

# **DURABILITE DU BETON**

- Il existe un très grand nombre de structures en béton âgées de 40 à 90 ans qui sont encore en excellent état, mais il existe aussi de très nombreux cas où une mauvaise durabilité a provoqué la ruine complète ou partielle des ouvrages.
- A une certaine époque ; on ne connaissait pas tous les mécanismes de destruction et les façons d'éviter les détériorations : Gel-dégel ; Réaction alcalis-granulats ; Corrosion ...etc.
- On accorde trop d'importance à la résistance à la compression et pas assez aux facteurs environnementaux (on ne devrait pas concevoir un stationnement extérieur en béton de 20 MPa).

- La durabilité des ouvrages en béton peut être définie comme leur capacité d'assurer la tenue en service prévue. À la base du concept de durabilité se trouve la détermination à veiller à la qualité et à son assurance. Dans le cas du béton, l'assurance de la qualité consiste à effectuer des tests et des inspections pour faire en sorte que les matériaux soient bien choisis, dosés, malaxés, manipulés et mis en oeuvre, que la cure soit faite de manière appropriée, et que l'ouvrage lui-même soit bien conçu

- On accorde trop d'importance à la résistance à la compression et pas assez aux facteurs environnementaux
- Une partie des échecs peut aussi être associée à l'évolution de la technologie de fabrication et de la performance des ciments. La performance des ciments progresse constamment et on peut atteindre une résistance donnée en utilisant un rapport E /C toujours de plus en plus élevé.

## **Exemple**

**En 1945, pour obtenir 33MPa on devait utiliser 380 Kg/m<sup>3</sup> de ciment et un rapport E/C de 0.47**

**-En 1978, seulement 250 Kg/m<sup>3</sup> de ciment peuvent suffire avec un E/C 0.72**

**En terme de résistance ; ces deux bétons sont équivalents ; leur durabilité est cependant complètement différente.**

La réactivité chimique des ciments était plus faible (MPa en réserve) et Il n'y avait pas de fluidifiants ni de superplastifiants (on devait utiliser plus de ciment par m<sup>3</sup>).

Le contact n'est pas toujours adéquat entre les chercheurs, les concepteurs et les propriétaires d'ouvrage. Les recommandations touchant la durabilité n'atteignent souvent pas les bonnes personnes en raison des trois solitudes du monde de la construction : les responsables des matériaux ; les concepteurs et les ingénieurs de chantier.

**Pour obtenir un ouvrage durable ; il faut :**

**1. Utiliser un matériau durable**

**2. Concevoir la structure en fonction des facteurs environnementaux**

**3. Exercer un bon contrôle de la qualité des matériaux et des techniques de construction.**

## Définition et objectif

**Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques ; mécaniques ; chimiques...), c'est-à-dire aux charges aux quelles il est soumis ; ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie , le froid , la chaleur , le milieu ambiant..., tout en conservant son esthétique, il doit satisfaire , sans perdre ses performances, aux besoins des utilisateurs au cours du temps.**



**Il devient possible de définir des objectifs de durabilité, et de choisir avec précision, les caractéristiques du béton en fonction de l'agressivité du milieu dans lequel se trouve l'ouvrage, et d'optimiser ses caractéristiques afin de les adapter à la durée d'utilisation souhaitée.**

**Les spécifications concernent la nature et le dosage minimal en ciment, la compacité minimale, la valeur maximale du rapport Eau /Ciment, l'enrobage minimal des armateurs, et la teneur maximale en chlorures dans le béton**

**Quels sont les facteurs de la durabilité ?**

## **Porosité**

**Le béton est un mélange composé d'un ensemble de constituants (ciment, granulats, eau , adjuvants), mais renfermant aussi des vides dus entre autres, à l'eau excédentaire.**

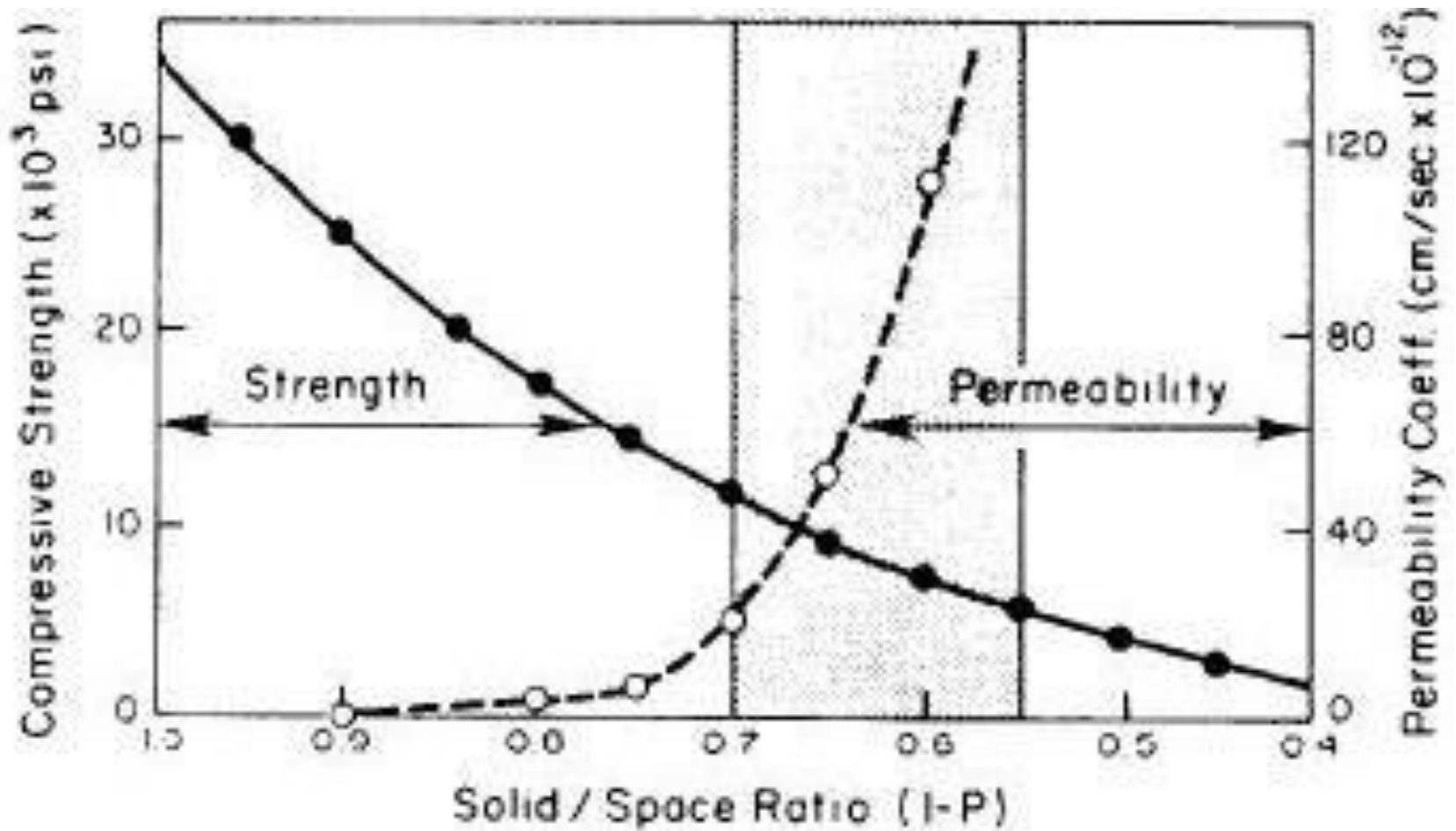
**Le béton durci courant présente une porosité de 10 à 12%. Cette porosité est due à la présence de pores inclus dans la texture même des hydrates et de capillaires qui se développent dans la structure des grains. Les capillaires qui sont dimensionnellement les plus importants, ne dépassent pas un diamètre de quelques microns. Les pores des hydrates sont 10 à 12 fois plus petites.**

