50%

**Tableau A7 – Milieux Acides : Recommandations pour le choix du ciment**

Degré d'agressivité	Niveau de protection	Choix du ciment
A <sub>1</sub>	1	CPA à teneur réduite en C <sub>3</sub> S et C <sub>3</sub> A CPJ (au laitier, cendres volantes, pouzzolanes)
A <sub>2</sub>	2	CPA à teneur réduite en C <sub>3</sub> S et C <sub>3</sub> A CPJ (au laitier, cendres, pouzzolanes), CLC, CHF, CLK
A <sub>3</sub>	2	Ciments au laitier (avec laitier ≥ 60%) type CHF et CLK, ciments alumineux. CLC (avec CaO du ciment ≤ 50%)
A <sub>4</sub>	3	Idem A <sub>3</sub> éventuellement + protection supplémentaire.

Le tableau A8 donne à titre indicatif les limites en chlore admissibles dans les bétons armés et non armés, compte tenu des chlorures extérieurs qui pourraient diffuser dans un béton perméable.

**Tableau A8 – Teneurs limites en ions chlore dans les bétons armés et non armés (% de la masse de ciment)**

Type de Béton	Concentration en Chlore
Béton non armé	1 %
Béton armé	0,65%
Béton armé précontraint par post-tension	0,2 %
Béton armé précontraint par pré-tension	0,1 %

## ANNEXE 2 : NORME NF EN 206-1 : Valeurs limites

Les limites définies pour la composition et les propriétés du béton par rapport aux classes d'exposition conformément à la norme EN 206 sont données dans le tableau suivant. Les valeurs du tableau font référence à l'utilisation de ciment CEM I et de granulats avec un diamètre maximal des grains de 20 à 32 mm. Se référer à la norme NF P 18-011 (ANNEXE 1) pour la signification des classes d'exposition.

	Classes d'exposition <sup>1)</sup>																		
	1		2				3			4			5				6		
	X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	
Rapport E/C maximal	-	0.65	0.60	0.55	0.50	0.55	0.55	0.45	0.50	0.45	0.45	0.55	0.55	0.50	0.45	0.55	0.50	0.45	
Résistance minimale du béton à la compression <sup>(*)</sup>	C 12/15	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 30/37	C 30/37	C 30/37	C 35/45	C 35/45	C 35/45	C 35/45	C 30/37	C 25/30	C 30/37	C 30/37	C 30/37	C 30/37	C 35/45	
Teneur minimale en ciment (kg/m <sup>3</sup> )	-	260	280	280	300	300	300	320	300	320	340	300	300	320	340	300	320	360	
Teneur minimale en pores d'air (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.0	4.0	4.0	-	-	-	

- <sup>1)</sup> 1 : Pas de risque de corrosion ou d'attaque  
 2 : Corrosion, provoquée par carbonatation  
 3 : Corrosion, provoquée par les chlorures  
 4 : Corrosion, provoquée par les chlorures de l'eau de mer  
 5 : Attaque du gel avec et sans produits de dégel  
 6 : Attaque chimique

<sup>(\*)</sup> C x/y :

**x** Résistance à la compression minimale après 28 jours sur cylindres (ou carottes) de 150 mm de diamètre et 300 mm de longueur [N/mm<sup>2</sup>]

**y** Résistance à la compression minimale après 28 jours sur cubes avec une longueur d'arête de 150 mm [N/mm<sup>2</sup>]