**Le comportement du béton et son évaluation dans le temps ont montré, l'influence de la porosité sur la résistance.**

**Mais les corrélations entre durabilité et résistance mécanique, entre absorption d'eau et résistance au gel, ou perméabilité et carbonatation ont été mises en évidence plus récemment.**

La durabilité du béton dépend essentiellement de la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans le réseau poreux du matériau.

**La porosité est un paramètre déterminant de la durabilité du béton ; plus la porosité diminue, plus les propriétés mécaniques augmentent et plus la perméabilité diminue**



Relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton. [Metha, 1986]

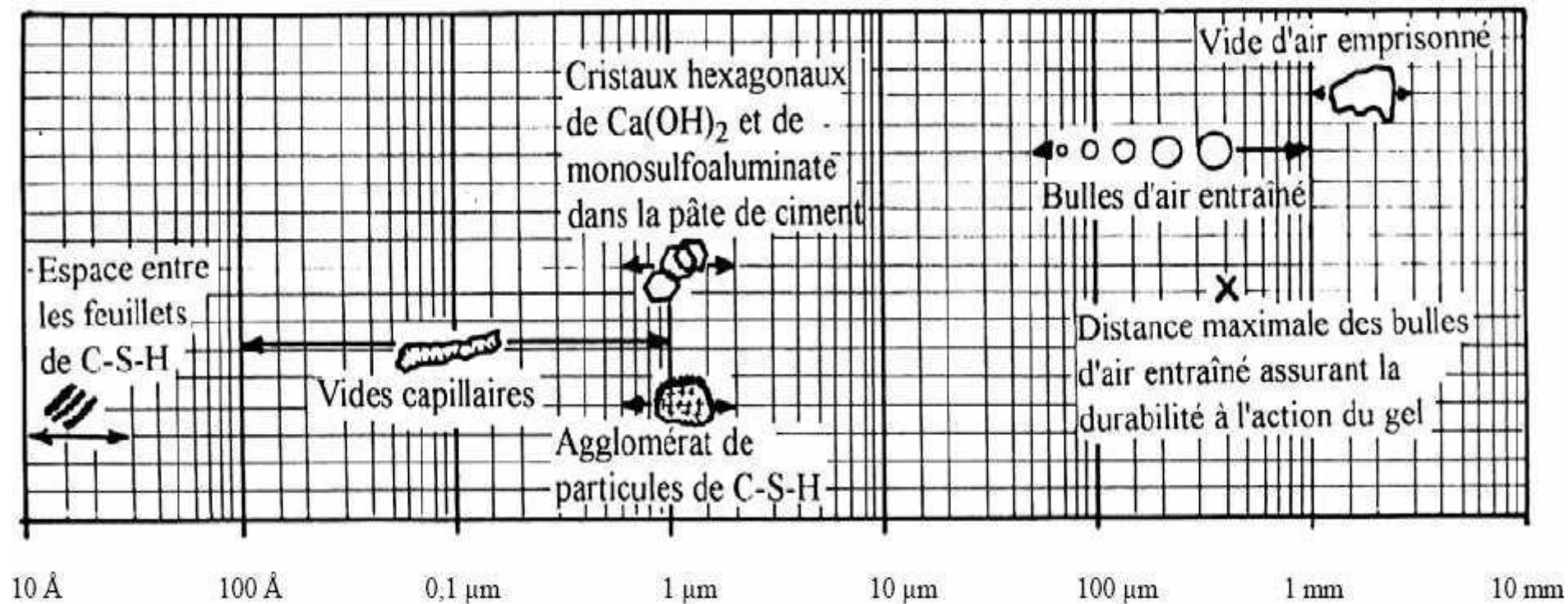
## Types des pores

**La porosité du béton est constituée de plusieurs familles de vide, qu'on peut classer en fonction de leurs dimensions, leurs géométries et de leur rôle dans le transport de matière**

**Par ordre  
décroissant de diamètre on retrouve:**

- les vides d'air ou pores (diamètre  $> 1\text{mm}$ ), ces vides ne sont généralement pas remplis d'eau.**
- les bulles d'air entraînées ( $10\text{ }\mu < \text{diamètre} < 1\text{ mm}$ )**
- Les pores capillaires ( $0,01\text{ }\mu\text{m} < \text{diamètre} < 5\text{ }\mu\text{m}$ ), si le béton est constamment conservé à l'humidité, on peut considérer que les pores capillaires sont pratiquement remplis d'eau. Par contre, si le béton est soumis au séchage, les pores capillaires commencent à se vider graduellement en commençant par les plus gros.**
- les pores de gel (diamètre  $< 40\text{ Å}$ ), contiennent de l'eau qui est en partie adsorbée à la surface des feuillets de C-S-H. Cette eau est relativement stable et il est difficile de l'extraire par séchage.**

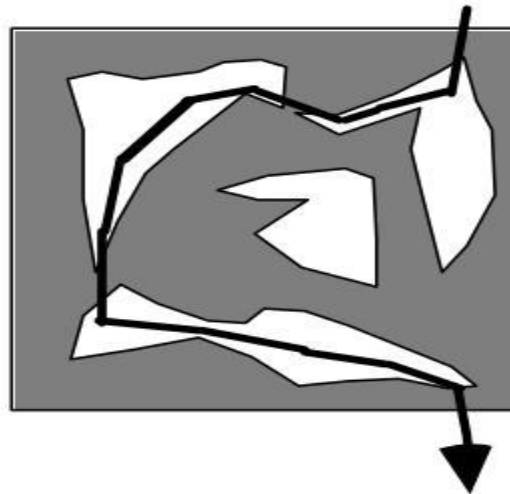




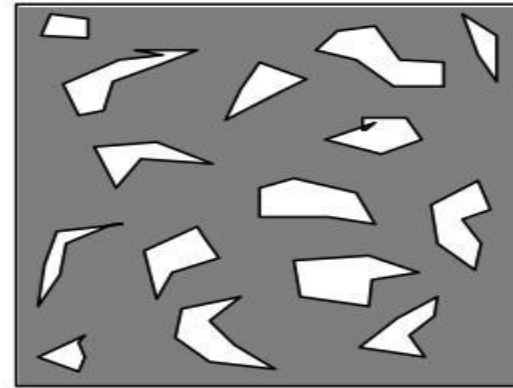
Différentes formes de pores dans la pâte de ciment durcie classées par taille  
*[Mehta et Monteiro, 2005]*

# Rôle des pores dans le transport de la matière

Ce sont surtout les pores capillaires qui influencent le plus la perméabilité du béton. Les pores de gel n'ont pas une grande influence sur la perméabilité.



*Réseau de pores  
interconnectés*



*Réseau de pores  
discontinus*

**Trois facteurs sont prépondérants dans la conception d'un béton de faible porosité :**

- Un dosage en ciment adéquat.**
- Une faible teneur en eau.**
- Une granulométrie comportant des éléments fins, éventuellement actifs, en quantité suffisante pour remplir les espaces entre les plus gros granulats.**

## **Fissuration**

**La fissuration des ouvrages en béton et en béton armé correspond généralement à une altération des propriétés mécaniques, ou physiques du matériau. La connaissance exacte de ce type de désordre doit permettre en outre d'en comprendre la cause, et de définir le type de réparation à envisager.**

**Les fissures peuvent survenir dans le béton non durci, le béton en phase de durcissement ou le béton durci.**

**Dans le cas du béton durci, les fissures se forment lorsque les forces de traction dépassent la résistance à la traction du béton.**

**Les causes de la fissuration sont diverses, elles peuvent être liées, soit à la qualité du matériau (ressuage, retrait), à la mise en œuvre (ajout d'eau, vibration, météo,...), au fonctionnement de la structure (mécanique, thermique), ou encore aux facteurs chimiques (carbonatation, attaque sulfatique,...)**

## **Classification des milieux agressifs et leurs modes d'action**

Les milieux agressifs sont d'ordre chimique ou physique, ils peuvent être classés en trois catégories :

## Les gaz :

**ils sont d'origine naturelle, ou résultant de pollutions atmosphériques et** fermentation, les plus fréquemment rencontrés sont les dioxydes de carbone, de soufre, et d'azote, l'hydrogène sulfuré, les vapeurs chlorées, bromées et iodées, l'ammoniac, ...

## **❓ Les liquides inorganiques ou organiques :**

**qui indépendamment de leurs éventuels effets purement physiques, agissent surtout par leur caractère acide ou basique et par les ions agressifs qu'ils peuvent contenir.**

## **❓ Les solides :**

**ce sont essentiellement des sols et des déchets d'origines diverses.**

**Le mode d'action des agents agressifs dépend du milieu dont le béton est placé, ils agissent comme suit :**



## Mode d'action des gaz

Le transfert des gaz dans le béton se fait généralement par diffusion, et dépend très fortement de l'humidité relative du matériau. Les transferts par diffusion peuvent intervenir sous deux formes : en phase liquide et en phase gazeuse.

## Mode d'action des liquides

Le transfert de liquide se fait, soit par mouvement du liquide sous gradient de pression hydraulique ou par capillarité d'une part, soit par diffusion d'autre part. L'écoulement ou le mouvement du liquide se produit lorsque le béton est soumis à un gradient de pression hydraulique (barrage).

L'écoulement en phase liquide est engendré par les tensions capillaires, ou encore lorsque le béton est sec, il subit une ascension capillaire d'eau d'origine extérieure.

## Mode d'action des solides

La nocivité des substances solides est directement liée à leur capacité d'extraction et de passage en solution dans les eaux avec lesquelles ils entrent en contact. Leurs actions se réduisent alors à des phénomènes voisins de ceux observés dans le cas des agressions par les liquides.

## Problèmes spécifiques de la durabilité

L'attaque sulfatique peut détériorer très significativement les différents types de bétons dans un laps de temps relativement court (10 à 15 ans), selon deux mécanismes physico-chimiques, à savoir la perte des propriétés liantes des CSH et l'expansion.



Attaque sulfatique externe



Attaque sulfatique interne

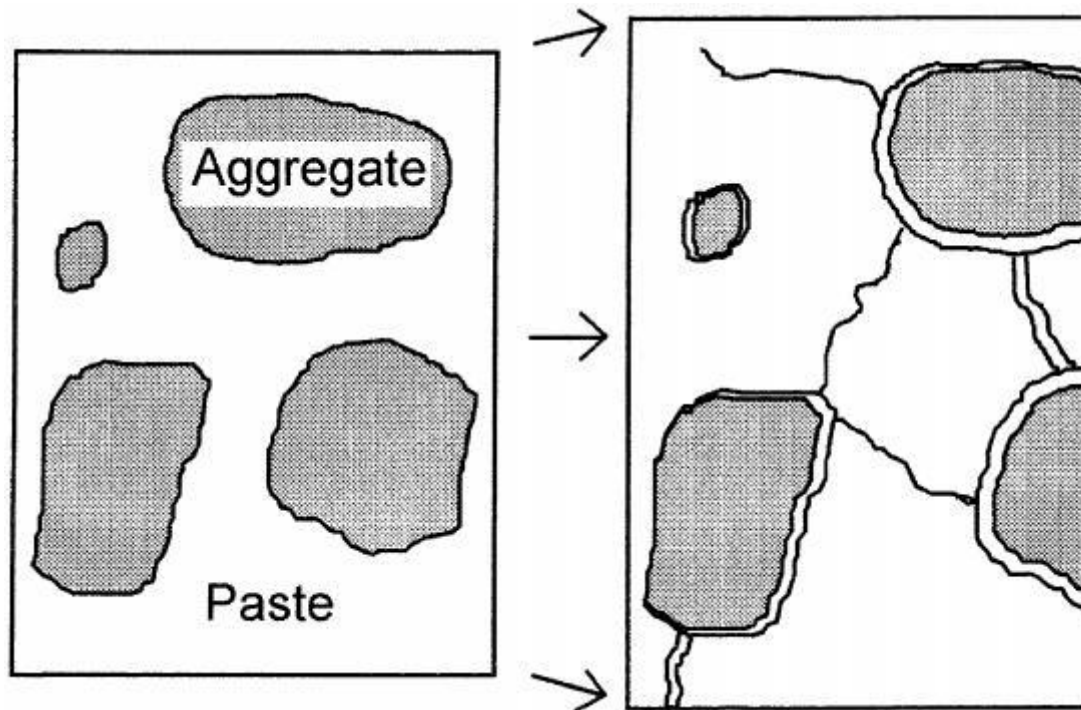


Diagramme schématique illustrant le mécanisme proposé de l'expansion d'un mortier ou béton