# BIBLIOGRAPHIE

- [1] Gagné R. GCI 714 - Durabilité et réparations du béton (notes de cours). Université de Sherbrook; 2008.
- [2] Documentation Technique infociment ([www.infociment.fr](http://www.infociment.fr))
- [3] Jaafar W. Influence de la carbonatation sur la porosité et la perméabilité des bétons. Paris: 2003.
- [4] AFNOR. NF P 15 301, Ciments courants, composition, spécifications et critères de conformité. AFNOR. 1994.
- [5] Baron J, Ollivier J-P. La durabilité des bétons. ENPC. Paris: 1992.
- [6] Godart B. La Pathologie du béton (notes de cours). Paris: Ecole National des ponts et Chaussées; 2005.
- [7] Ployaert C. Limiter La fissuration : Condition indispensable à la durabilité des bétons. vol. bulletin T. 2010.
- [8] Infociments. Comprendre la norme béton NF EN 206/CN <https://www.infociments.fr>.
- [9] Hammerschlag J-G, Merz C. Réactions alcali-granulats (1ère partie). Bull Du Cim 2000;68, cahier.
- [10] Kurdowski W. Concrete Properties. Cem. Concr. Chem. Springer, New York, London: Springer; 2014, p. 1689–99. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7945-7>.
- [11] Documentation Technique de l'entreprise Holcim ([www.holcim.com](http://www.holcim.com))
- [12] Divet L. Comment se prémunir des réactions sulfatiques dans les bétons? Point sur les normes actuelles et quelques recommandations. Bull Des Lab Des Ponts Chaussees 2002:87–94.
- [13] Baron J, Ollivier J-P. Les Bétons : Bases et données pour leur formulation. Eyrolles. Paris: 1996.
- [14] Documentation Technique de l'Entreprise LERM ([www.lerm.fr](http://www.lerm.fr))
- [15] Dreux G, Festa J. Nouveau guide du béton et de ses constituants. Eyrolles. Paris: 2007.
- [16] Infociments. Prévention des phénomènes de corrosion des armatures en acier dans le béton <https://www.infociments.fr/betons/prevention-des-phenomenes-de-corrosion-des-armatures-en-acier-dans-le-beton>
- [17] Philippe Souchu. Contrôle de la teneur en chlorures des bétons (Rapport du LERM) <http://doc.lerm.fr/contrôle-de-la-teneur-en-chlorures-des-betons/>.
- [18] Ployaert C. Concevoir des ouvrages en béton résistant au gel-dégel et aux sels de déverglaçage. FEBELCEM 2012;Bulletin T.
- [19] AFNOR. NF EN 206-1 : Béton. Partie 1: Spécification, performances, production, et conformité (Concrete. Part 1: Specification, Performance, Production, and Conformity). AFNOR. 2004.
- [20] AFNOR. NF P18-541-Granulats, Granulats pour béton hydrauliques. AFNOR. France: 1994.
- [21] Venuat M. La Pratique des Ciments et des Bétons. Moniteur. Paris: 1976.
- [22] AFNOR. NF P18-011 : Bétons – Classification des environnements agressifs. AFNOR. 1992.

- [23] Calgaro J-A, Lacroix R. Maintenance et réparation des ponts. ENPC. Paris: 1997.
- [24] Neville AM. Propriétés des Bétons. Eyrolles. Paris: 2000.
- [25] CIMBéton. Les ouvrages en béton : durabilité, dimensionnement et esthétique : CTG12 (Tome 3). Paris: 2008.
- [26] CIMBéton. Les nouvelles solutions des bétons prêts à l'emploi : T43 Bétons et Génie Civil (Tome 2). Collection. Paris: 2005.
- [27] Guiraud P (Infociments). Notion de durabilité des bétons (<https://www.infociments.fr/betons/notion-de-durabilite-des-betons>)
- [28] AFPC-AFREM. Compte-rendu des Journées Techniques AFPC-AFREM - Durabilité des bétons. Toulouse: 1997.

### Sites Web :

<https://www.infociments.fr/publications/collection-technique>

<https://www.infociments.fr>

<http://www.ifsttar.fr>

<https://mediatheque.snbpe.org/userfiles/file/mediatheque/public/>

<http://www.amaco.org/spiral-files/download?mode=inline&data=1105>

[www.betons-lemagazine.fr](http://www.betons-lemagazine.fr)

<https://www.holcim.be/fr>

<http://doc.lerm.fr>

(Photo de couverture : <https://www.gettyimages.fr>)