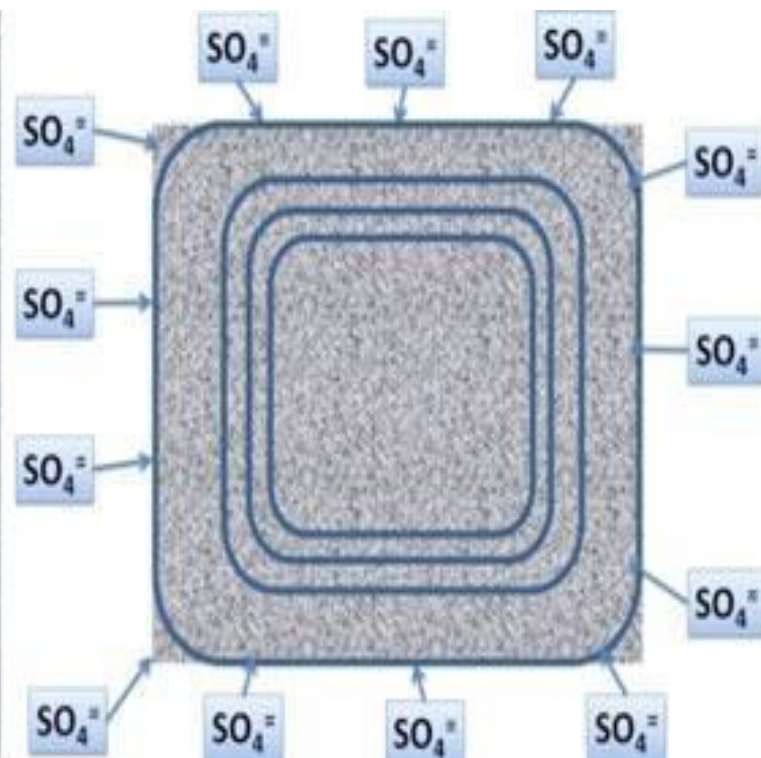
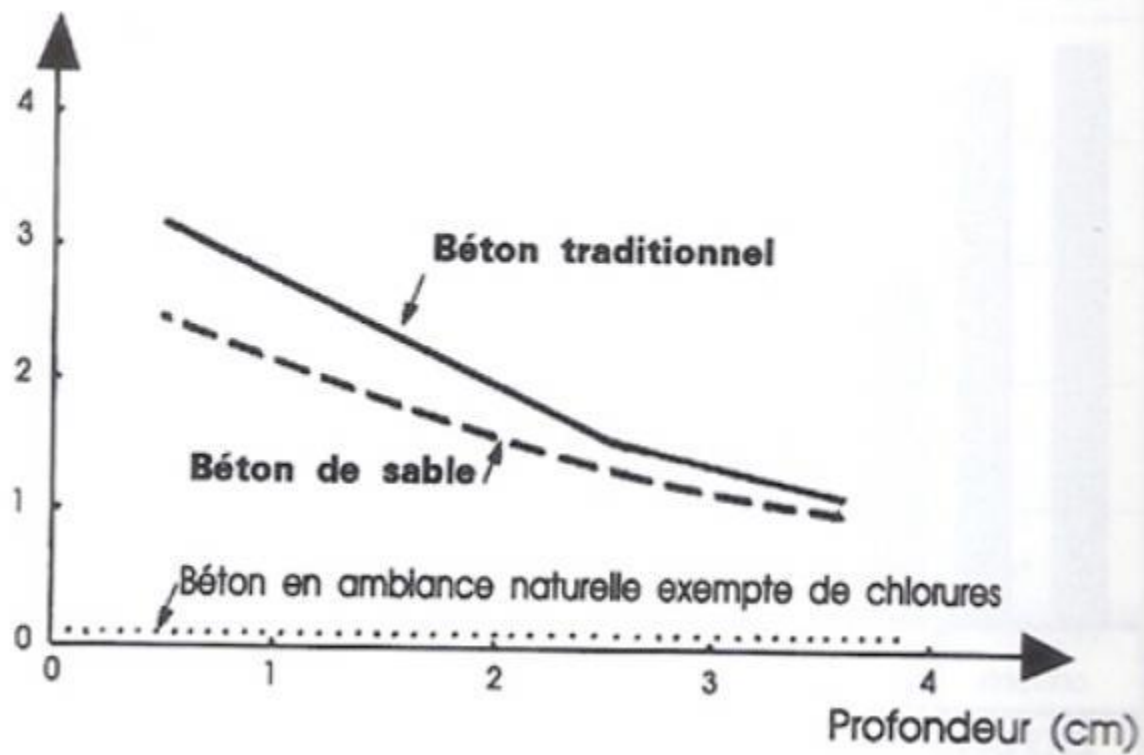
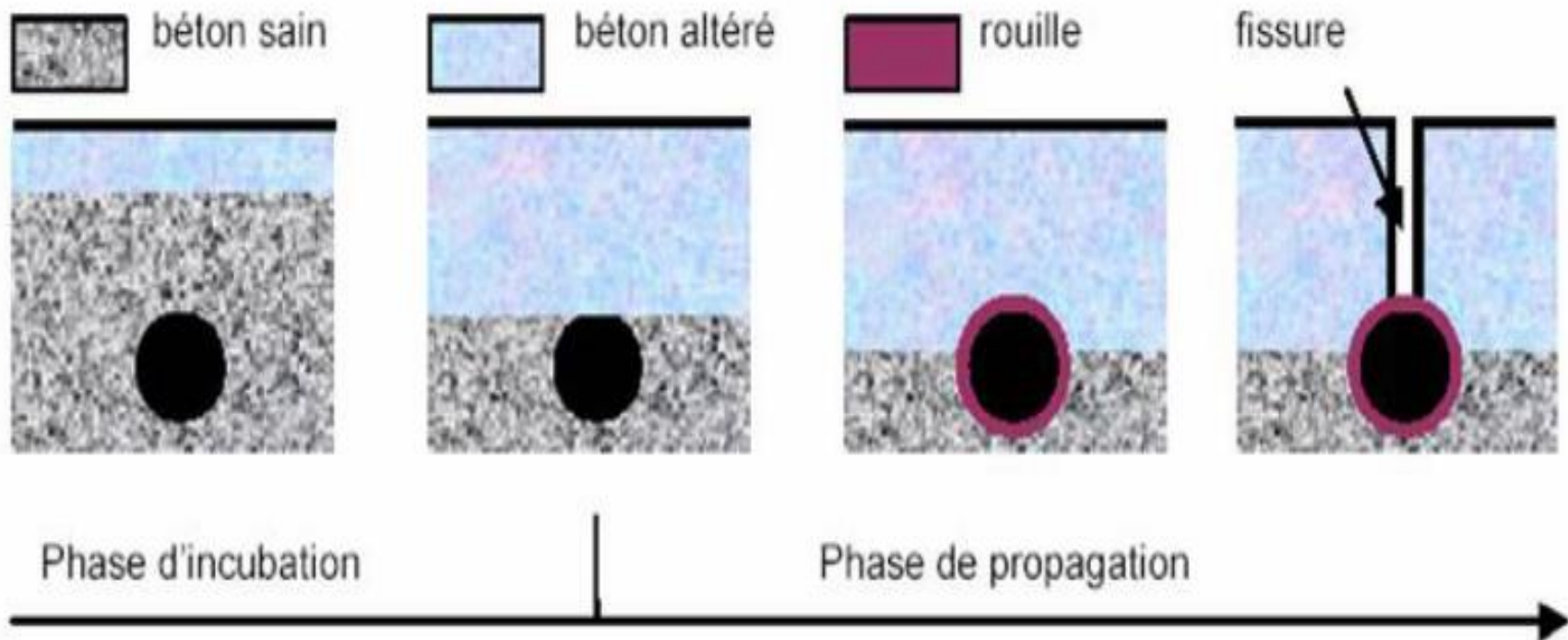


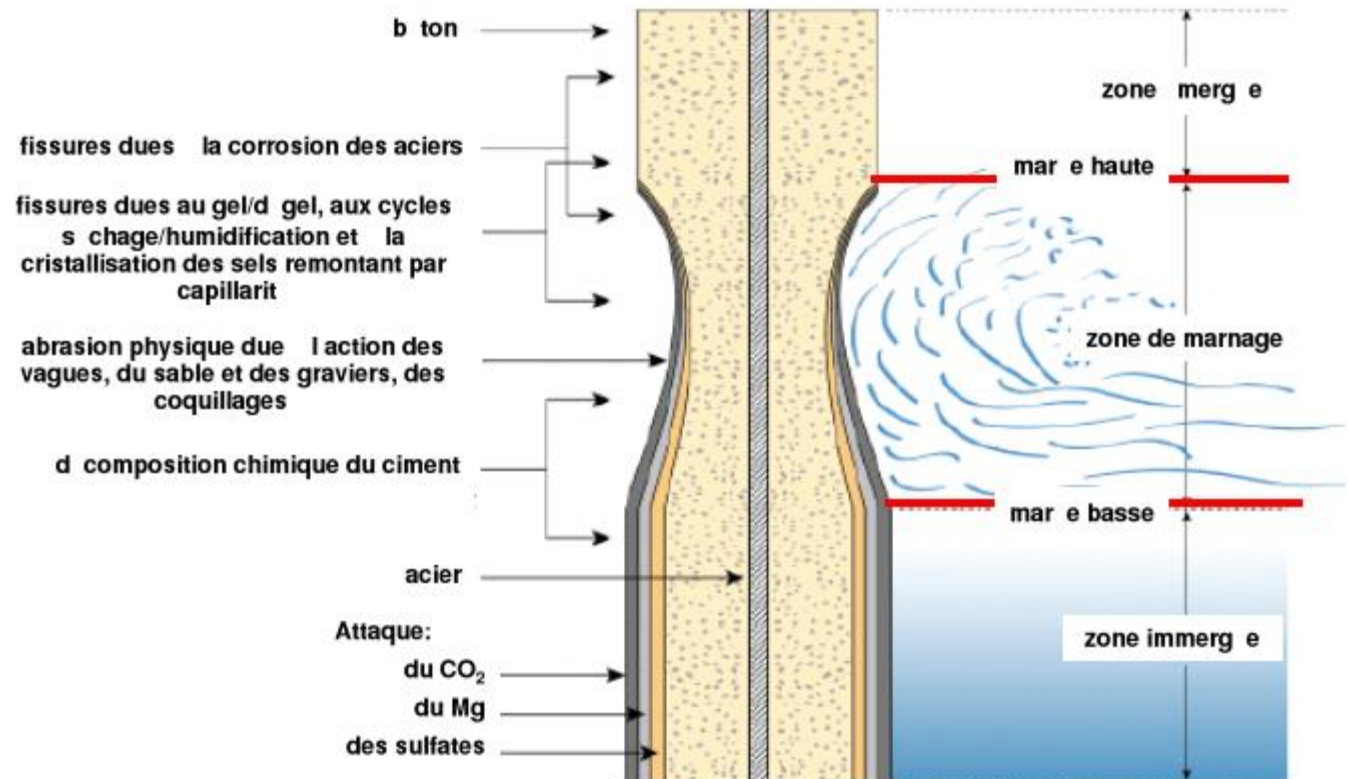
Schéma représentant la dégradation par l'attaque sulfatique de la surface à l'intérieur [Alexandre et al, 2013]



% Cl/Clment











**(a)** pont en bord de mer



**(b)** bâtiment en zone urbaine

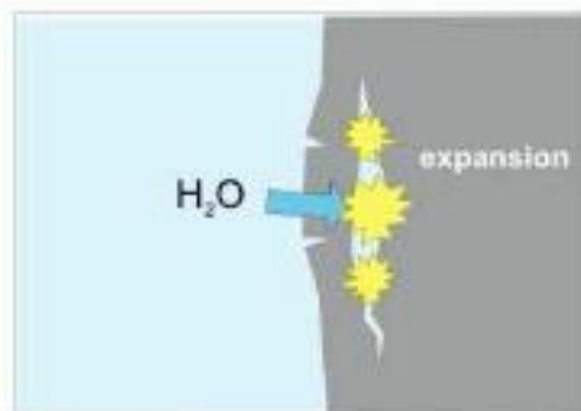
*origines:*

- eau de mer
- sols contenant des sulfates, engrais...



*mesures de prévention / protection:*

- ciment HSR
- E/C ↓
- dosage plus élevé en ciment
- coating







***Exemple de dommages causés par le gel-dégel***

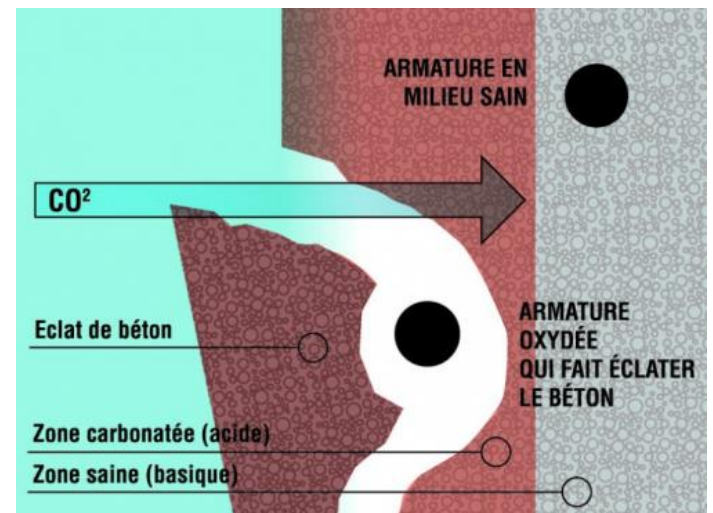
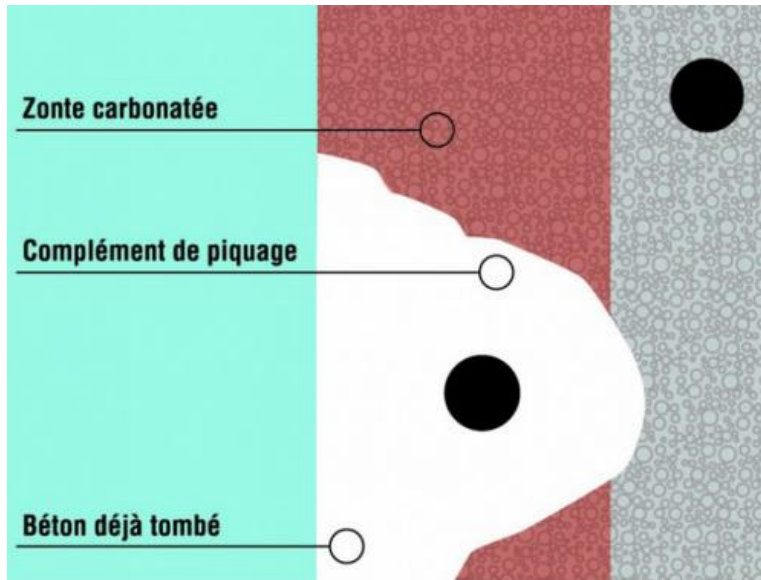
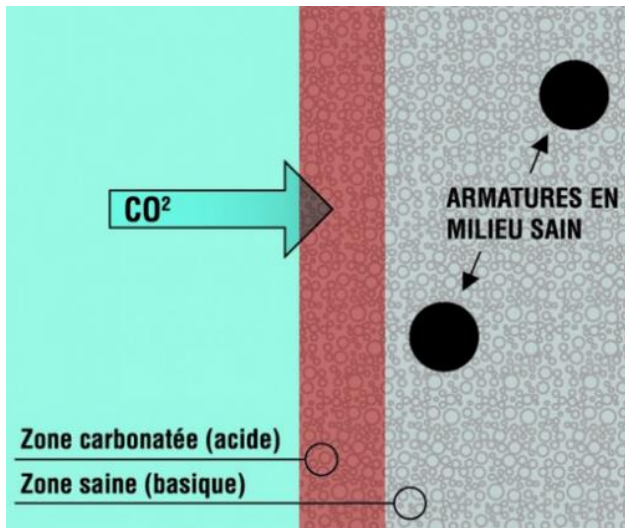
# **LES INDICATEURS DE DURABILITE DU BETON**



- Les indicateurs de durabilité du béton et des structures en BA sont nombreux parmi ces indicateurs on retrouve :
- La carbonatation
- L'absorption d'eau par capillarité
- La Perméabilité au gaz (Hélium)
- La diffusion des ions chlorures
- L'alcali-réaction

# 1. LA CARBONATATION

- Réaction chimique de combinaison de la chaux libre du béton avec le gaz carbonique de l'air.



**Évaluation de la profondeur de béton carbonaté d'un  
parement en béton à partir de mesures effectuées  
sur carottes (diamètre 50 mm) prélevées sur des  
structures en béton**

La mesure de la profondeur de carbonatation du béton s'effectue en laboratoire sur les cassures fraîches des carottes prélevées sur l'ouvrage (fendage suivant une génératrice). Immédiatement après fendage, pour éviter la carbonatation de surface, on pulvérise une faible quantité d'eau distillée ou déminéralisée sur la tranche pour l'humidifier. Puis après absorption de l'eau par le béton on pulvérise l'indicateur coloré de pH (de préférence la phénolphthaléine, mais on peut aussi utiliser la thymolphthaléine

Détermination de la profondeur de carbonatation			
Méthode utilisée	XP P 18-458		
Paramètres		Unités	Observations
Diamètre	64,5	mm	
Longueur moyenne brute	87,49	mm	
masse brute de l'échantillon	611	g	env / 2,58
Profondeur de carbonatation	30-35	mm	

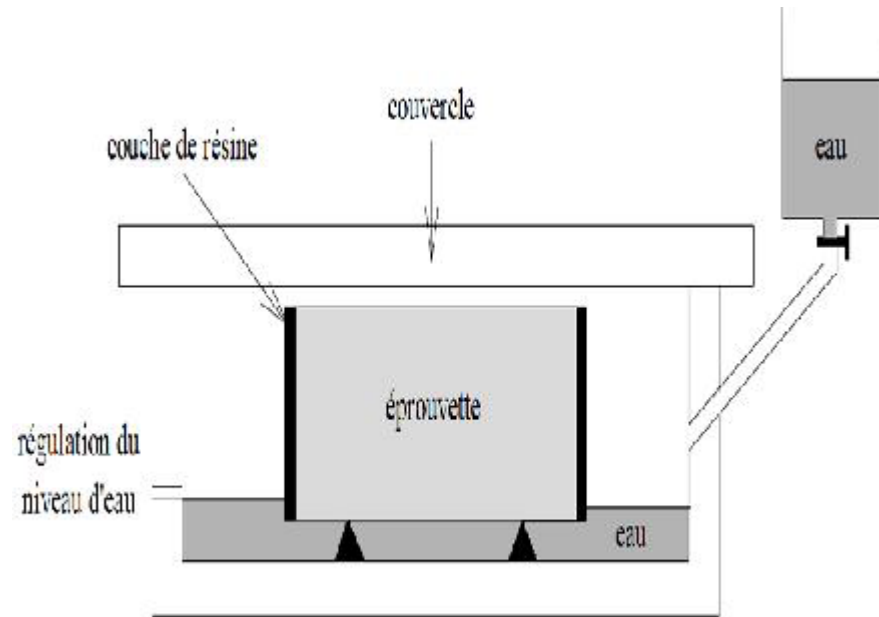




## **2. Absorption d'eau par capillarité**

L'essai d'absorption d'eau par capillarité est un essai qui nous donne une information sur la capacité d'absorption d'eau dans un béton par remontée capillaire. Il consiste à mesurer la masse d'eau absorbée par une éprouvette de béton préalablement conditionnée par un étuvage à 80°C.

## Schéma et dispositif expérimental pour l'essai d'absorption capillaire





Un séchage de l'échantillon à 80°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante (l'état sec est obtenu lorsque deux pesées espacées de 24 heures, ne diffèrent pas plus, de 0,1%).

☐ L'étanchéité latérale est assurée à l'aide d'un papier d'aluminium adhésif.

☐ Les échantillons sont immergés dans l'eau du récipient sur une hauteur maximale de 3 millimètres à l'aide de cales

Par ailleurs, le récipient est muni d'un couvercle évitant l'évaporation de l'eau.

L'essai consiste à suivre par pesées successives la quantité d'eau absorbée par un échantillon de béton ou de mortier préalablement séché à des échéances de 0, 15min, 30min, 1h, 2h, 4h, 8h et 24h. Ce qui permet une caractérisation indirecte de la porosité capillaire.

À partir des mesures des masses et pour chaque échéance  $t$ , on peut déterminer le coefficient d'absorption capillaire par l'équation suivante :

$$C_a = (M_t - M_0) / A$$

$C_a$  : le coefficient d'absorption à l'échéance  $t$  (kg/m<sup>2</sup>).

$M_t$  : la masse de l'éprouvette à une échéance donnée (kg).

$M_0$ : la masse initiale de l'éprouvette (kg).

$A$  : la section de l'éprouvette au contact de l'eau (m<sup>2</sup>).

### 3. Perméabilité au gaz (Hélium)

La perméabilité au gaz est un indicateur de durabilité qui mesure la capacité de matériau poreux traversé par des fluides sous un gradient de pression. Le flux se produit dans un réseau poreux. Le but de cet essai est de mesurer la perméabilité au gaz traversant un échantillon de béton, en fonction de la pression donnée.

## **Préparation des échantillons**

Séchage à 80°C jusqu'à stabilisation de la masse (l'état sec est obtenu lorsque deux pesées espacées de 24 heures, ne diffèrent pas plus de 0,05%).

Les échantillons sont placés dans un dessiccateur hermétiquement fermé 24h avant l'essai

Une dernière pesée est effectuée à la sortie de dessiccateur avant l'essai (pour s'assurer de la stabilisation de la masse).

☐ L'échantillon est placé dans le porte échantillon préalablement graissé, puis placé dans la cellule de perméabilité. Une chambre à air torique gonflée avec une pression minimale de 6 Bars <sup>bars</sup> comprime le porte échantillon et assure ainsi l'étanchéité latérale.

La pression de confinement latéral est établie à 8 Bars.

Les pressions d'essais sont 1, 2, 3 et 4 Bars.





dispositif expérimental pour l'essai de la perméabilité au gaz



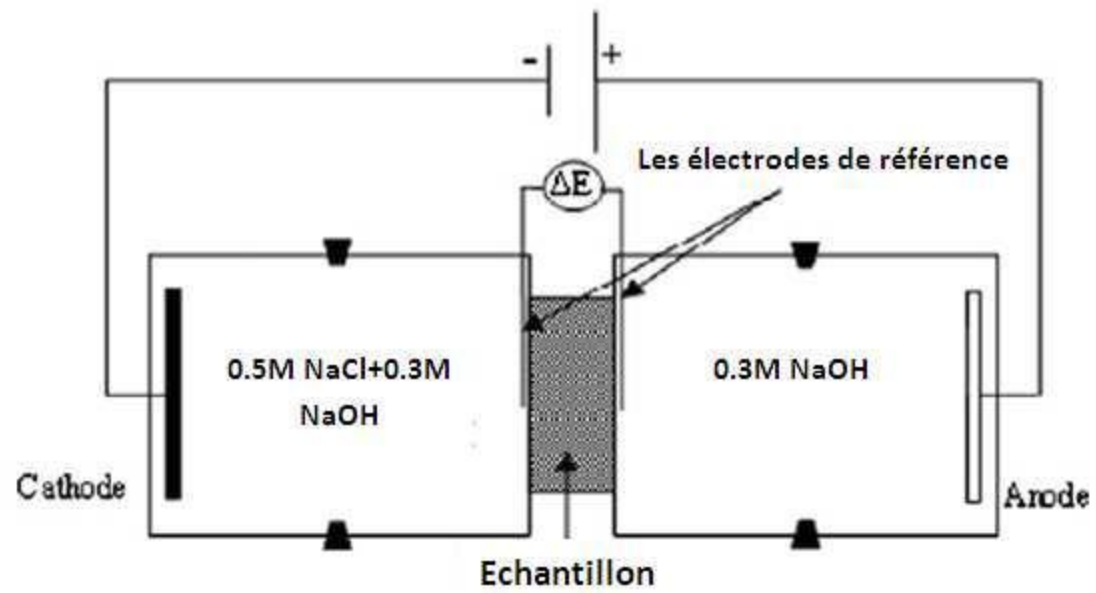
## 4. Coefficient de diffusion des ions chlorures

Le coefficient de diffusion des ions chlorures est un paramètre de transport très important, qui caractérise la pénétration d'agents agressifs dans un réseau poreux exposé en environnement marin.

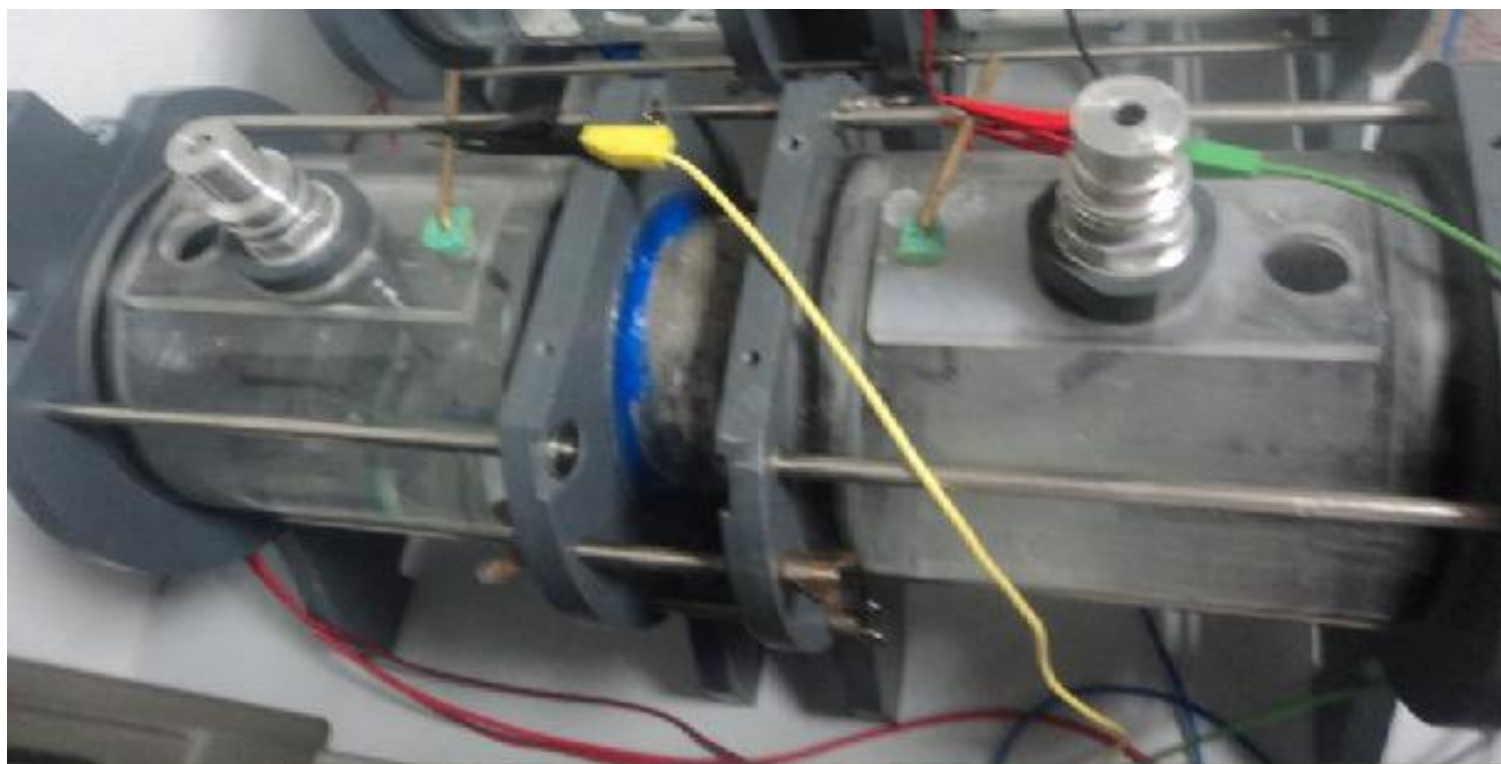
Dans des conditions réelles, la diffusion des ions chlorures demande beaucoup de temps qui peut aller de plusieurs jours à quelques mois. C'est dans cette optique que plusieurs recherches sont menées afin de mettre en place des méthodes d'essais accélérées permettant d'avoir des conditions expérimentales équivalentes aux conditions réelles. En effet, un compromis entre rapidité et représentativité semble être atteint par un essai de migration en régime stationnaire dont le mode opératoire est décrit dans la Nordtest method **NT BUILD 492** [***NT BUILD 492, 1999***].

Après démoulage à 24 heures et une cure en humidité saturante pendant 28 jours, les éprouvettes cylindriques de diamètre  $\phi = 11$  cm et hauteur  $h = 22$  cm sont sciées pour obtenir trois disque dimensions de diamètre  $\phi = 11$  cm et hauteur  $h = 5$  cm. Ils sont ensuite saturés sous vide dans un dessiccateur étanche avec un liquide d'imbibition. Les échantillons sont maintenus sous pression réduite et dans ce liquide pendant  $20 \pm 1$  h à  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ .

Tous les échantillons sont ensuite montés dans la cellule d'essai. Les compartiments amont et aval sont remplis des solutions indiquées sur le schéma . L'essai est réalisé dans une chambre régulée à une température constante de 21°C. L'anode et la cathode sont reliées au générateur, et la tension du champ électrique appliquée aux bornes de l'échantillon varie en fonction de la nature du béton, celle-ci est déterminée en appliquant une tension initiale de 30V.







## Détermination du coefficient de diffusion

A la fin de l'essai de migration des ions chlorures, l'échantillon est fendu en deux. Un indicateur colorimétrique à base de nitrate d'argent permet de déterminer la profondeur de pénétration des chlorures. Cette profondeur de pénétration apparaît en couleur claire, tandis que la zone ne contenant pas de chlorures apparaît en couleur foncée.





Mesure de la zone décolorée où le pH passe de 13 (initialement) à environ 9 (avec la phénolphthaléine) ou environ 10 (avec la thymolphthaléine). De manière plus précise, la phénolphthaléine est incolore pour un pH inférieur à 8,2 et rose soutenu pour un pH supérieur à 9,9, et la thymolphthaléine est incolore pour un pH inférieur à 9,3 et bleu pour un pH supérieur à 10,5. Pour la mesure : – Le fendage libérant les deux faces, il peut être intéressant d'utiliser deux indicateurs colorés différents, l'un à base de phénolphthaléine (virage  $\text{pH} \sim 9$ ), l'autre à base de thymolphthaléine (virage  $\text{pH} \sim 10$ ).

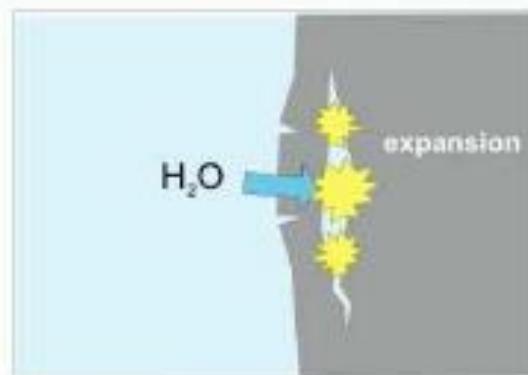
*origines:*

- eau de mer
- sols contenant des sulfates, engrais...



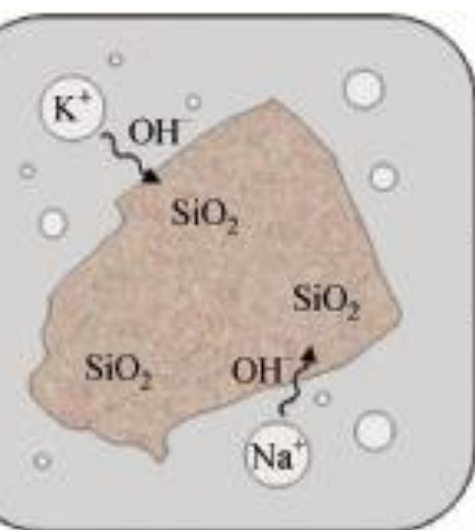
*mesures de  
prévention / protection:*

- ciment HSR
- E/C ↓
- dosage plus élevé en ciment
- *coating*

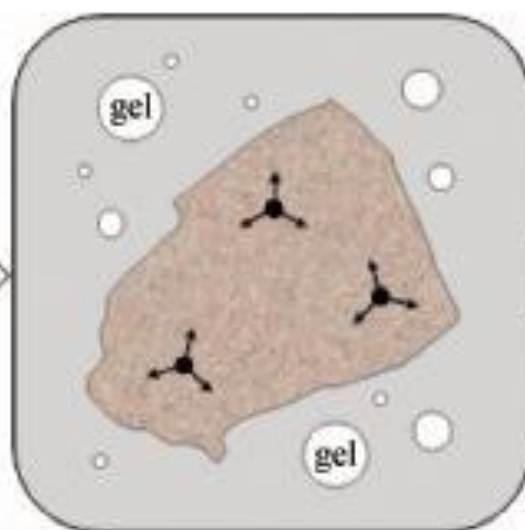
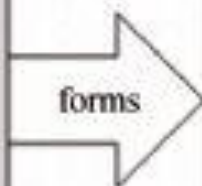


## 5. L'alcali-réaction

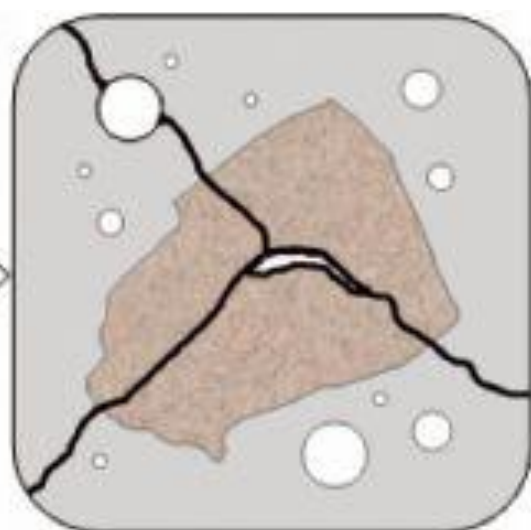
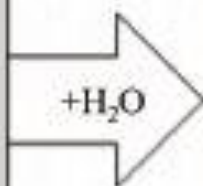
L'alcali-réaction, que l'on appelle aussi communément réaction alcali-granulat, désigne la réaction chimique à l'origine de désordres imputables à un déséquilibre entre les minéraux présents dans les granulats et la solution interstitielle fortement alcaline du béton. Cette réaction, si elle est dominante, n'est cependant pas la seule réaction de gonflement interne du béton.



alkali cement +  
reactive aggregate



expansive gel



cracking of the  
aggregate and paste





